



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

Synthèse du 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

Rédaction :

Isabelle Savini et Lénaïc Pardon - INRA, DEPE

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 la synthèse du 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, source de cette synthèse, 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., Colnenne-David C., De Cara S., Delame N., Doreau M., Dupraz P., Faverdin P., Garcia-Launay F., Hassouna M., Hénault C., Jeuffroy M.H., Klumpp K., Metay A., Moran D., Recous S., Samson E., Savini I., Pardon L., 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*. Synthèse du rapport d'étude, INRA (France), 92 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

Synthèse du 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 Favardin, 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. Les émissions de gaz à effet de serre du secteur agricole et leur prise en compte dans les protocoles "climat"	6
2. L'étude confiée à l'INRA : dispositif, périmètre, méthode	10
3. Les leviers d'atténuation des émissions agricoles de GES et la sélection des actions à instruire	13
4. L'évaluation de l'efficacité des actions d'atténuation	19
Partie II – Analyse des dix actions techniques.....	25
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	26
② Accroître la part de légumineuses en grande culture et dans les prairies temporaires, pour réduire les émissions de N₂O	32
③ Développer les techniques culturales sans labour pour stocker du carbone dans le sol	37
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	42
⑤ Développer l'agroforesterie et les haies pour favoriser le stockage de carbone dans le sol et la biomasse végétale	48
⑥ Optimiser la gestion des prairies pour favoriser le stockage de carbone	54
⑦ Substituer des glucides par des lipides insaturés et utiliser un additif dans les rations des ruminants pour réduire la production de CH₄ entérique	59
⑧ Réduire les apports protéiques dans les rations animales pour limiter les teneurs en azote des effluents et les émissions de N₂O	64
⑨ Développer la méthanisation et installer des torchères, pour réduire les émissions de CH₄ liées au stockage des effluents d'élevage	69
⑩ Réduire, sur l'exploitation, la consommation d'énergie fossile des bâtiments et équipements agricoles pour limiter les émissions directes de CO₂	75
Partie III – Analyse comparée et conclusion.....	81
5. Analyse comparée des dix actions proposées	82
6. Synthèse et conclusion	91

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 CH₄) 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 une synthèse des principales étapes et des principaux résultats de l'étude, à destination des décideurs et des parties prenantes que sont les praticiens de l'agriculture (agriculteurs et conseillers) et les gestionnaires des questions liées aux effets de l'agriculture sur le climat. Cette synthèse a été conçue comme une clé facilitant l'accès aux différents chapitres du rapport d'étude dont elle suit le plan.

Ce document résume 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 il présente (Partie II) les fiches résumées des 10 actions instruites par les experts qui sont décrites de manière exhaustive dans le rapport ; et enfin (Partie III), il présente une analyse comparée des 10 actions instruites. Les résultats intermédiaires et/ou les analyses expliquant les principaux résultats présentés ici, ainsi que d'autres résultats complémentaires, sont détaillés dans le rapport de l'étude.

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

1. Les émissions de GES du secteur agricole et leur prise en compte dans les protocoles "climat"

1.1. Le contexte et les enjeux

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 attribué 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 (consommation de combustibles fossiles, défrichement, agriculture...). Du fait de la croissance 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 pour 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'émissions. Ce réchauffement altérera le fonctionnement général du climat (fréquence accrue d'événements extrêmes...), les 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.

• 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 GES a été intégré 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, 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 ambitieux ont été inscrits dans la loi de programme du 13 juillet 2005, et 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).

Le niveau et l'évolution des émissions de GES sont enregistrés dans des inventaires nationaux, réalisés selon des nomenclatures et des règles de comptabilisation internationales, 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. En France, cet inventaire est établi par le CITEPA (Centre Interprofessionnel Technique d'Etudes de la Pollution Atmosphérique).

• 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 d'équivalent CO_2 (CO_2e) sur un total de 528 Mt CO_2e (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 dus aux émissions de protoxyde d'azote (N_2O), produit lors des réactions biochimiques de nitrification et de dénitrification, et 8,0% sont liés au méthane (CH_4) produit lors de fermentations en conditions anaérobies (Figure 1). L'agriculture est ainsi responsable de 86,6% des émissions françaises de N_2O hors UTCF (Utilisation des Terres, leur Changement, et la Forêt) : 35% sont liés aux émissions directes⁵ par les sols agricoles, 28% aux émissions indirectes, 15% aux productions animales et 8,6% à la gestion des déjections. De même, l'agriculture est responsable de 68% des émissions françaises de CH_4 hors UTCF : 46% proviennent de la fermentation entérique et 22% de la gestion des déjections.

Les 17,8% d'émissions attribuées 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 (Tableau 1), la part de l'agriculture s'élève à environ 20% des émissions totales de GES françaises, le N_2O , le CH_4 et le CO_2 représentant respectivement

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.

⁵ 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).

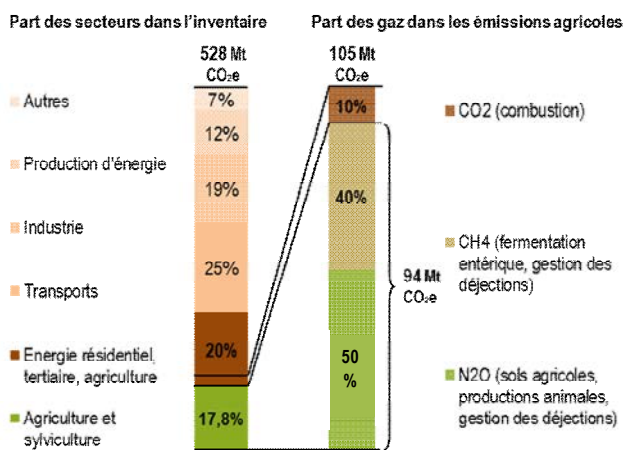


Figure 1. Emissions de GES en 2010, France métropolitaine et Outre-mer (Source : CITEPA 2012)

50%, 40% et 10% des émissions du secteur exprimées en CO₂e. Le poids des émissions de N₂O et de CH₄ dans l'inventaire tient à leurs "pouvoirs de réchauffement global" (PRG) sur un horizon de 100 ans, qui sont très supérieurs à celui du CO₂ (PRG_{CO₂} = 1, PRG_{CH₄} = 25, PRG_{N₂O} = 298 ; nouvelles valeurs proposées par le GIEC depuis 2006) ; à quantité égale émise dans l'atmosphère,

du CH₄ aura ainsi un impact vingt-cinq fois plus important sur le réchauffement que 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 de GES et à l'atteinte des objectifs fixés aux niveaux 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 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.

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. France 2010 : émissions de GES du secteur agricole, y compris la consommation d'énergie (CITEPA 2012) (Inventaire national réalisé selon les règles définies par le GIEC en 1996)

1.2. La comptabilisation des émissions

• La comptabilisation des effets des actions

Les méthodes d'estimation des émissions de GES

Nomenclatures des inventaires, procédures et règles de calcul des émissions sont définies collectivement au niveau international par le GIEC. Ces méthodes sont évolutives : de nouvelles "lignes directrices" ont ainsi été publiées en 2006,

applicables à partir de 2013 en France. L'inventaire national des émissions 2010 (paru en 2012) a encore été réalisé avec les règles définies en 1996.

Pour chaque type d'émissions de GES, la méthodologie GIEC propose 3 niveaux de calcul, de complexité croissante : tier 1 correspond à la méthode par défaut (utilisation des statistiques nationales ou internationales aisément accessibles en

combinaison avec des facteurs d'émission par défaut – pour la définition du facteur d'émission, voir section 4.2) ; *tier 2* à des facteurs d'émission régionalisés (issus de travaux scientifiques, sans modification des équations proposées dans le *tier 1*) ; *tier 3* à des équations ou des modes d'estimation différents (usage possible de la modélisation).

La prise en compte des actions d'atténuation

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 permettre 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).

• 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 GES de plus en plus contraignants, tous les secteurs de l'économie sont appelés à prendre part à l'effort national. 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 Etats-Unis.

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

- Quel est le potentiel technique de réduction des émissions du secteur agricole ; quels sont les leviers disponibles au niveau de la gestion des sols, des productions végétales et des productions animales ? **Au sein de ces leviers, il s'agit d'estimer pour différentes actions le potentiel d'atténuation**, en considérant d'une part le potentiel d'atténuation unitaire (tonne de CO₂e évité par ha, par animal...), et d'autre part l'assiette (surface, effectif animal...) sur laquelle l'action peut être mise en œuvre, la combinaison des deux critères permettant d'évaluer le potentiel d'atténuation à l'échelle du territoire national ;
- **Quel est le coût (ou le bénéfice) évalué de la mise en œuvre de telles 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. L'efficacité peut être exprimée en euros par tonne de CO₂e évitée, ce qui permet de comparer entre elles les actions. Le calcul du coût des actions n'est pas abordé systématiquement dans les études internationales ;
- Quelles mesures peut-on encourager dans le cadre d'une politique réaliste, visant à ce que les exploitants agricoles mettent en œuvre ces actions ? Plusieurs types de mesures sont envisageables (réglementation, taxes, subventions...) et dépendent de la nature de l'action (coût/gain éventuel, vérifiabilité de l'action...).

C'est dans ce contexte politique, économique et scientifique que s'inscrit l'étude demandée à l'INRA. Son objectif était de choisir et d'analyser une dizaine d'actions d'atténuation. Par rapport aux études comparables réalisées dans d'autres pays, ce travail présente plusieurs spécificités : un processus de sélection des actions en plusieurs étapes et s'appuyant sur une diversité de critères ; une estimation des coûts/gains pour les agriculteurs ; une attention particulière à la détermination de l'assiette et des contraintes techniques qui la limitent et d'un scénario de diffusion et des freins techniques et socio-économiques qui peuvent la ralentir.

Bibliographie

Inventaire national France : CITEPA, édition de mars 2012 : Rapport national d'inventaire pour la France au titre de la convention cadre des Nations Unies sur les changements climatiques et du protocole de Kyoto. 1364 p.

Rapport méthodologique : GIEC 2006, Lignes directrices 2006 du GIEC pour les inventaires nationaux des gaz à effet de serre, préparé par le Programme pour les inventaires nationaux des gaz à effet de serre, Eggleston H.S., Buendia L., Miwa K., Ngara T. et Tanabe K. (éds). Publié : IGES, Japon.

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, USA

Etudes Monde : Mc Kinsey & Co (2009), 'Pathways to a low-carbon economy.', Technical report, McKinsey & Co., 192 p.

Etude Etats-Unis : 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. Nicholas Institute for Environment Policy Solutions, Duke University

Etude Angleterre : 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

Etude Irlande : Schulte R., 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

Etude France : Arrouays et al. (2002). Contribution à la lutte contre l'effet de serre. Stocker du carbone dans les sols agricoles de France ? Expertise scientifique collective, rapport d'étude, INRA

Etude Europe : Bellarby J., Tirado R., Leip A., Weiss F., Lesschen J.P., Smith P. (2012). Livestock greenhouse gas emissions and mitigation potential in Europe, *Global Change Biology* DOI: 10.1111/j.1365-2486.2012.02786.x

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

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

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

2.1. La maîtrise d'ouvrage et la maîtrise d'œuvre

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.

• Les commanditaires : l'ADEME et les ministères chargés de l'agriculture et de l'environnement

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.

• Le maître d'œuvre : la Délégation à l'expertise scientifique, à la prospective et aux études de l'INRA

Principes et méthode des études en appui à la décision publique

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.

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 (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.

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 collectif d'experts scientifiques

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 un 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.

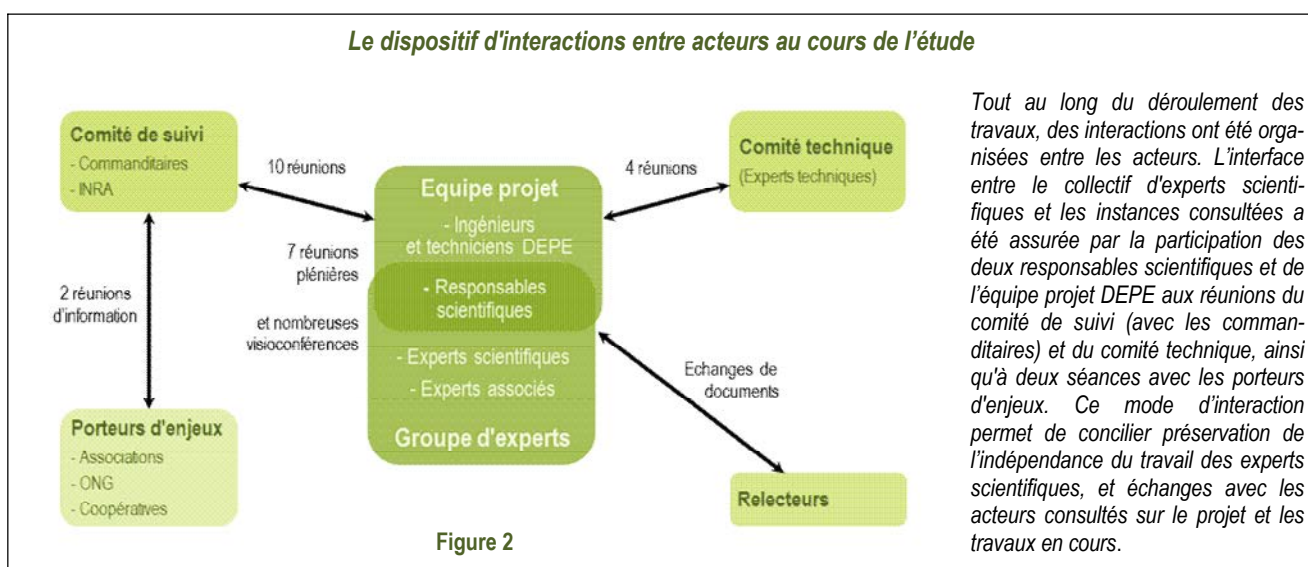
Quelques autres chercheurs ont été associés, de manière plus ponctuelle, à l'étude. Enfin, des relecteurs scientifiques, chercheurs n'ayant pas participé à la réalisation du travail, ont été

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.



2.2. Le déroulement de l'étude

L'étude s'est déroulée en quatre phases, de juillet 2011 à juillet 2013 : une phase d'avant-projet correspondant aux premiers échanges entre les commanditaires et l'INRA et donnant lieu à une lettre de commande délimitant la question posée ; une phase de lancement, avec la constitution du groupe d'experts scientifiques et d'un comité technique, et l'élaboration du cahier des charges de l'étude ; une phase de réalisation des travaux scientifiques (sélection et analyse des actions, puis analyse comparée) et une phase de synthèse des résultats, de production des documents et de préparation du colloque de restitution.

• La définition des objectifs et du périmètre de l'étude

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.

• La sélection des dix actions à instruire

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 3).

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. Le groupe d'experts a ensuite procédé collectivement à un examen comparé de ces actions afin de parvenir, par étapes, à sélectionner une dizaine d'actions qui à la fois présentent de bonnes propriétés au regard du cahier des charges et couvrent une gamme large de productions agricoles. Les arguments ayant conduit à ne pas retenir certaines actions pour une instruction approfondie sont explicités.

Les résultats intermédiaires et finaux de ce processus de sélection ont été soumis au comité de suivi et au comité technique. Les interactions avec ces instances ont permis d'amender et de consolider la liste des actions à instruire.

• L'instruction des actions retenues

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. Sauf indication contraire, les potentiels d'atténuation de différentes sous-actions d'une même action sont cumulables.

L'évaluation du rapport coût/efficacité des actions, fondée sur l'extraction de la littérature scientifique et technique des éléments pertinents, a ensuite été réalisée par les experts responsables et

les groupes restreints d'experts. Hypothèses, choix méthodologiques, sources de données, étapes et résultats des calculs sont présentés sous forme d'une fiche par action, renseignant les rubriques suivantes :

- la description générale de l'action (GES et sous-système de l'exploitation agricole concernés, mécanismes sous-jacents...);
- l'assiette concernée (surfaces ou effectifs animaux sur lesquels l'action pourrait être mise en œuvre...);
- le potentiel d'atténuation escompté et le coût de mise en œuvre de l'action ;
- les autres effets de l'action, évalués de façon quantitative (effet sur la production) ou qualitative (effet sur d'autres objectifs agri-environnementaux...).

La grille complète d'analyse des actions est présentée à la fin de la Section 4.

• L'analyse comparée de l'ensemble des actions et de leurs interactions

Les deux responsables scientifiques de l'étude ont, avec un groupe restreint d'experts, effectué une analyse comparée des actions traitant notamment :

- de l'estimation de l'atténuation potentielle totale du secteur agricole métropolitain à l'horizon 2030 ;
- de la comparaison des coûts et potentiels d'atténuation entre les différentes actions, et avec les autres études menées à l'international ;
- des incertitudes, de la sensibilité et de la robustesse des résultats de l'étude.

• Les produits de l'étude

Ce sont :

- le rapport d'étude, constitué d'une présentation de la méthodologie, des fiches par action, et de l'analyse comparée de l'ensemble des actions. Ce document, qui comporte les références bibliographiques sur lesquelles s'est appuyée l'analyse, est rédigé et signé par les experts ;
- le présent document, synthétisant l'étude et reprenant les principaux résultats et conclusions ;
- un résumé de 8 pages de l'étude ;
- un colloque de présentation des résultats de l'étude (2 juillet 2013) ouvert à la communauté scientifique et technique, ainsi qu'aux porteurs d'enjeux.

3. Les leviers d'atténuation des émissions agricoles de GES et la sélection des actions à instruire

3.1. La démarche de sélection des actions

• Les critères d'éligibilité et de sélection

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 :

• **Eligibilité 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 suspects) 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).

• Un inventaire préliminaire d'actions candidates

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.

3.2. 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 ❶ à ❿) et explicite le principal motif de non-sélection des actions non retenues (⊗).

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

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

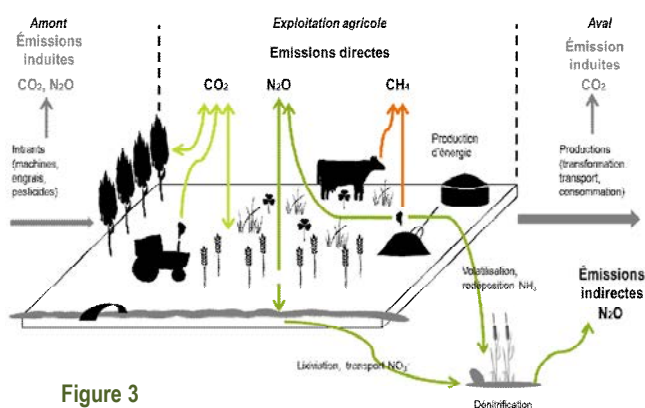


Figure 3

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, redéposition 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. À l'inverse, des sols aérobies peuvent oxyder le méthane atmosphérique.

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

Figure 4. Sources des émissions de GES

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.

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).

⊗ *Éviter 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.

⊗ *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 connus.

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.

3.3. Les dix actions instruites

• 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 2).

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

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.

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.

• Les particularités du processus de sélection des actions

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 (cf. Section 1) mais ayant un cahier des charges différent.

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 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'écartier 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.

	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, 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 2. Actions et sous-actions instruites

4. L'évaluation de l'efficacité des actions d'atténuation

4.1. Les principales variables calculées et situation de référence

• 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.

• La situation de référence

L'objectif étant d'estimer l'atténuation potentielle et le coût d'ici à 2030, il est nécessaire de disposer d'une situation de référence, qui aurait prévalu sans incitations ni mesures supplémentaires visant à réduire les émissions de GES du secteur agricole. Il faut pour cela disposer de deux éléments : les émissions de référence et le scénario de base (ou "sans mesures additionnelles"). Les choix de ces deux éléments ne sont pas forcément indépendants.

Le choix des **émissions de référence** relève principalement d'une convention de calcul et peut être source de confusion dans la comparaison des travaux existants. Dans cette étude, la référence est statique et égale aux émissions de 2010.

Le choix du **scénario de base** (surfaces, effectifs, rendements, prix,...) a des implications importantes tant pour le calcul des potentiels d'atténuation que pour celui des coûts associés. Cela requiert, en particulier, de disposer de trajectoires de prix des produits et des facteurs de production, et de productivité. Pour être mobilisables, ces trajectoires doivent résulter de *projections* intégrant l'effet des mesures déjà en place (ou 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.

Aucune des projections disponibles ne remplissant l'ensemble des critères requis (disponibilité et complétude des données à l'horizon 2030, échelle et résolution des données adaptées, cohérence d'ensemble, scénario ne comportant aucune mesure additionnelle d'atténuation), il a été décidé d'examiner les conséquences des actions d'atténuation à l'aune de la situation prévalant en 2010.

Tous les potentiels d'atténuation sont ainsi calculés relativement aux émissions de référence pour l'année 2010. Ce choix permet de se référer aux émissions et aux méthodes de calcul des derniers inventaires disponibles publiés par le CITEPA. Il faut donc considérer les potentiels et les coûts d'atténuation calculés dans cette étude comme l'effet des mesures d'atténuation examinées à *contexte technologique et système de prix constants*.

Ce choix d'une référence statique historique permet de s'appuyer sur des données disponibles pour l'instruction des actions et assure par construction une cohérence d'ensemble entre les assolements, les volumes de production et de consommation et le système de prix. Enfin, dans un contexte de fortes incertitudes sur les évolutions des politiques agricoles, il permet de ne pas ajouter à l'incertitude qui entoure l'effet propre des mesures d'atténuation celle inhérente à la construction d'un scénario de référence.

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

• Le périmètre et les émissions prises en compte

Les actions sélectionnées au titre d'une atténuation attendue des émissions de GES sur l'exploitation agricole sont aussi susceptibles, du fait d'une modification induite des intrants utilisés ou des productions, de modifier les émissions à l'amont et à l'aval de l'exploitation. La question se pose alors de la délimitation du système sur lequel vont porter les calculs d'atténuation. Deux approches sont classiquement mises en œuvre : l'approche de type "source-puits", qui quantifie les émissions nettes intervenant sur un territoire délimité (une exploitation agricole par ex.), et l'approche de type "analyse de cycle de vie" (ACV), qui évalue les impacts environnementaux d'un système à l'origine d'un produit ou d'un service, depuis l'extraction des matières premières nécessaires à sa fabrication jusqu'à son traitement en fin de vie.

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".

Dans cette logique, deux types de modifications des émissions ont été distinguées :

- celles concernant les émissions **intervenant sur le périmètre de l'exploitation agricole (dites émissions directes) et dans les espaces qui lui sont physiquement liés** (dites **émissions indirectes** ; par exemple les émissions de N₂O intervenant dans les fossés et zones humides situés à l'aval des parcelles, après lixiviation des ions nitrate) ;
- 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 en utilisant des valeurs de référence disponibles dans des bases de données.

• Le mode de calcul du potentiel unitaire

Pour chaque action, après identification du sous-système de l'exploitation concerné (surface cultivée, atelier animal...), tous les postes émetteurs de GES modifiés par l'action et les gaz concernés (CO₂, CH₄, N₂O) sont inventoriés, en distinguant les émissions directes et indirectes d'une part, les émissions induites à l'amont ou à l'aval d'autre part. 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).

Quel que soit le niveau considéré, le principe général des estimations est fondé sur des "facteurs d'émission" (Figure 5). Un facteur d'émission 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.

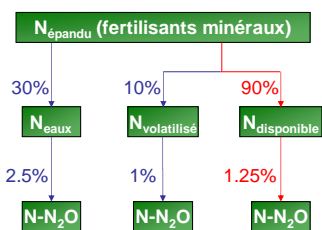


Figure 5. Exemple de schéma de calcul des émissions de N₂O dans la méthode actuelle du CITEPA (GIEC 1996).

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%.

Pour les émissions directes et indirectes, une quantification aussi précise que possible a été faite pour l'ensemble des postes

4.3. L'estimation du coût des actions

• 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 (pour les étapes de conception, mise en œuvre, suivi, évaluation), mais

émetteurs modifiés et des gaz (différence entre les émissions avec et sans action). Deux calculs ont été effectués :

- Un calcul selon la méthode, les équations et les paramètres utilisés pour l'inventaire national des émissions 2010 par le CITEPA (suivant les lignes directrices du GIEC de 1996). Ce premier calcul permet de se référer aux valeurs d'émission de l'inventaire 2010 et de resituer les atténuations calculées dans ce cadre. Sa très forte limite est que les équations utilisées ne permettent pas, par construction, de rendre compte de l'atténuation escomptée de certaines actions (celles portant sur le non-labour ou l'alimentation animale, par ex.). Par souci de conformité avec l'inventaire CITEPA, ce calcul a été effectué avec les anciennes valeurs de PRG (PRG_{CH₄} = 21 et PRG_{N₂O} = 310) ;

- Un calcul "amélioré", proposé par les experts, correspondant à l'estimation la plus précise possible dans l'état actuel des connaissances et des références disponibles dans la littérature. Selon les postes d'émissions et les actions, il peut s'agir d'un calcul conforme aux lignes directrices publiées par le GIEC en 2006 ou qui s'en inspire, ou bien d'un calcul plus élaboré, fondé sur le travail bibliographique réalisé par les experts. 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_{CH₄} = 25 et PRG_{N₂O} = 298).

Pour les 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 seules émissions directes et indirectes. 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 (Base Carbone® de l'ADEME et bases de données Dia'terre®-Ges'tim).

Pour les actions donnant lieu à une atténuation des émissions reproductible annuellement (fertilisation, alimentation animale...), le potentiel d'atténuation unitaire est exprimé en tCO₂e par unité et par an. Pour les actions donnant lieu à une atténuation variable 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. Celles-ci sont donc également exprimées en quantité constante de CO₂e par unité et par an, ce qui facilite la comparaison entre actions.

aussi pour les agriculteurs eux-mêmes (temps passé pour s'informer, se former, remplir des documents...). 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.

Encadré 2. Les 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 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 "sources-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 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 issues du Service de la statistique et de la prospective du ministère de l'agriculture (SSP) :

- la Statistique agricole annuelle (SAA) 2010,
 - le Réseau d'information comptable agricole (RICA) 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 le SSP) 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 (SSP) pour le mode de gestion des effluents...

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 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...).

Type de calcul	Besoins en données	Sources
Calculs d'atténuation	Pratiques culturales (fertilisation, travail du sol...)	Enquête "Pratiques culturales" (Agreste - 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 (Agreste - 2010)
	Prix des engrais	Eurostat
	Marges économiques	Réseau d'information comptable agricole (RICA) (Agreste - 2010)
	Coût des interventions culturales (labour...)	Barème d'entraide CUMA 2010-2011
Calculs d'assiette	Superficies des productions végétales	Statistique agricole annuelle (SAA) (Agreste - 2010)
	Effectifs animaux	
	Rendements	RICA (Agreste - 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 (Corine Land Cover)

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

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).

• Le mode de calcul des coûts unitaires

Par cohérence avec le scénario de base retenu, le système de prix utilisé correspond aux prix des intrants et extrants de l'année 2010.

La perte ou le gain pour l'agriculteur est calculé en considérant : 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.), et les investissements clairement identifiés (achat d'un méthaniseur...). Ce coût de l'action est exprimé en euros par an et par hectare de culture, tête de cheptel ou exploitation.

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, prix des carburants agricoles bénéficiant d'une défiscalisation, par ex.). 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). Dans ce second cas, et afin de pouvoir comparer les actions entre elles, est calculé la perte ou gain unitaire constant qui, sur la durée de

l'action, serait équivalent pour l'agriculteur (annuité constante équivalente). 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).

Les coûts de transaction pour l'agriculteur 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. 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 (Encadré 3).

Encadré 3. La méthode d'estimation des coûts de transaction privés (CTP)

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. 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 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.

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

• 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. Par exemple pour une action sur l'alimentation des ruminants, l'assiette théorique est l'effectif total des cheptels de ruminants ;

- **l'assiette maximale technique (AMT)**, inférieure à la précédente, sur laquelle l'action peut effectivement être mise en œuvre,

sans contre-indication technique, ni effet secondaire défavorable, et dans des conditions techniquement acceptables pour l'agriculteur. Ces différentes restrictions conduisent par ex. 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) ; ou à limiter l'AMT d'une action portant sur l'alimentation animale aux catégories d'animaux dont le régime alimentaire permet une mise en œuvre dans des conditions techniquement acceptables par l'éleveur.

• 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 6) :

- 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).

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

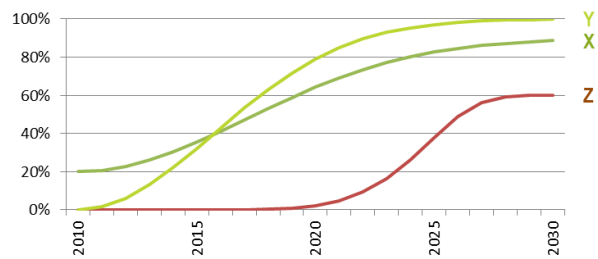


Figure 6. Différents scénarios de diffusion (sigmoïdes), atteignant ou non l'AMT en 2030

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".

4.5. Le calcul du 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 (année où elle est maximale). 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 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.

4.6. 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

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.

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 sous une forme synthétique : 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 les éléments de mise en perspective. Les informations complètes, comportant notamment les références bibliographiques mobilisées et le détail des calculs, figurent dans le rapport d'étude (Encadré 4).

Encadré 4. La grille d'analyse de chaque action dans le rapport d'étude

Introduction. Présentation du sous-système de l'exploitation agricole et/ou de la pratique agricole visés par l'action, mention du principal gaz à effet de serre émis par ce sous-système, et explicitation de l'objectif de l'action.

1. Description de l'action. Présentation en termes de pratiques agricoles, description succincte des mécanismes ou phénomènes mis en jeu, explicitation du périmètre de l'action (sous-actions et options techniques), éclairage sur les rapports ou expertises existants ayant traité cette action.

2. Phénomènes/mécanismes sous-jacents. Etat actuel des connaissances sur les mécanismes, à partir de l'analyse de la bibliographie scientifique internationale (mise en évidence du mécanisme, ordres de grandeur sur les émissions, incertitudes, facteurs déterminants).

3. Lien avec l'inventaire national des émissions. Explicitation de la catégorie de l'inventaire comptabilisant ces émissions. Description de l'effet de la mise en place de l'action sur les émissions estimées dans l'inventaire et de la méthode de calcul qui, le cas échéant, permettrait sa comptabilisation (Tier 1, 2, ou 3).

4. Estimation du potentiel d'atténuation unitaire. Réalisation de l'inventaire des effets attendus de l'action sur les mécanismes émetteurs de gaz. Détermination du facteur d'émission atténué qui sera retenu pour chacun de ces effets en l'exprimant par unité et par an (ex : ha/an, animal/an...).

5. Ligne de base et conditions de développement de l'action. Description de la dynamique actuelle autour de cette action,

analyse des conditions techniques et agronomiques nécessaires à sa mise en place et expression de l'assiette maximale technique qui en découle à l'échelle de la France (ex : en ha, en effectifs d'animaux...), détermination d'une cinétique de diffusion de 2010 à 2030.

6. Calcul du potentiel d'atténuation à l'échelle du territoire français. Le potentiel d'atténuation unitaire, l'assiette maximale technique et la cinétique de diffusion de l'action (part annuelle de surface sur laquelle l'action est mise en place de 2010 à 2030) permettent de calculer l'atténuation potentielle due à l'action à l'échelle de la France de 2010 à 2030 (en quantité de CO₂ équivalent/an).

7. Calcul des coûts. Détermination du coût unitaire pour l'agriculteur induit par l'action, puis à l'aide de l'assiette maximale technique et de la cinétique de diffusion, détermination du coût pour l'ensemble des agriculteurs français.

8. Autres effets de l'action. Mention des autres effets sur la production alimentaire (qualité, quantité) et sur l'environnement, mention des interactions avec des politiques publiques existantes ou en construction, description des interactions potentielles avec les autres actions retenues dans l'étude.

Conclusions. Rappel des résultats des calculs d'atténuation et de coûts à l'échelle de la France métropolitaine et expression de l'efficacité de l'action. Discussion des résultats au regard des incertitudes, des autres effets de l'action, et des interactions avec d'autres actions.

Partie II

Analyse des dix actions techniques



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
- C. Améliorer l'efficacité de l'azote minéral des engrais en modifiant les conditions d'apport

I- Enjeu et principe de l'action

En France, les émissions de N₂O par les sols agricoles sont estimées à 46,7 millions de tonnes d'équivalent CO₂ (MtCO_{2e}) en 2010, soit 44% des émissions du secteur de l'agriculture. Elles sont en particulier associées à l'usage des engrais azotés de synthèse. Il existe un consensus sur l'importance des excédents d'azote dans les systèmes cultivés en France, sur la faible efficacité globale de l'azote apporté par les engrais minéraux de synthèse, enfin sur le potentiel de bonnes pratiques agricoles à améliorer cette situation.

L'action propose d'étudier les possibilités de réduire les émissions de N₂O en diminuant à la fois les doses de fertilisant de synthèse et les émissions par unité d'azote apporté. Les leviers d'action étudiés sont : une diminution de la dose d'azote minéral apportée en ajustant mieux l'objectif de rendement, une meilleure valorisation des effluents d'élevage et autres déchets organiques se substituant aux engrais minéraux, et une amélioration de

l'efficacité de l'azote apporté obtenue en modifiant les conditions d'apport. Toutes ces techniques n'affectent pas les rendements, et n'impliquent pas de bouleversement des systèmes de production.

Cette réduction de la fertilisation minérale permet en outre des économies d'énergie fossile (donc d'émissions de CO₂ induites en amont de l'exploitation), puisque la fabrication des engrais azotés de synthèse est forte consommatrice d'énergie.

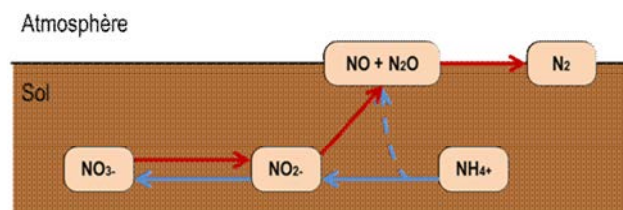
L'action concerne les grandes cultures hors légumineuses. Elle est complémentaire d'autres actions visant également la réduction des apports d'engrais azotés minéraux, par : l'accroissement des surfaces de légumineuses (Action 2), la généralisation des cultures intermédiaires qui limitent les pertes (sous-action de l'Action 4) ou la "désintensification" des prairies les plus fertilisées (sous-action de l'Action 6).

II- Mécanismes et modalités techniques de l'action

• Les émissions de N₂O et la fertilisation azotée

Le niveau des émissions de N₂O (Figure) par les sols est très variable. Il dépend de nombreux facteurs : la nature des produits apportés (fertilisants minéraux ou organiques, formes des engrais minéraux), la nature et l'état du sol (conditions aérobies ou anaérobies), la synchronisation entre la disponibilité de l'azote minéral dans le sol et les capacités d'absorption de la culture. Néanmoins, les analyses globales des flux de N₂O issus des sols montrent qu'en grandes cultures, les quantités d'azote apportées aux sols déterminent l'intensité des émissions de N₂O. Ainsi les méthodologies d'estimation des émissions de N₂O par les sols cultivés, à l'échelle nationale, sont fondées sur la connaissance des apports de fertilisants azotés.

Les fertilisations azotées conduisent à des émissions de N₂O dites "directes", c'est-à-dire des émissions par les sols des parcelles recevant des fertilisants, et à des émissions "indirectes", qui ont lieu depuis d'autres compartiments de l'environnement après un transport (lixiviation de nitrate ou volatilisation puis redéposition d'ammoniac) de l'azote apporté à la parcelle.



Processus biologiques impliqués dans les émissions de N₂O par les sols : nitrification (flèches rouges) globalement observée en conditions aérobies et dénitrification (flèches bleues) en conditions anaérobies

• Les pratiques actuelles de fertilisation azotée

La France est en situation de fort excédent pour l'azote minéral. Les activités agricoles génèrent en moyenne 36 kg de surplus d'azote par hectare et par an, ce qui représente globalement le quart de la fertilisation azotée. Ces valeurs moyennes recouvrent de fortes disparités régionales : les surplus sont en forte augmentation dans les régions Est, et en nette diminution dans les régions d'élevage de l'Ouest où ils demeurent toutefois élevés, les apports d'azote des effluents organiques n'étant que partiellement déduits de la dose d'azote à apporter sous forme minérale.

Malgré trois décennies de recherches sur les pratiques de fertilisation azotée, les études les plus récentes indiquent qu'un des problèmes majeurs reste la faible efficacité de l'azote apporté : moins de la moitié de l'azote fourni par un fertilisant est en moyenne absorbé par la culture, le reste étant perdu par émissions gazeuses (ammoniac, NO_x, N₂O, N₂) ou lixiviation (nitrate), ou consommé par les microorganismes du sol. Mieux synchroniser les apports d'azote avec la demande des plantes permet pourtant d'améliorer la valorisation des fertilisants par la culture. Ces connaissances ont conduit à développer le fractionnement des apports (épandages plus nombreux), qui ne s'est toutefois pas traduit par une réduction des doses totales d'azote. L'utilisation d'outils de calcul ou de pilotage de la fertilisation ne s'accompagne pas, généralement, d'une réduction des apports. Cette situation est notamment due à une surestimation fréquente des objectifs de rendement et donc des besoins en azote de la culture.

• Les sous-actions étudiées

L'action a été explorée à travers 3 leviers déclinés en sous-actions.

- A. Réduire la dose d'azote minéral apportée grâce à une évaluation plus juste des besoins des cultures.

Un meilleur ajustement de la dose d'engrais minéral aux besoins des cultures est obtenu grâce à la fixation d'objectifs de rendement plus réalistes. Cette sous-action s'accompagne d'une utilisation plus importante des outils de pilotage de la fertilisation azotée.

B. Améliorer la valorisation des produits organiques (effluents d'élevage et autres déchets) apportés pour davantage substituer l'azote minéral de synthèse par l'azote des produits organiques et réduire ainsi l'usage des engrais azotés de synthèse. Trois possibilités sont étudiées :

B1. Améliorer la prise en compte de l'azote organique apporté dans le calcul du bilan d'azote.

B2. Améliorer l'efficacité des apports organiques en réduisant les pertes par volatilisation d'ammoniac lors de l'épandage grâce à l'enfouissement systématique des effluents.

B3. Augmenter le volume de déchets recyclés, par la mobilisation de ressources non agricoles supplémentaires (boues de stations d'épuration, déchets agro-industriels ou urbains...).

C. Améliorer l'efficacité d'utilisation par les cultures de l'azote minéral apporté en jouant sur les techniques de fertilisation.

C1. Retarder les dates d'apport de l'engrais au début du printemps sur les cultures d'hiver, en tenant mieux compte des reliquats d'azote minéral en sortie d'hiver.

C2. Utiliser des inhibiteurs de la nitrification associés aux apports d'azote pour obtenir une cinétique de fourniture d'azote par les engrais mieux adaptée aux besoins de la plante.

C3. Enfouir les engrais minéraux dans le sol au semis des cultures de printemps pour limiter les pertes, notamment par volatilisation.

Ces propositions n'entraînent pas de baisse de production. A noter que l'étude complète (voir le rapport) a aussi évalué l'atténuation

permise par la réduction de la fertilisation azotée associée à la réduction des traitements phytosanitaires, s'inscrivant dans la logique du plan national "Ecophyto 2018" ; cette option se traduit par une baisse modérée des rendements. L'étude n'a en revanche pas examiné de scénario de développement de l'agriculture biologique (qui n'utilise aucun engrais de synthèse), car elle induit des baisses de rendement variables mais souvent supérieures au seuil de 10% fixé dans le cahier des charges de l'étude.

L'action s'applique aux grandes cultures, hors légumineuses et prairies temporaires (en rotation avec des cultures annuelles), qui font l'objet d'actions spécifiques dans cette étude (Actions 2 et 6).

• Autres effets de l'action

La modification des pratiques de fertilisation peut affecter le nombre de passages pour l'épandage de l'azote (fractionnement des apports), les techniques d'épandage (engrais solides ou liquides, enfouis ou en surface), les formes d'azote apportées. Ces modifications de pratiques affectent les émissions directes de CO₂ liées à la consommation de gazole des engins agricoles et, en amont, les émissions "induites" liées à la fabrication et aux transports des intrants. Ce poste "amont" est important à considérer dans l'évaluation de l'action, puisque la fabrication et le transport des engrais azotés sont directement liés à la demande en engrais des exploitations agricoles.

En contribuant à la résorption des surplus d'azote, l'action est aussi susceptible de réduire les émissions "aval" induites par la gestion des effets de ces surplus (traitements des eaux, gestion des proliférations d'algues vertes...); ces effets ne seront toutefois pas analysés ni comptabilisés.

III- Calculs du potentiel d'atténuation et du coût de l'action

• Les systèmes et sources de données retenus

La connaissance des pratiques actuelles de fertilisation, nécessaire pour proposer des solutions agronomiques adaptées et quantifier leurs effets, provient de l'enquête "Pratiques culturales" 2006 (les résultats de l'enquête 2011 n'étant pas disponibles lors de l'étude). Ces données couvrent les principales grandes cultures de France ; les quelques cultures plus secondaires non renseignées dans l'enquête ne sont donc pas prises en compte. Les données de surfaces sont issues de la Statistique agricole annuelle (SAA) 2010.

Les situations agronomiques, modalités techniques et effets sur la fertilisation minérale des sous-actions sont les suivants.

A. La fixation d'objectifs de rendement plus réalistes pour les différentes grandes cultures (au vu des rendements effectivement réalisés) porte sur une assiette de 11,7 Mha. Elle conduit à une réduction de la dose de 20 kgN/ha en moyenne soit 10 à 15% de la dose totale ; la betterave est exclue, sa fertilisation ayant déjà été diminuée en raison de ses effets négatifs sur la qualité. La situation de référence (données 2006) est une mise en œuvre de la méthode du bilan sur déjà 2/3 des surfaces, et d'un outil de pilotage de la fertilisation sur 7% des surfaces.

B1. La meilleure prise en compte de l'azote organique dans le calcul du bilan se traduit par une économie d'engrais minéraux de 5 kgN/ha en moyenne.

B2. L'enfouissement des apports organiques est réalisé avec un matériel d'épandage à pendillards et broyeurs intégrés. Il permet, grâce à une réduction de la volatilisation d'ammoniac, une économie d'engrais estimée à 7 kgN/ha.

B3. Le "gisement" de produits organiques riches en azote utilisable par l'agriculture est estimé par l'ADEME à environ 180 000 tN/an, soit 2,3 fois les quantités déjà épandues actuellement. Sa valorisation permettrait une économie d'engrais minéraux évaluée à 2 kgN/ha.

Pour B, l'assiette porte sur 12 Mha. Le potentiel d'atténuation n'a été estimé qu'à l'échelle globale de la France, étant donné la diversité et la complexité des situations locales concernant la substitution entre engrais minéraux et produits résiduels organiques. Cette méthode ne devrait pas trop affecter l'estimation du potentiel global d'atténuation, mais elle conduit probablement à sous-estimer les coûts, puisque les transferts de matières vers les exploitations utilisatrices ne sont pas pris en compte.

C1. L'objectif de retarder l'apport d'azote au printemps pour les cultures d'hiver conduit à supprimer le premier apport, et à reporter une partie de la dose sur l'apport suivant. La part des cultures d'hiver (blé et orge, colza) présentant un fort reliquat d'azote en sortie d'hiver a été estimée à partir de données régionales d'analyses de sol. La baisse de dose est évaluée à 15 kgN/ha sur une assiette de 1,8 Mha.

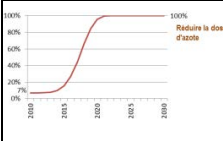
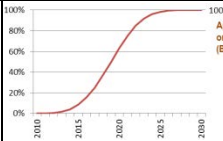

C2. L'option technique étudiée est l'ajout d'un inhibiteur de nitrification (le produit pris comme référence est le DMPP, surtout utilisé en maraîchage pour l'instant). Etant donné qu'une partie de l'azote doit rester rapidement disponible pour la culture, l'inhibiteur n'est associé qu'à une fraction des apports d'azote. La réduction de la dose totale est de 10 kgN/ha sur une assiette de 2,3 Mha.

C3. L'enfouissement localisé de l'engrais est appliqué aux cultures de printemps recevant de l'engrais solide au semis. Il nécessite une modification du matériel d'épandage (ou le recours à une

entreprise). La réduction de la dose totale atteint 12 kgN/ha sur une assiette de 3,7 Mha.

Les sous-actions peuvent être combinées : sur blé tendre d'hiver par ex., associer A, C1 et C2 permet de réduire l'apport d'azote

minéral de 40 kgN/ha environ, soit 25% de la dose moyenne actuelle ; sur maïs, combiner A, B et C3 conduit à une baisse de l'apport d'environ 36 kgN/ha, soit 23% de la dose actuelle.

	Sous-actions	A. Réduire la dose d'azote	B. Mieux valoriser les apports organiques	C. Améliorer l'efficacité de l'azote		
Contenu technique	Situation initiale	Apport d'azote minéral excédentaire, par surestimation des objectifs de rendement	Apports organiques insuffisamment pris en compte dans calcul de fertilisation, et sous-utilisés	Faible efficacité de l'azote minéral apporté (pertes par lixiviation de nitrate et volatilisation d'ammoniac)		
	Gestion de la fertilisation proposée	A. Faire un calcul de bilan azoté avec un objectif de rendement mieux ajusté	B1. Mieux prendre en compte le N organique B2. Réduire les pertes par volatilisation B3. Augmenter le volume de déchets recyclés	C1. Suppression du premier apport d'N	C2. Utiliser des inhibiteurs de nitrification	C3. Enfouir les engrais dans le sol
	Réduction permise d'engrais minéral	19,7 kgN/ha (14,8 à 29,4)	B1 + B2 + B3 : 14,4 kgN/ha (9,8 à 22,2)	15 kgN/ha	10,2 kgN/ha	12,3 kgN/ha (0 à -18,4)
Potentiel d'atténuation unitaire	Emissions* de N ₂ O (directes + indirectes) kgCO ₂ e/ha/an	Moins d'apport azoté et/ou meilleure efficacité				
		108 / 192 + 82 / 30 = 190 / 222	141 / 159	34 / 173	98 / 259	129 / 204
	Emissions* directes de CO ₂ (gazole)	-	-	↘ épandage : 30	↘ épandage : 3	-
	Total émissions* directes + indirectes	190 / 222 142 à 282 / 170 à 315	138 / 156 94 à 214 / 107 à 236	147 / 231	101 / 262	86 / 154 0 à 129 / 47 à 204
	Emissions induites (amont) de CO ₂ et N ₂ O	109 78 à 156	76 52 à 118	87	55	65 0 à 98
	Total* kgCO ₂ e/ha/an	299 / 331	214 / 232	234 / 318	156 / 317	151 / 219
Coût unitaire	Achats €/ha	outil de pilotage : 9,3 (10 €/ha x 93%)	surcoût enfouissement (B2) : 1,5		inhibiteur : 31,2 (0,34 €/kgN)	équipement fertiliseur pour semoir : 2
	Economies €/ha/an	↘ engrais : -18 (-13,5 à -26,8)	↘ engrais : -13,1	↘ engrais : -13,7 -1 épandage : -9	↘ engrais : -9,3 -0,95 épandage : -6,1	↘ engrais : -11,2
	Total €/ha/an	-8,7 (-4,1 à -17,5)	-11,6 (-7,5 à 18,7)	-22,7	15,8	-9,1 (2,1 à -14,7)
Assiette	Assiette théorique	Toutes les grandes cultures fertilisées + maïs ensilage		Grandes cultures d'hiver : 7,8 Mha	Toutes grandes cultures sauf tournesol et riz	Grandes cultures de printemps : 4 Mha
	Critères techniques	sauf betterave	sauf riz	surfaces à fort reliquat de N en sortie d'hiver	inhibiteur associé à 20% de la dose N totale (ou 1 an / 5)	engrais solide au semis
	Ass. Maximale Technique (AMT)	11,7 Mha	12,0 Mha	1,8 Mha	2,3 Mha (320 000 tN/an)	3,7 Mha
Scénario de diffusion	Etat de référence 2010	7%	0%	7%	1,6%	10%
	Hypoth. : AMT atteinte en 2022		Hypoth. : AMT atteinte en 2028	Hypoth. : AMT atteinte en 2022	Hypoth. : AMT atteinte en 2022	Equipement nécessaire * AMT atteinte en 2030
	Scénario de diffusion					

* calcul "CITEPA" / calcul "expert"

Tableau 1

• Estimation du potentiel d'atténuation unitaire

L'atténuation des émissions résulte des effets des sous-actions sur : la dose totale d'azote minéral apporté, les pertes par lixiviation et volatilisation hors de la parcelle, et les émissions amont liées à la fabrication et au transport des engrais de synthèse.

Deux méthodes sont mises en œuvre : le calcul "CITEPA" fondé sur les recommandations GIEC 1996, et un calcul "expert", qui s'en distingue par l'utilisation :

- pour les émissions directes à la parcelle, d'une fonction de type exponentielle, conforme à l'évolution des connaissances au niveau international, et paramétrée à partir de données françaises présentées dans des publications de rang A ;
- pour les émissions indirectes par volatilisation ou lixiviation, des nouvelles valeurs des facteurs d'émission (GIEC 2006), qui ont aussi été modifiées (en se fondant sur la littérature scientifique) pour prendre en compte les effets des sous-actions sur ces émissions ;
- pour les émissions directes et indirectes, de coefficients rendant compte des effets spécifiques des pratiques testées (localisation, usage d'inhibiteurs) issus de la littérature scientifique.

Effet visé :

. **La réduction des émissions directes et indirectes de N₂O** liée, selon les sous-actions, à la réduction des doses totales de fertilisants azotés, à la réduction des émissions directes de N₂O par unité d'azote apporté, ou à la diminution des pertes par lixiviation ou volatilisation. Les émissions sont estimées selon les deux modes de calcul mentionnés ci-dessus.

Autres effets comptabilisés :

. **La réduction des émissions directes de CO₂ dues à la consommation de gazole des engins agricoles**, associée à la modification des itinéraires techniques de fertilisation (suppression d'un épandage, enfouissement). Ces émissions sont estimées d'après la base Dia'terre® - Ges'tim.

. **La réduction des émissions induites**, en amont de l'exploitation, liées à la fabrication et au transport des fertilisants azotés minéraux et des carburants des engins agricoles. Ces émissions sont évaluées à partir des données de la base Dia'terre® - Ges'tim.

IV- Résultats et mise en perspective

• Les résultats

Du point de vue de leur atténuation potentielle, les sous-actions examinées se classent de la manière suivante :

- avec le calcul "CITEPA", ne prenant en compte que la réduction des doses d'azote minéral apporté, les atténuations unitaires par an les plus fortes sont obtenues en ajustant les objectifs de rendement (A), puis en valorisant les apports organiques (B) ou en réalisant un enfouissement localisé de l'engrais (C3). L'atténuation la plus faible est celle permise par la suppression du premier apport sur céréales et le report d'une part de la dose sur une date ultérieure (C1), car le gain d'azote n'est constitué que par l'écart d'efficacité de l'azote entre les deux dates d'apport ;
- avec le calcul "expert", les potentiels d'atténuation sont supérieurs. L'atténuation unitaire la plus forte est obtenue par l'ajout d'inhibiteur de nitrification (C2) ; celles des autres sous-actions sont assez proches. Toutes les sous-actions permettent des réductions des apports d'azote comparables (15 à 20 kgN/ha) et affectent à peu près les mêmes processus.

• Estimation du coût unitaire pour l'agriculteur

Le coût (ou le gain) associé à une sous-action comprend :

- le coût éventuel d'équipements et/ou d'intrants spécifiques : acquisition d'un outil de pilotage de la fertilisation (type Farmstar) pour 93% des surfaces (A), surcoût du matériel d'épandage permettant l'enfouissement des effluents organiques (B2), ou d'un équipement fertiliseur pour semoir (C3) ; achat de l'inhibiteur de nitrification (type DMPP ; C2) ;
- les économies d'engrais azotés de synthèse ;
- la réduction éventuelle du nombre de passages d'engin par suppression d'un apport d'azote (C1 et C2).

• Estimation de l'impact à l'échelle nationale

Assiette maximale technique (AMT)

Les sous-actions A et B concernent *a priori* toute la sole des cultures annuelles fertilisées (donc hors légumineuses). La seule restriction considérée est l'exclusion de la betterave sucrière de l'assiette de A.

Les sous-actions C ne s'appliquent en revanche qu'à certaines situations : le report de l'apport d'azote au printemps (C1) ne concerne que les cultures d'hiver ; l'ajout d'inhibiteur de nitrification (C2) est plafonné à 20% des surfaces maximales possibles pour des raisons d'écotoxicité potentielle ; l'enfouissement localisé de l'engrais (C3) n'est envisagé que sur les cultures de printemps.

Scénario de diffusion de l'action

Pour trois des sous-actions proposées (A, C1 et C2), qui relèvent d'ajustements techniques, l'hypothèse retenue est celle d'une atteinte de l'AMT dès 2022. Pour C3, qui nécessite une modification du matériel d'épandage, la diffusion retenue est plus lente.

La diffusion des sous-actions pourrait être favorisée par le renforcement de la réglementation "directive Nitrates" ou le renchérissement des engrais. Le développement (en cours) d'outils facilitant l'appréciation des apports organiques (composition et quantité) et l'instauration d'une incitation financière sont supposés favoriser respectivement l'adoption de B et de C2.

Les sous-actions se distinguent surtout par leurs assiettes d'application, importantes pour A et B (qui concernent quasiment toutes les grandes cultures), plus restreintes pour les sous-actions relatives à l'efficacité de l'azote.

Pour toutes ces sous-actions, le potentiel d'atténuation lié à la fabrication et au transport des engrais azotés est important, et représente environ 50% de l'atténuation directe.

En résumé, ces sous-actions permettent des atténuations totales (émissions induites comprises) de l'ordre de 0,15 à 0,30 tCO₂e/ha/an avec le mode de calcul "CITEPA", et de 0,18 à 0,33 tCO₂e/ha/an avec le calcul "expert". Ces valeurs sont très proches de celles estimées dans des études similaires à l'étranger.

Quatre des sous-actions ont un coût "négatif", c'est-à-dire représentent un gain pour l'agriculteur. La sous-action C2 est onéreuse, en raison du coût de l'inhibiteur de nitrification.

		Année 2030						Cumul sur la période 2010-2030					
		A	B	C1*	C2*	C3	A+B+C1+C2+C3**	A	B	C1*	C2*	C3	
Potentiel d'atténuation (méthode "CITEPA") Sans émissions induites		MtCO ₂ e	2,2	1,7	0,3	0,2	0,3	4,6	32,4	22,3	3,9	3,3	3,8
Potentiel d'atténuation (méthode "expert")	Sans émissions induites	MtCO ₂ e	2,6 2,0 à 3,7	1,9 1,3 à 2,8	0,4 0,1 à 0,7	0,6 0,3 à 0,8	0,6 0,2 à 0,8	6,1 3,9 à 8,8	38 29 à 54	25 17 à 38	6 2 à 10	9 4 à 11	7 2 à 9
	Avec émissions induites	MtCO ₂ e	3,9 3,3 à 5,0	2,8 2,2 à 3,8	0,6 0,3 à 0,8	0,7 0,4 à 0,9	0,8 0,4 à 1,0	8,8 6,6 à 11,5	56 48 à 72	37 30 à 50	8 4 à 12	10 6 à 13	10 5 à 12
Coût total pour les agriculteurs		M€	-101 -205 à -49	-140 -226 à -90	-41 -68 à -12	37 18 à 46	-34 -55 à 8	-280 -536 à -97	-1476 -2977 à -706	-1869 -3024 à -1200	-596 -993 à -178	520 260 à 650	-397 -641 à 92
Coût de la tonne de CO₂e pour l'agriculteur (méthodes "expert", sans émissions induites)		€/tCO ₂ e	-39 -56 à -24	-74 -80 à -70	-98	60	-59 -72 à 45	-46 -58 à -32	-	-	-	-	-

M : millions

* les fourchettes (atténuation, coût) portent sur l'assiette atteinte en 2030

** valeurs obtenues en sommant A+B+C1+C2+C3, sans tenir compte des interactions entre sous-actions.

Tableau 2

Potentiel d'atténuation et coûts pour l'ensemble de l'action

Sous hypothèse d'additivité, l'atténuation globale calculée en 2030 pour l'ensemble des 5 sous-actions est de 6,1 MtCO₂e (calcul "expert", hors émissions induites).

L'hypothèse d'additivité est cependant simplificatrice, car la mise en œuvre d'une sous-action diminue la quantité d'azote minéral épandue, et éventuellement l'assiette, sur lesquelles peuvent porter les autres sous-actions. L'estimation pour l'ensemble de l'action a été recalculée en appliquant successivement, aux assiettes concernées, les sous-actions dans un ordre défini (A puis B puis C1 à C3), en tenant compte des interactions entre les sous-actions. Ce calcul tenant compte des interactions conduit à une atténuation en 2030 de 5,3 MtCO₂e (calcul "expert", hors émissions induites). La prise en compte des interactions modifie dans certains cas légèrement le coût unitaire des sous-actions, et conduit à un coût sur l'AMT en 2030 de -290 M€ (contre -280 M€ pour la somme des coûts des sous-actions).

• La sensibilité des résultats aux hypothèses

L'atténuation unitaire est principalement affectée par les hypothèses concernant les effets des pratiques sur la réduction des quantités d'azote minéral, qui se traduisent par : l'estimation de la réduction de dose permise par l'action, ou un coefficient de volatilisation (gestion des produits organiques, enfouissement localisé de l'azote, nitrification retardée par un inhibiteur), ou un coefficient d'équivalence de l'engrais (Keq) pour la sous-action B. Ainsi par exemple, une augmentation de 10% de la valeur de ce coefficient utilisé pour convertir les quantités d'azote apportées par les produits organiques en quantité d'azote utilisé par une culture accroît l'atténuation unitaire de 13% environ.

Les résultats sont légèrement affectés par les données statistiques utilisées qui, pour les pratiques culturales, datent de 2006 (dernière enquête disponible). Or les pratiques ont évolué depuis, notamment avec la diffusion progressive des principes de la fertilisation raisonnée. Ces évolutions se répercutent principalement sur l'assiette sur laquelle les sous-actions sont mises en œuvre.

Enfin, le potentiel d'adoption par les agriculteurs de certaines sous-actions (l'utilisation d'inhibiteur de nitrification, l'enfouissement localisé de l'engrais) est assez incertain, hors scénario d'incitation

ou de taxation financière. L'atténuation cumulée en 2030 est donc très sensible aux hypothèses de diffusion retenues.

• Les conditions d'une prise en compte de l'action dans l'inventaire national

Comptabilisation des effets

L'utilisation d'un calcul "expert", intégrant les coefficients GIEC 2006 et tenant compte des effets connus des pratiques sur les émissions directes et indirectes, augmente légèrement l'estimation de l'atténuation potentielle pour les sous-actions A et B pour lesquelles seul l'effet de la dose apportée sur les émissions est modifiée par le calcul. L'augmentation de l'atténuation est beaucoup plus élevée pour les sous-actions C1 à C3 pour lesquelles le calcul "CITEPA" ne prend pas en compte les changements liés à l'amélioration de l'efficacité de l'engrais.

Du point de vue des inventaires, la méthode de calcul actuelle (GIEC 1996) qui ne tient compte que des quantités d'azote apportées pour calculer les émissions, rend mal compte des effets des pratiques très intéressantes pour les atténuations (telle que l'usage d'inhibiteurs de nitrification, ou l'apport localisé de l'azote dans le sol). La relation de type exponentielle introduite dans cette étude est basée sur l'analyse des publications françaises. Elle fait écho à des publications récentes internationales mettant en avant cette forme de relation qui pourrait être proposée au GIEC. Une prochaine étape pourrait être, après consolidation des connaissances, la prise en compte de la variabilité des émissions de N₂O en fonction des conditions pédoclimatiques.

Vérifiabilité de la mise en œuvre de l'action

Les données utilisables par le CITEPA pour comptabiliser les sous-actions mises en œuvre pourraient être l'évolution de la livraison des engrais minéraux (statistiques publiées par l'UNIFA). La directive dite "Nitrates" (91/676/CEE), la conditionnalité des aides de la PAC, le régime des Installations Classées pour la Protection de l'Environnement (ICPE), les Mesures Agro Environnementales sont autant de dispositifs dans lesquels il est déjà fait obligation aux exploitants de détenir un Plan Prévisionnel de Fertilisation et un Cahier d'Épandage et qui peuvent être contrôlés pour la mise en œuvre sur le terrain. Les modalités techniques d'apport (dates, enfouissement...) sont cependant difficilement vérifiables.

• Les contextes et mesures susceptibles de favoriser le déploiement de l'action

Pour toutes les sous-actions, et en particulier celles demandant assez peu de technicité nouvelle (ajustement de l'apport à l'objectif de rendement, retard d'une date d'apport...), l'augmentation du prix des engrais et/ou des mesures financières visant à réduire la dépendance de l'agriculture aux engrais azotés de synthèse pourraient accélérer la diffusion de l'action.

L'adoption de certaines techniques pourrait être facilitée par l'amélioration d'outils d'aide à la décision (OAD) pour la gestion de l'azote et leur utilisation plus généralisée.

• Les autres effets de l'action

Les sous-actions proposées conduisent à diminuer la contribution des engrais minéraux de synthèse à la nutrition azotée des cultures, et *de facto* à réduire potentiellement les excédents de fertilisation azotée. Elles s'inscrivent donc dans les politiques publiques menées dans le cadre du programme d'action national pour la protection des eaux contre la pollution par le nitrate d'origine agricole, fondé sur la directive "Nitrates". Certaines des sous-actions contribuent également à l'objectif de réduction de la pollution de l'air par volatilisation ammoniacale.

La réduction de consommation d'azote minéral présente enfin un intérêt en termes de balance commerciale, la France important 60% des engrais de synthèse qu'elle utilise, ainsi que la quasi-totalité des matières premières pour les 40% restant.

• Conclusions

Le potentiel de réduction de la fertilisation minérale sans affecter les rendements, est important, et la plupart des sous-actions sont de type "gagnant-gagnant" puisque la réduction de la fertilisation s'accompagne d'une baisse des coûts pour l'agriculteur. Cet effet

devrait s'amplifier avec la hausse des prix des intrants minéraux résultant de l'augmentation attendue du coût de l'énergie. Il existe donc une marge de progrès considérable sans affecter les rendements.

Le potentiel d'atténuation associé à une réduction de la fertilisation minérale des cultures est ici sous-estimé, puisque les calculs ne prennent pas en compte les légumineuses et les prairies (relevant des Actions 2 et 6), ni les cultures légumières, maraîchères et industrielles, ou les cultures pérennes (vignes et vergers). N'est également pas considéré le potentiel d'atténuation lié à une augmentation des surfaces en agriculture biologique (le nouveau plan de développement de l'AB vise le doublement des surfaces d'ici 2017) ; les superficies en grande culture concernées étant limitées (1,6% en 2011), leur extension aurait peu d'impact en terme d'atténuation potentielle des GES.

La gestion de la fertilisation azotée des grandes cultures est techniquement complexe car elle doit tenir compte de la diversité des conditions pédoclimatiques et des incertitudes liées au climat, au fonctionnement biologique des sols et des peuplements, à la disponibilité des formes d'azote. Ces incertitudes conduisent souvent à chercher à minimiser les risques de pertes de rendement en augmentant les doses d'azote. Les pratiques visant à diminuer les risques de pertes (notamment par volatilisation d'ammoniac) doivent donc à tout prix être favorisées. Cette analyse montre aussi que les approches favorables à l'atténuation des GES le sont également à la limitation de la contamination des eaux superficielles et souterraines par le nitrate. Ceci suppose que des techniques encore peu étudiées et/ou pratiquées (l'application localisée de l'engrais dans le sol ou l'utilisation d'inhibiteurs de nitrification par ex.) fassent l'objet d'études plus systématiques en France, pour pouvoir préparer l'accompagnement des agriculteurs. Il existe aussi une marge de progrès considérable sur la mise en œuvre d'outils de pilotage de la fertilisation azotée, encore peu utilisés, et qui montrent leur intérêt dans la réduction de la dose totale d'azote, dès lors que l'objectif de rendement n'est pas surestimé.



2

Accroître la part de légumineuses en grande culture et dans les prairies temporaires, pour réduire les émissions de N₂O

↳ N₂O

A. Accroître la surface en légumineuses à graines en grande culture

B. Augmenter et maintenir des légumineuses dans les prairies temporaires

I- Enjeu et principe de l'action

Les émissions de N₂O de l'agriculture provenant des engrais azotés peuvent être réduites par une fertilisation plus raisonnée et efficace (Action 1) mais aussi par l'introduction, dans les rotations culturales et les prairies, de légumineuses. Fixant l'azote de l'air, ces espèces n'ont en effet pas besoin d'apport d'engrais azotés ; l'azote qu'elles laissent dans le sol permet de plus de réduire la fertilisation de la culture suivante.

L'action vise à accroître la part des légumineuses à graines dans les grandes cultures et la proportion de légumineuses fourragères dans les prairies temporaires. L'introduction de légumineuses à graines en grande culture modifie fortement les successions culturales et donc l'assolement et les productions agricoles au niveau national ; la substitution d'espèces en prairie ne présente pas de tels effets.

II- Mécanismes et modalités techniques de l'action

• Effets des légumineuses sur les émissions de N₂O

Les émissions de N₂O du sol, qui résultent des processus de nitrification et dénitrification, apparaissent très liées aux apports d'azote sur les cultures. Elles sont donc estimées par l'application de "facteurs d'émission" (exprimés en %) à ces apports d'engrais.

Le principal effet attendu des légumineuses est une baisse des émissions de N₂O résultant de la réduction des besoins de fertilisation minérale. Mais leur bilan dépend aussi des effets de l'azote qu'elles fixent et restituent au sol, qui peut également constituer une source d'émissions de N₂O.

Ainsi, la fixation symbiotique a été considérée jusqu'à récemment comme émettrice de N₂O, au même titre que la fertilisation minérale (le même facteur d'émission était appliqué à l'azote fixé par la légumineuse ; Tableau 1). Les émissions de N₂O des cultures de légumineuses s'avèrent très variables, mais nettement inférieures en moyenne à celles mesurées dans les cultures fertilisées. Ces observations ont conduit le GIEC à réviser ses règles de calcul en 2006, et à préconiser de ne plus considérer la fixation symbiotique comme émettrice. Les règles de 2006 n'ont toutefois pas encore été appliquées dans l'inventaire national 2010.

Les émissions de N₂O liées à la décomposition des résidus de légumineuses sont difficilement chiffrables : très variables, elles dépendent notamment des modalités d'enfouissement des résidus et des conditions pédoclimatiques lors de la décomposition. Ces résidus, qui ont des teneurs en N élevées mais représentent des biomasses faibles, laissent des quantités d'azote dans le sol équivalentes à celles d'autres cultures. Le facteur d'émission des résidus étant identique entre espèces, les émissions estimées à partir des résidus ne sont pas plus élevées que pour les autres cultures, comme le montrent des données récentes.

Source d'azote	GIEC 1996	GIEC 2006
Engrais minéral	1,25%	1,00%
Fixation symbiotique	1,25%	0
Résidus des légumineuses et des autres cultures	1,25%	1,25%

Tableau 1. Emissions directes de N₂O : évolution des facteurs d'émission

Enfin, les cultures de légumineuses peuvent dans certaines conditions constituer des puits de N₂O. Des travaux français récents ont par exemple mis en évidence, dans le cas d'un soja, une consommation de N₂O équivalente à 75 gN₂O/ha durant le cycle cultural. Cet effet, observé en conditions contrôlées, n'est toutefois pas démontré ni *in situ* ni pour l'ensemble des légumineuses à graines cultivables en France (notamment le pois), et ne sera donc pas pris en compte dans cette étude.

• Autres effets des légumineuses

Les légumineuses à graines laissant peu de résidus au sol (ce qui facilite la préparation du sol), les cultures qui les suivent sont plus souvent implantées sans labour (cf. enquête "Pratiques Culturales" 2006) ; la réduction des émissions liées au travail du sol sera également prise en compte.

Le remplacement de prairies de graminées par des prairies de légumineuses (pures ou associées à une graminée) modifie la composition de l'alimentation des animaux et a des répercussions sur les émissions de méthane des ruminants ; ces effets ne seront pas chiffrés ici.

• Les sous-actions étudiées

En grande culture, l'objectif est d'introduire davantage de légumineuses à graines, en remplacement d'autres grandes cultures annuelles. Cette sous-action modifie donc les assolements et successions de cultures, ainsi que les itinéraires techniques mis en œuvre sur les productions suivant la culture de légumineuse.

En prairies, il s'agit d'accroître la proportion de légumineuses dans les prairies temporaires assolées (en remplacement partiel ou total des graminées) et, dans le cas de couverts mixtes, de maintenir la légumineuse pendant la durée de vie de la prairie en limitant la fertilisation azotée pour éviter que la graminée ne concurrence trop fortement la légumineuse.

III- Calculs du potentiel d'atténuation et du coût de l'action

• Modalités de calcul et systèmes retenus

L'introduction de légumineuses modifie les surfaces des autres grandes cultures, et par conséquent leurs émissions de GES. Les calculs ont donc été réalisés directement à l'échelle de la France (et non à celle de l'hectare supplémentaire de légumineuses), afin de pouvoir intégrer les effets de ces changements d'assolement. De ces valeurs nationales, sont ensuite déduites des valeurs par ha de légumineuse implanté.

Les **substitutions de cultures** intervenant lors de l'introduction de légumineuses à graines sont difficiles à anticiper. Plusieurs hypothèses ont été explorées (cf. section IV), dont la plus réaliste est retenue pour les estimations : l'introduction de légumineuses se fait pour les 2/3 au détriment de l'orge (moins rentable que le blé et le colza), pour 1/6 en remplacement de blé tendre et 1/6 en substitution de colza.

Les **réductions de fertilisation azotée** permises par l'implantation des légumineuses sont estimées avec les hypothèses suivantes : absence de fertilisation sur la légumineuse à graines et **réduction des engrais de 33 kgN/ha sur la culture suivante** ; réduction de la fertilisation de **35 kgN/ha sur les prairies** comportant moins de 20% de légumineuses et de 14 kgN/ha pour les prairies comprenant entre 20 et 40% de légumineuses.

Les données de superficies des différentes cultures et prairies sont celles de la Statistique agricole annuelle (SAA) 2010.

• Effets de l'action sur les GES et estimation de son potentiel d'atténuation unitaire

Pour toutes les émissions directes et indirectes, les calculs sont effectués avec les facteurs d'émission définis par le GIEC en 1996 et utilisés dans l'inventaire national des émissions de 2010 (méthode "CITEPA"), puis avec le nouveau paramétrage retenu par le GIEC en 2006 (méthode "expert").

Effet visé :

. **La diminution des émissions** (directes et indirectes) **de N₂O liées à la fertilisation minérale**. L'atténuation provient de la suppression des apports d'azote sur la légumineuse et de leur réduction sur la culture suivante.

Les émissions directes sont estimées en utilisant les facteurs d'émission du Tableau 1. Les émissions indirectes, provenant de la lixiviation de nitrate et de la volatilisation d'ammoniac à partir des fertilisants épandus, sont là encore estimées en utilisant les **facteurs d'émission définis par le GIEC en 1996, et revus (pour la lixiviation) en 2006**.

Autres effets comptabilisés :

. **Les émissions directes de N₂O liées à la légumineuse**, c'est-à-dire à la fixation symbiotique d'azote, et à la décomposition des résidus de la légumineuse pour la sous-action cultures. Les calculs utilisent les facteurs d'émission GIEC de 1996 et 2006 (Tableau 1), concernant la fixation symbiotique (considérée comme autant émettrice que la fertilisation puis comme non émettrice) et les résidus de culture (dont la prise en compte n'a pas évolué).

. **La diminution des émissions directes de CO₂** dues à la consommation de carburant sur l'exploitation. Les économies de gazole proviennent des modifications des successions culturales et

des itinéraires techniques : passages de tracteurs moins nombreux pour la fertilisation et la protection phytosanitaire (car le nombre varie selon l'espèce cultivée et son précédent), suppression possible du labour avant les cultures suivant les légumineuses. Les consommations de carburant sont estimées d'après les références techniques du barème d'entraide 2010 de la région Centre – Ile-de-France, et les émissions calculées avec les facteurs d'émissions du CITEPA.

. **Les émissions induites de CO₂** liées à la fabrication et au transport des intrants en amont de l'exploitation (fertilisants azotés minéraux, produits phytosanitaires et carburant). Les facteurs d'émission utilisés sont ceux de la base de données **Dia terre® - Ges'tim**.

• Estimation du coût unitaire pour l'agriculteur

Cultures :

Les coûts techniques pour l'agriculteur comprennent :

- les économies de fertilisation (épandage) et de protection phytosanitaire, ainsi que celles permises par la suppression du labour après la culture de la légumineuse ;
- les gains de marge brute réalisés sur la culture suivante. Ces gains, calculables à l'échelle de la France, ne sont pas indépendants des modifications d'assolement induites par l'introduction d'une plus grande surface de légumineuses à graines. De ce fait, le gain/coût économique lié à ces deux effets a été estimé globalement.

Prairies :

Les seuls "coûts" correspondent à la réduction de la fertilisation (économie de l'engrais et de son épandage) ; le rendement n'est pas affecté par la modification de la composition de la prairie.

• Estimation de l'impact à l'échelle nationale

Assiette maximale technique (AMT)

En **grande culture**, les surfaces sont limitées par :

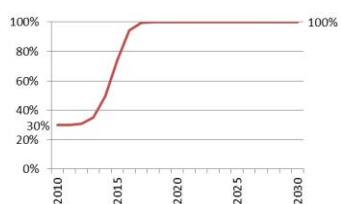
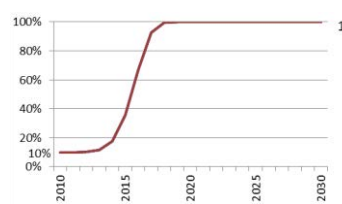
- l'évitement des sols caillouteux, où la récolte de certaines légumineuses, qui nécessite de raser le sol avec la barre de coupe, endommage la moissonneuse ;
- la non-implantation sur les sols à réserve hydrique inférieure à 80 mm, les légumineuses étant sensibles au stress hydrique ;
- un retour des légumineuses sur une même parcelle tous les 6 ans au maximum (afin de réduire le risque de développement d'*Aphanomyces euteiches*, maladie racinaire qui empêche définitivement de cultiver du pois sur une parcelle infestée).

En **prairies**, aucune restriction technique ne limite l'assiette.

Scénario de diffusion de l'action

En 2010, les superficies en légumineuses à graines et en prairies temporaires comportant plus de 40% de légumineuses représentent environ 16% de l'AMT.

En **grande culture**, l'hypothèse retenue est une diffusion rapide. En **prairies**, l'introduction des légumineuses est supposée plus lente à se mettre en place, du fait du délai de renouvellement de ces cultures pluriannuelles.

	Sous-actions	A. Légumineuses à graines en grande culture	B. Légumineuses dans les prairies
Contenu technique	Introduction de légumineuses	Introduction d'une légumineuse à graines se faisant au détriment du blé tendre (1/6 de la surface en légumineuses), de l'orge (2/3) et du colza (1/6) → nouvel assolement France	Augmentation et maintien de la part de légumineuses dans les prairies temporaires
	Diminution de la fertilisation	Suppression sur la légumineuse, réduction de 33 kgN/ha sur la culture suivante → économie d'engrais à l'échelle France : 155 640 tN.	Réduction de 35 kgN/ha sur les prairies ayant moins de 20% de légumineuses et de 14 kgN/ha sur les prairies ayant entre 20 et 40% de légumineuses (soit -29 kgN/ha en moyenne) → économie d'engrais à l'échelle France : 82 980 tN
Potentiel d'atténuation	Emissions* de N ₂ O (directes et indirectes) liées aux engrais minéraux	Total France : 1,5 / 0,97 MtCO ₂ e/an Par ha de légumineuse introduite : 1 706 / 1 100 kgCO ₂ e/an	Total France : 0,80 / 0,48 MtCO ₂ e/an Par ha de prairie (<40% de légumineuses) : 283 / 170 kgCO ₂ e/an
	Emissions* de N ₂ O (directes) liées à la légumineuse	Total France : -1,05 / -0,07 MtCO ₂ e/an Par ha de légumineuse introduite : -1 191 / -77 kgCO ₂ e/an	Total France : 0 / 0 MtCO ₂ e/an Par ha de prairie : 0 / 0 kgCO ₂ e/an
	Emissions* directes de CO ₂ (gazole)	Total France : 0,02 / 0,02 MtCO ₂ e/an Par ha de légumineuse introduite : 21 / 21 kgCO ₂ e/an	Total France : 0,004 / 0,004 MtCO ₂ e/an Par ha de prairie : 1,36 / 1,36 kgCO ₂ e/an
	Total émissions* directes + indir.	Total France : 0,47 / 0,92 MtCO ₂ e/an Par ha de légumineuse introduite : 636 / 1 044 kgCO ₂ e/an	Total France : 0,80 / 0,48 MtCO ₂ e/an Par ha de légumineuse introduite : 284 / 171 kgCO ₂ e/an
	Emissions induites (amont) de CO ₂	Total France : 0,83 MtCO ₂ e/an Par ha de légumineuse : 947 kgCO ₂ e/an	Total France : 0,44 MtCO ₂ e/an Par ha de prairie : 156 kgCO ₂ e/an
	Total MtCO ₂ e/an (France) kgCO ₂ e/ha/an	Total France : 1,30 / 1,75 Par ha de légumineuse : 1 583 / 1 991	Total France : 1,24 / 0,92 Par ha de prairie : 440 / 326
Coût	Economies d'intrants (France)	Economie épandage Suppression du labour sur 396 187 ha : -20,77 M€	Economie d'engrais + épandage : 88,9 M€
	Gains de marge brute sur suivante	Total France : 52,32 M€ Par ha de SCOP : 4,40 € Par ha de légumineuse introduite : 60 €	-
	Total €/an (France) €/ha/an	Total France : 16 991 900 Par ha de SCOP : 1,43 Par ha de légumineuse introduite : 19,36	Total France : -88 903 600 Par ha de prairie (<40% de légumineuses) : -31,50
Assiette	Assiette théorique	Toutes les grandes cultures : 12 515 200 ha	Toutes les prairies temporaires : 3 143 100 ha
	Critères techniques	Exclusion des sols à forte charge en cailloux et/ou à faible RU (< 80 mm) Fréquence de retour de la légumineuse limitée à 1 an sur 6 : soit 1/6 des surfaces chaque année	Aucune restriction technique
	Ass. maximale technique (AMT)	1 274 900 ha	3 143 100 ha
Scénario de diffusion	Etat de référence 2010	Surfaces en légumineuses à graines : 397 100 ha (soit 31,1 % de l'AMT)	Pr. temporaires ayant > 40% de légumineuses : 320 600 ha (dont 84 586 ha de luzerne pour la déshydratation) (soit 10,2% de l'AMT)
	Scénario de diffusion	AMT atteinte dès 2017 	AMT atteinte dès 2021 

* méthode "CITEPA" / méthode "expert"

Tableau 2

IV- Résultats et mise en perspective

• Les résultats

Cultures :

L'atténuation par ha de légumineuse implanté a été estimée à 636 kgCO₂e/ha/an (1 040 kgCO₂e/ha/an avec la méthode "expert") pour les émissions directes et indirectes liées à l'exploitation agricole, et 947 kg CO₂e/ha/an d'émissions induites en amont.

En appliquant cette atténuation sur l'assiette maximale technique, l'atténuation annuelle est de 0,5 MtCO₂e/an (0,9 MtCO₂e/an avec la méthode "expert") pour les émissions directes et indirectes liées à l'exploitation agricole et de 0,8 MtCO₂e/an pour les émissions induites en amont.

L'atténuation cumulée sur la période 2010-2030 est estimée à 7,6

	unités (M : millions)	Année 2030			Cumul sur la période 2010-2030	
		Cultures	Prairies	Total 2 sous-actions	Cultures	Prairies
Potentiel d'atténuation (méthode "CITEPA") Sans émissions induites		0,5 (0,2 à 0,8)	0,8 (0,7 à 1,7)	1,3 (0,9 à 2,4)	7,6 (2,7 à 12,5)	11,6 (10,2 à 24,0)
Potentiel d'atténuation (méthode "expert")	Sans émissions induites	0,9 (0,3 à 1,4)	0,5 (0,4 à 1,0)	1,4 (0,7 à 2,4)	14,7 (5,3 à 23,3)	7,0 (6,1 à 14,4)
	Avec émissions induites	1,7 (0,6 à 2,7)	0,9 (0,8 à 1,9)	2,7 (1,4 à 4,6)	28,2 (10,0 à 43,4)	13,3 (11,7 à 27,6)
Coût total pour les agriculteurs (sans coûts de transaction privés)	M€	17 (6 à 26)	-89 (-168 à -73)	-72 (-163 à -47)	274 (98 à 415)	-1289 (-2444 à -1150)
Coût de la tonne de CO₂e pour l'agriculteur (méthode "expert", sans émissions induites)	€/tCO ₂ e	19 (18 à 19)	-185 (-189 à -169)	-52	-	-

Tableau 3

MtCO₂e (méthode "CITEPA") et 14,7 MtCO₂e (méthode "expert") pour les émissions directes et indirectes liées à l'exploitation agricole, et à 13,4 MtCO₂e d'émissions induites en amont. Le coût de la tonne évitée est estimé à 19 €/tCO₂e.

Prairies :

L'atténuation unitaire a été estimée à 284 kgCO₂e/ha/an (171 kgCO₂e/ha/an avec méthode "expert") pour les émissions directes et indirectes liées à l'exploitation agricole et 156 kgCO₂e/ha/an d'émissions induites en amont.

En appliquant cette atténuation sur l'AMT, l'atténuation annuelle est de 0,8 MtCO₂e/an (0,5 MtCO₂e/an avec méthode "expert") pour les émissions directes et indirectes liées à l'exploitation agricole et 0,4 MtCO₂e/an d'émissions induites en amont.

L'atténuation cumulée sur la période 2010-2030 est estimée à 11,6 MtCO₂e (méthode "CITEPA") et 7,0 MtCO₂e (méthode "expert") pour les émissions directes et indirectes liées à l'exploitation agricole, et 6,4 MtCO₂e d'émissions induites.

Le coût de la tonne de CO₂e évitée est estimé à -185 €/tCO₂e et constitue donc un gain.

La comparaison avec les résultats d'autres études "atténuation de GES" réalisées dans le monde montre que les atténuations unitaires calculées ici se situent dans la gamme basse des estimations pour les prairies, et dans la gamme moyenne pour les légumineuses à graines. L'estimation d'accroissement des surfaces en légumineuses à graines (4,5% des terres arables) est faible par rapport au taux de présence des légumineuses dans certains pays (13% des terres arables au Canada, 32% aux Etats-Unis). De même, un fort accroissement des surfaces en prairies temporaires à base de légumineuses fourragères pourrait apparaître comme une option intéressante et efficace pour réduire les émissions de GES en France, mais elle sortait du cadre de l'étude car elle induirait des changements trop importants sur les systèmes agricoles.

• La sensibilité des résultats aux hypothèses

La sensibilité aux **règles de calcul**, notamment au facteur d'émission affecté à la fixation symbiotique, est très importante (variation quasiment du simple au double).

La sensibilité des résultats aux hypothèses retenues pour les **substitutions de cultures** a été testée : en fonction des hypothèses retenues (remplacement en différentes proportions du colza, de l'orge et du blé), les émissions sont également variables (de 0,82 à 0,91 MtCO₂e/an), et les coûts le sont encore plus (de -19 €/tCO₂e à 77 €/tCO₂e). Cependant, il est difficile de prévoir

quelles substitutions seraient effectivement réalisées, car elles dépendront des prix relatifs entre cultures et des conséquences liées à l'usage en alimentation animale, notamment pour l'orge.

Les hypothèses de calcul de l'assiette maximale technique et de l'atténuation unitaire pèsent également fortement sur les estimations finales. Les fourchettes basses et hautes ainsi estimées varient de 0,33 à 1,44 MtCO₂e/an (avec la méthode "expert"), avec des coûts au contraire très stables par ha de légumineuses introduites ou par tonne de CO₂e évité.

Pour les prairies, la sensibilité des estimations est principalement liée aux hypothèses de calcul de l'AMT et de réduction de la fertilisation azotée, faisant varier les émissions de 0,42 à 1,0 MtCO₂e/an, le gain de 31 à 60 € par ha de prairie concernée, et celui de la tonne de CO₂e évité de 169 à 189 €.

Les coûts estimés sont également sensibles aux variations des **prix** des intrants et des produits récoltés, les marges utilisées étant celles de l'année 2010.

• Les conditions d'une prise en compte de l'action dans l'inventaire national

Comptabilisation de l'effet

Jusqu'en 2006, les calculs d'émissions selon la méthode officielle du GIEC considéraient la fixation symbiotique comme une source potentielle d'émissions de N₂O au même titre que la fertilisation azotée appliquée sur les cultures. Les dernières recommandations du GIEC en 2006 ont entériné l'évolution des connaissances et préconisent de ne plus prendre en compte la fixation symbiotique d'azote dans le calcul des émissions de N₂O.

Vérifiabilité de la mise en œuvre

Concernant l'introduction de légumineuses à graines, la mise en œuvre des pratiques pourrait être estimée à l'aide de la statistique agricole annuelle et de l'enquête "Pratiques culturales" (surfaces, doses de fertilisants appliquées...), mais aussi à partir des déclarations d'aides (PAC) concernant les surfaces des cultures. En revanche, l'introduction de légumineuses en prairies est difficile à estimer, notamment pour les mélanges, et pourrait nécessiter des observations *in situ*.

• Les contextes et mesures susceptibles de favoriser le déploiement de l'action

Les surfaces en légumineuses à graines ont beaucoup varié : très faibles au début des années 1970, elles ont atteint un pic en 1993, dépassant 720 000 ha, puis ont rechuté, pour passer par un

minimum en 2009 où elles avoisinaient les 203 000 ha. Ces fluctuations apparaissent liées : en premier lieu aux évolutions relatives des prix des autres matières premières (blé et tourteau de soja) en concurrence avec les protéagineux pour la fabrication d'aliments du bétail, et aux rapports de prix entre les différentes grandes cultures ; depuis la PAC 1992, plus ponctuellement à des aides intermittentes à la culture ; dans une moindre mesure, à l'expansion d'*Aphanomyces* (favorisée par le non-respect des délais de retour de la culture sur une même parcelle et par des conditions hydriques de sol défavorables), et à la forte sensibilité de ces cultures aux stress abiotiques.

Cette importante variabilité de leurs rendements n'est, de plus, pas toujours clairement expliquée par les agriculteurs ou leurs conseillers, ce qui ne permet pas toujours de progresser dans la conduite de cette culture et décourage les producteurs. Il faudrait certainement envisager de mieux former les techniciens (de Chambres d'agriculture et de coopératives) qui connaissent souvent mal ces cultures, du fait de leur faible surface.

Au-delà de ces facteurs techniques et économiques, de nombreux autres facteurs, touchant l'ensemble des acteurs de la filière, convergent pour limiter l'intérêt des cultures de légumineuses à graines chez les agriculteurs, les organismes collecteurs, et l'ensemble de la filière. Une étude récente¹ a souligné l'importance de la question des débouchés, en alimentation animale notamment : les fabricants d'aliments du bétail sont prêts à utiliser le pois comme matière première à condition que les volumes d'offre soient très élevés et regroupés à proximité des usines de fabrication des aliments, ce qui n'est pas le cas aujourd'hui, avec une offre faible et dispersée géographiquement.

Les légumineuses à graines ont fait l'objet de soutiens publics en 2010, ce qui avait permis une petite augmentation de la surface (passée de 203 000 ha en 2009 à 397 000 ha en 2010, puis revenue à 278 000 ha en 2011). De même, une envolée des prix des engrais azotés de synthèse tend à être favorable aux légumineuses. Le caractère non prévisible et non pérenne de ces soutiens ou de ces effets n'est cependant pas favorable au maintien de cette culture. A noter qu'un Plan "Protéines végétales" a été annoncé début 2013.

L'augmentation de la proportion de légumineuses dans les **prairies temporaires** ne pose pas les mêmes difficultés. Elle requiert surtout un changement d'habitude (et de conseil probablement) de la part des agriculteurs. Gérer une prairie de graminées avec des intrants de synthèse est plus facile et moins risqué que gérer l'équilibre entre deux espèces au sein d'un même peuplement. La suppression des apports d'azote devrait pourtant générer un gain en temps de travail. Cependant, la composition plus variable du fourrage récolté nécessitera certainement un raisonnement plus fin des compléments alimentaires à fournir aux animaux. De telles pratiques existent déjà et pourraient être développées.

¹ Meynard et al., 2013. *Freins et leviers à la diversification des cultures. Etude au niveau des exploitations agricoles et des filières*. Synthèse du rapport d'étude, INRA.

• Vulnérabilité et adaptabilité de l'action au changement climatique

Les légumineuses à graines étant particulièrement sensibles aux stress abiotiques, le changement climatique pourrait induire une baisse de leur productivité et une augmentation de son instabilité, avec des répercussions négatives sur les surfaces cultivées, sur l'atténuation potentielle et sur les coûts estimés.

Inversement, le risque d'une raréfaction en eau pour l'irrigation pourrait conduire à une diminution des surfaces en cultures d'été, fortement consommatrices en eau, au profit de cultures plus sobres, dont les légumineuses.

• Les autres effets de l'action

L'insertion de légumineuses dans les rotations a, dans la plupart des régions françaises, des impacts environnementaux bénéfiques en termes d'utilisation de produits phytosanitaires à l'échelle de la succession de cultures, d'utilisation d'eau (en comparaison à d'autres cultures d'été), de consommation d'énergie fossile, et de biodiversité. L'introduction d'une nouvelle culture dans l'assolement est généralement favorable à un étalement des travaux, apprécié par les producteurs, et devrait donc constituer un facteur favorable au développement de ces cultures.

• Conclusions

Une spécificité de cette action est qu'il s'agit de modifier les rotations, c'est un changement significatif qui nécessite de faire des hypothèses fortes sur les substitutions de cultures, avec d'importantes répercussions possibles sur les systèmes de production, qui sont à la limite du cadre de cette étude. Pour les légumineuses à graines, il s'agirait de multiplier par 3 les surfaces par rapport à leur niveau de 2010 ; pour les légumineuses fourragères, de modifier les pratiques et la composition des prairies sur près de 90% des surfaces actuelles.

A partir des estimations réalisées, il apparaît que l'accroissement de la surface des légumineuses à graines en grande culture et l'augmentation de la part des légumineuses fourragères en prairies temporaires assolées constitue un levier important pour réduire les émissions de GES, avec un bénéfice économique (ou un coût relativement faible). Le potentiel d'atténuation calculé serait encore supérieur si un accroissement des surfaces en légumineuses fourragères était envisagé, ce qui n'a pas été fait dans le cadre de cette étude car cela supposait des adaptations conjointes des systèmes d'alimentation animale et donc des modifications importantes des systèmes de production. Les gains économiques sont obtenus essentiellement via une modification des pratiques de fertilisation azotée. Les gains économiques sont également liés à la prise en compte des effets "précédent" des légumineuses dans la conduite et l'estimation des performances des cultures suivantes, effets rarement comptabilisés dans les études économiques jusqu'à présent, et encore insuffisamment valorisés par les praticiens. Ces éléments laissent penser que les changements envisagés ne pourront se faire que grâce à des incitations politiques fortes et pérennes, et à une évolution notable à différents maillons de la filière.

**3**

Développer les techniques culturales sans labour pour stocker du carbone dans le sol

↘ CO₂

- A. Passer au semis direct continu
- B. Passer au labour occasionnel un an sur 5
- C. Passer à un travail superficiel du sol

I- Enjeu et principe de l'action

Le bilan de GES de l'agriculture peut être amélioré par une augmentation du stockage dans le sol de carbone sous forme de matière organique, c'est-à-dire provenant de CO₂ capté par des végétaux. Ce stockage peut être accru par des restitutions au sol plus importantes de matières organiques (cf. Action 4), mais aussi par des pratiques culturales qui retardent leur minéralisation et accroissent ainsi leur durée de stockage dans le sol. L'abandon du labour est réputé avoir cet effet. En supprimant une opération exigeant une force de traction élevée, il permet de plus une économie d'énergie fossile. Mais il est aussi susceptible d'accroître

les émissions de N₂O, qui dépendent des conditions physico-chimiques du sol.

Le labour étant défini par le fait qu'il réalise un retournement du sol, les "Techniques Culturales Sans Labour" (TCSL) englobent toutes les pratiques qui n'opèrent pas un tel retournement mais qui sont très diverses, d'un travail plus ou moins superficiel du sol au semis direct, et auront des impacts différents. Ces pratiques concernent principalement les terres en grande culture, qui seront les seules envisagées ici.

II- Mécanismes et modalités techniques de l'action

Parmi les TCSL, le semis direct (qui ne comporte qu'un travail du sol sur la ligne de semis, sur quelques cm de profondeur ; SD) est la technique qui a fait l'objet de la très grande majorité des travaux scientifiques à ce jour, mais elle est très peu pratiquée en France. Le travail superficiel (TS) et le labour occasionnel (LO), beaucoup plus répandus, sont en revanche très peu renseignés dans la bibliographie. Peu d'essais agronomiques sont consacrés à ces questions en France, qui ne possède qu'un seul dispositif mis en place depuis plus de 20 ans (celui d'Arvalis à Boigneville, dans l'Essonne).

• Les effets du non-labour sur le sol et ses émissions

Augmentation du stockage de carbone dans le sol

L'absence de labour augmenterait le stockage de C par une moindre minéralisation des matières organiques due notamment à leur meilleure protection physique dans les agrégats du sol (qui ne sont plus détruits par le labour, ni exposés à la pluie lorsque le sol est nu), et à des conditions plus froides et humides dans la couche de surface du sol.

Les données disponibles proviennent surtout de comparaisons entre semis direct et labour réalisées en Amérique du Nord, et certaines comportent des biais méthodologiques : le stockage additionnel de C a ainsi pu être surestimé par des mesures limitées aux horizons supérieurs du sol ou effectuées sur des durées trop limitées. Le semis direct conduit en effet à une stratification importante des matières organiques dans le sol : les horizons superficiels (0-20 cm) stockent du C alors que les horizons plus profonds en perdent. De plus, la cinétique de stockage n'est pas linéaire : elle est plus rapide les premières années et atteint un plateau après quelques décennies.

Les travaux récents et méthodologiquement fiables montrent des bilans nuls ou faiblement positifs, conduisant à revoir nettement à la baisse les évaluations du potentiel de stockage de C du semis direct. Les effets du labour occasionnel, peu étudiés, ont fait l'objet d'estimations par modélisation. Les travaux, peu nombreux, sur le travail superficiel du sol ne mettent pas en évidence de différence par rapport au labour.

Augmentation des émissions de N₂O du sol

L'absence de labour augmenterait les émissions de N₂O en favorisant la dénitrification de l'azote par une structure du sol plus compacte et une humidité souvent plus élevée, donc des conditions plus anoxiques.

Beaucoup des références disponibles sont fondées sur des mesures ponctuelles des émissions de N₂O, extrapolées sur l'année. L'estimation retenue ne s'appuie donc que sur les synthèses de travaux comportant des mesures en continu des émissions de N₂O, plus fiables et plus exactes. Le non-labour conduit à des émissions souvent plus importantes qu'en labour, mais faiblement, excepté pour les sols hydromorphes ; la variabilité des émissions est cependant très grande.

L'analyse bibliographique conduit à retenir les valeurs suivantes.

Stockage additionnel de C / au labour continu	
Semis direct	0,15 tC/ha/an (0 à 0,3)
Labour occasionnel 1 an / 2 1 an / 5	0,05 tC/ha/an 0,10 tC/ha/an
Travail superficiel	0
Emission additionnelle de N ₂ O / au labour continu	
Semis direct, sol non hydromorphe sol hydromorphe	0,15 kgN/ha/an (0 à 0,3) 2 kgN/ha/an
Travail superficiel	0

Tableau 1. Valeurs d'émission et de stockage de la littérature

Les informations disponibles ne font pas apparaître de variation du stockage de C ou des émissions de N₂O en fonction du climat ou de la culture.

Autres émissions du sol

Les émissions de CH₄ apparaissent négligeables par rapport à celles des autres GES (CO₂ et N₂O) ; elles sont de plus peu influencées par les modalités de travail du sol.

• Autres effets du non-labour

Plusieurs autres effets du non-labour sont susceptibles d'influer sur son bilan de GES et son coût pour l'agriculteur :

- les économies de carburant et de temps de travail qu'il permet (réduction du CO₂ émis et gain pour l'agriculteur) ;
- le recours accru aux herbicides, dû au fait que les adventices ne sont plus contrôlées par le labour (émissions et coûts associés à la fabrication puis à l'application du produit) ;
- les baisses de rendement observées avec l'abandon du labour (perte de revenu) ;
- la prévention de l'érosion, qui réduirait les pertes de matière organique. En fait, un déplacement de C par érosion ne se traduit

pas nécessairement par une émission additionnelle de CO₂ à l'échelle du bassin versant.

• Les trois options techniques étudiées

Ce sont le passage des parcelles antérieurement labourées :

- au semis direct continu (SD),
- au labour occasionnel un an sur 5 (LO1/5), alternant avec des années de semis direct,
- à un travail superficiel du sol sur une dizaine de centimètres de profondeur (TS).

Ces 3 options ne peuvent pas être cumulées, car il s'agit de solutions alternatives qui concernent les mêmes surfaces (exceptées des situations inappropriées au semis direct).

III- Calculs du potentiel d'atténuation et du coût de l'action

• Systèmes et modalités de calcul retenus

L'analyse des pratiques est fondée sur les résultats de la dernière enquête "Pratiques culturales" (PC) disponible, celle de 2006, et sur une étude pluri-organismes dédiée aux TCSL⁶. Les surfaces des cultures sont celles des SAA 2010.

La **situation de référence 2010** est estimée à partir des données "Pratiques culturales" 2006, "actualisées" en appliquant le taux de croissance du non-labour observé ces dernières années, qui serait de +2% des surfaces de cultures annuelles par an. Soit pour 2010 : 58% de surfaces en labour continu, 41% en labour un an sur deux (alternant avec un travail superficiel, modalité dite L-TS1/2) et 1% en semis direct.

Les calculs sont effectués pour les 3 options (SD, LO1/5 et TS) et pour L-TS1/2 (modalité de la situation 2010). Etant donné les incertitudes sur les variables, les estimations comportent une valeur moyenne mais aussi des valeurs basse et haute ("fourchette").

L'abandon du labour s'accompagne d'un recours accru aux herbicides, avec +0,3 passage par an, toutes cultures confondues, selon l'enquête "Pratiques culturales" 2006.

• Estimation du potentiel d'atténuation unitaire

Effet visé :

. **Le stockage additionnel de C dans le sol.** Il n'est pas pris en compte par la méthode de calcul du CITEPA pour les émissions de 2010 (méthode "CITEPA"), et donc non comptabilisé dans l'inventaire national actuellement. Une méthode de calcul "expert" est proposée ici, fondée sur la littérature scientifique utilisant les valeurs du Tableau 1.

Autres effets comptabilisés :

. **La réduction des émissions directes de CO₂** associée à l'économie de carburant. Cette économie est calculée en utilisant des données sur la consommation de gazole (qui fournissent des valeurs pour les différentes opérations culturales).

. **L'augmentation des émissions de N₂O.** Elle est estimée par la valeur retenue pour les sols non hydromorphes (Tableau 1),

puisque les sols hydromorphes seront exclus de l'application de l'action.

. **Les émissions induites** (intervenant à l'amont de l'exploitation) associées à la fabrication et au transport des intrants. La variation de ces émissions, due à la moindre consommation de carburant d'une part, et à l'utilisation supplémentaire d'herbicides d'autre part, est comptabilisée.

• Estimation du coût unitaire pour l'agriculteur

Ce coût technique (calculé avec les prix 2010) tient compte de :

- l'économie de carburant (qui passe, pour une rotation blé-maïs, de 94 litres en labour à 54 l en SD) et de temps de travail liée à la suppression du labour ;
- l'éventuelle baisse des rendements, qui est dans une hypothèse de coûts élevés considérée de -1% TS, et de -5,2% en SD. Dans l'hypothèse de coûts faibles, cette baisse de rendement est nulle ;
- l'augmentation de la consommation d'herbicides (achat du produit et coût de son application).

En rythme de croisière, la valeur du parc de matériel ne diffère pas entre les exploitations en labour et celles en semis direct. Le passage au semis direct requiert toutefois l'utilisation d'un semoir spécifique : son achat peut être comptabilisé dans les coûts d'adoption du SD (investissement supplémentaire) ou considéré comme relevant du renouvellement normal du matériel.

• Estimation de l'impact à l'échelle nationale

Assiette maximale technique (AMT)

L'AMT est estimée en retranchant de la superficie totale des cultures assolées, les surfaces des productions non adaptées au non-labour (cultures sarclées ; monocultures dont le désherbage est plus difficile) et les sols où le non-labour est peu approprié et induit des émissions de N₂O réductrices (sols hydromorphes).

Scénario de diffusion de l'action

Compte tenu du développement important des TCSL en France depuis une dizaine d'années, l'hypothèse retenue pour chacune des options est une adoption sur la totalité de son AMT d'ici 2030.

⁶ Labreuche J., Le Souder C., Castillon P., Ouvry J.F., Real B., Germon J.C., de Tourdonnet S., 2007. Evaluation des impacts environnementaux des Techniques Culturales Sans Labour (TCSL) en France. Rapport de contrat ADEME, 400 p.

	Options techniques	A. Passage au semis direct continu (SD)	B. Passage au labour 1 an sur 5 (LO1/5)	C. Passage au travail superficiel (TS)	
Modalités techniques	Situation initiale	Référence pour 2010 : 58% en labour continu (L), 41% en labour 1 an sur 2 (L-TS1/2), 1% de semis direct (SD)			
	Changement de pratique de travail du sol	Passage de L ou L-TS1/2 à un semis direct (SD) tous les ans	Passage de L ou L-TS1/2 à un semis direct avec un labour tous les 5 ans (LO 1/5)	Passage de L ou L-TS1/2 à un travail superficiel du sol (TS) sur une dizaine de centimètres de profondeur	
Potentiel d'atténuation unitaire	Stockage de C	Non pris en compte avec la méthode "CITEPA". Méthode "expert" : ▲ Fortes incertitudes/variabilité sur le stockage additionnel L → SD : 550 kgCO ₂ e/ha/an (0 à 1 100) = 65% du stockage en SD		Pas de stockage additionnel	
	Emissions de N ₂ O (directes)	Augmentation des émissions des sols en SD, avec fortes incertitudes L → SD : -70 kgCO ₂ e/ha/an (-140 à 0) = 4/5 des émissions en SD		0	
	Emissions directes de CO ₂ (gazole)	Economie de carburant (x facteur d'émission du gazole) L → SD : 110 kgCO ₂ e/ha/an (104 à 112) = 4/5 des émissions en SD			L → TS : 75 kgCO ₂ e/ha/an (46 à 104)
	Total émissions directes + indir. kgCO ₂ e/ha/an	L → SD : 590 (-36 à 1212)		L → LO1/5 : 389 (-29 à 805)	
	Emissions induites (amont) de CO ₂	L → SD : Réduction des émissions : ↗ herbicides : -10 kgCO ₂ e/ha/an (-20 à 0), ↘ carburant : 23 kgCO ₂ e/ha/an (22 à 24)	L → LO1/5 : = 4/5 des émissions en SD		L → TS : Réduction des émissions : ↗ herbicides : -4 kgCO ₂ e/ha/an (-8 à 0), ↘ carburant : 16 kgCO ₂ e/ha/an (10 à 22)
	Total kgCO ₂ e/ha/an	L → SD : 603 (-34 à 1236) L-TS1/2 → SD : 559 (-23 à 1173)		L → LO1/5 : 400 (-27 à 824) L-TS1/2 → LO1/5 : 356 (-16 à 761)	
		L → TS : 87 (-23 à 126) L-TS1/2 → TS : 43 (-12 à 63)			
Coût unitaire pour l'agriculteur	Gains supplémentaires	. Economie de carburant et de travail	4 années sur 5 : . Economie de carburant et de travail	. Economie de carburant	
	Coûts supplémentaires	. Baisses de rendement : 2,6% (0 à 5,2%) . Herbicide supplémentaire + éventuellement achat de matériel	4 années sur 5 : . Baisses de rendement . Herbicide supplémentaire	. Baisse de rendement : 0,5% (0-1%) . Herbicide supplémentaire	
		▲ Calcul très sensible aux hypothèses de baisse de rendement associé à SD			
	Total €/ha/an	L → SD : 6 L-TS1/2 → SD : 7 Coût moyen : 7	L → LO1/5 : 3 L-TS1/2 → LO1/5 : 4 Coût moyen : 3	L → TS : -2 L-TS1/2 → TS : 2 Coût moyen : 0	
Assiette	Assiette théorique	Toutes les surfaces en grande culture (14,8 millions d'ha)			
	Contraintes techniques	Exclusion : de 100% des surfaces cultivées en pommes de terre et betteraves et de 50% des surfaces en maïs (monoculture) ; des sols hydromorphes		Exclusion des sols très hydromorphes	
	Assiette Max. Technique (AMT)	10,1 millions d'ha		13,8 millions d'ha	
Scénario de diffusion	Etat de référence 2010	58% en LC, 41% en L-TS1/2, 1% en SD			
	Scénario de diffusion	Hypothèses : les AMT sont atteintes en 2030			
				<p>Les cinétiques sont les mêmes quels que soient l'état initial et l'option technique visée ; seule change l'assiette atteinte.</p>	

Tableau 2

IV- Résultats et mise en perspective

	unité (M : millions)	Année 2030			Cumul sur la période 2010-2030		
		Scénario SD	Scénario LO1/5	Scénario TS	Scénario SD	Scénario LO1/5	Scénario TS
Potentiel d'atténuation (méthode "CITEPA")		1,0 (a)	0,7 (a)	0,8 (a)	11,6 (a)	8,4 (a)	9,4 (a)
Potentiel d'atténuation (méthode "expert")	Sans émissions induites	5,7 (-0,3 à 11,8)	3,7 (-0,2 à 7,7)	1 (-0,2 à 1,1)	65,7 (-3,5 à 136,3)	42,7 (-2,7 à 89,6)	11,2 (-2,8 à 13)
	Avec émissions induites	5,8 (-0,3 à 11,9)	3,8 (-0,2 à 7,9)	0,9 (-0,2 à 1,4)	66,9 (-3,4 à 138,4)	43,7 (-2,6 à 91,3)	10,8 (-2,9 à 15,8)
Coût total pour les agriculteurs	M€	68	30	-3	781	347	-32
Coût de la tonne de CO₂e pour l'agriculteur (méthode "expert", hors émissions induites)	€/tCO ₂ e	12 (6 à 233)	8 (4 à 135)	-3 (-2 à 11)	-	-	-

(a) prise en compte uniquement du carburant

Tableau 3

• Les résultats

La contribution de la réduction d'utilisation de carburant à l'atténuation s'avère très importante : elle représente de 21 à 30% de l'atténuation unitaire en semis direct et labour occasionnel (estimation moyenne) et près de 100% en travail superficiel.

En termes de potentiel d'atténuation, les scénarios ont une efficacité décroissante : passage au semis direct continu (SD) > passage au labour occasionnel un an sur 5 (LO1/5) > passage au travail superficiel (TS), malgré les très fortes incertitudes. Les trois scénarios peuvent être développés sur une assiette de surfaces très importante : de 10,8 à 13,8 millions d'hectares. Le stockage additionnel de C est incertain, et le potentiel serait atteint en quelques dizaines d'années. Au plan agronomique (évolution des rendements et du recours aux pesticides, sols compatibles), les inconvénients décroissent dans le même sens : SD > LO1/5 > TS. Au plan économique, les deux premiers scénarios ont un coût, alors que le troisième, TS, présente un coût négatif. Même pour les scénarios "coûteux", le coût de la tonne de CO₂e pour l'agriculteur reste au maximum de 121 € pour une atténuation moyenne.

Comparaisons avec les résultats d'autres études. L'effet du non labour sur l'ensemble des émissions de GES dans le contexte de l'agriculture française n'avait pas été réalisé auparavant. L'expertise collective INRA 2002⁷ avait estimé des potentiels de stockage de C dans le sol un peu supérieurs à ceux calculés ici. Les valeurs de potentiel d'atténuation unitaire sont néanmoins très proches de celles estimées pour l'Irlande et dans une synthèse internationale pour les climats froids et humides.

• La sensibilité des résultats aux hypothèses

Les résultats sont très sensibles aux incertitudes sur l'ampleur des phénomènes et aux hypothèses retenues, à la fois pour les émissions et les coûts de l'action (cf. "fourchettes"). En termes d'effet des pratiques, la modalité "semis direct" est assez bien renseignée dans la littérature et par des essais de longue durée, mais pas celles de travail occasionnel, ni celle de travail superficiel.

Concernant le **potentiel d'atténuation**, les écarts entre les valeurs haute et basse des estimations de potentiels d'atténuation unitaires proviennent en premier lieu du poste stockage de C (écart de ±550 tCO₂e /ha/an), puis des émissions de N₂O (écart de ±70 tCO₂e

/ha/an) et de l'économie de carburant (±61 tCO₂e /ha/an). Cependant une grande incertitude scientifique concerne l'estimation des émissions de N₂O étant donné leur grande variabilité spatiale et temporelle et le fort pouvoir de réchauffement de ce gaz. Contrairement aux autres actions, celle-ci présente une fourchette d'atténuation incluant des valeurs négatives.

Pour ce qui est de l'**évaluation économique**, la variabilité est également très importante, selon que l'on prend des estimations "pessimistes" ou "optimistes" des coûts, et en particulier concernant les baisses de rendement associées à l'abandon du labour.

• Les conditions d'une prise en compte de l'action dans l'inventaire national

Comptabilisation de l'effet

L'inventaire CITEPA réalisé sur la base GIEC 1996 ne comptabilise pas les stockages additionnels de carbone liés aux modalités de travail du sol. La méthode tier 1 des lignes directrices GIEC de 2006 permet de tenir compte des effets sur les stocks de C du sol, mais présente des limites (cinétique linéaire, valeurs de référence plus élevées que celles de la littérature internationale pour le travail superficiel) ; et elle n'intègre pas les émissions de N₂O. La méthode de calcul présentée dans cette fiche, proposant des coefficients de stockage de C et des facteurs d'émissions de N₂O spécifiques aux conditions agronomiques et pédoclimatiques françaises pourrait servir de base à une méthodologie de calcul "expert" des impacts du travail du sol sur les émissions de GES.

Vérifiabilité de la mise en œuvre

L'expertise collective INRA 2002 avait souligné les difficultés de vérification de stockages additionnels de C en général (variabilité du phénomène...), et de ceux associés à des modifications des pratiques culturales en particulier (difficiles à prouver et vérifier). Bien que difficile, la vérification de l'adoption du non-labour est envisageable.

• Les contextes et mesures susceptibles de favoriser le déploiement de l'action

Si l'effet d'une réduction du labour est, dans certaines hypothèses, plutôt profitable aux agriculteurs, on peut s'interroger sur les raisons de sa non-adoption. La difficulté à contrôler les adventices pourrait en être une des explications. Il existe aussi sans doute des coûts inobservables qu'il est difficile de chiffrer - le coût du semoir

⁷ Arrouays et al., 2002. Contribution à la lutte contre l'effet de serre. Stocker du carbone dans les sols agricoles de France ? Expertise scientifique collective, INRA

a été introduit pour prendre en compte une partie de ces coûts dans l'un des scénarios.

Une mesure incitative simple serait la suppression de la défiscalisation du gazole agricole et son remplacement par une aide uniforme par hectare. Si on chiffre les coûts au prix du carburant fiscalisé, ces coûts deviennent négatifs dans les trois options, mais les agriculteurs subissent une baisse de recette, de 40 € par hectare en labour et de 23 € en semis direct. Une subvention compensatrice uniforme à l'hectare, de l'ordre de 30 €, favoriserait les modes de travail du sol économes en énergie.

Le non-labour est déjà adopté spontanément par les agriculteurs (sur 21% des surfaces de cultures annuelles en 2001, 34% en 2006), pour les économies de carburant et de temps de travail qu'il permet : il s'agit d'un passage à du travail superficiel, avec souvent un recours périodique au labour, dont l'adoption est proportionnelle à la taille de l'exploitation. Le semis direct (privilegié dans cette action) n'est en revanche que marginalement adopté (1% des surfaces de culture annuelle en 2006).

Le non-labour est promu comme moyen de prévention de l'érosion (agriculture "de conservation"), avec des effets favorables sur la faune du sol. Il jouit donc d'une image "verte" même si son adoption obéit à des motivations très diverses et qu'il peut nécessiter une augmentation de la quantité d'herbicides utilisée.

• Les autres effets de l'action

Effets positifs :

- Amélioration de la stabilité structurale, diminution du ruissellement et prévention de l'érosion ;

- Amélioration de la biodiversité et de l'activité biologique dans les sols ;
- Effets des économies de carburant et de temps de travail sur la rentabilité des exploitations.

Effets négatifs :

- Tendance au recours accru aux herbicides pour réduire les populations d'adventices et impacts potentiels sur la qualité de l'eau et des cultures ;
- Effets sur la production nationale du fait des baisses (limitées) de rendement.

• Conclusions

Les techniques culturales sans labour ont un potentiel d'atténuation des émissions de GES qui est avéré et confirmé par cette analyse. Ce potentiel d'atténuation provient des deux principaux volets que sont le stockage de C dans le sol et l'économie de carburant ; il peut toutefois être fortement réduit par les émissions potentielles de N₂O. Les estimations de potentiel d'atténuation sont entachées d'une incertitude très importante, et recouvrent aussi des situations où la mise en place de techniques culturales simplifiées augmente les émissions totales de GES (via celles de N₂O).

C'est l'option LO1/5, "intermédiaire" en termes de potentiel d'atténuation mais aussi de contraintes, qui est retenue pour l'analyse comparée des 10 actions.



4

Introduire davantage de cultures intermédiaires, cultures intercalaires et 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

I- Enjeu et principe de l'action

Le bilan de GES de l'agriculture peut être amélioré par une augmentation du stockage de carbone dans les sols suite à la restitution de quantités plus importantes de matières organiques au sol. L'implantation de cultures intermédiaires sur les terres en grande culture ou de couverts herbacés dans les vergers, les vignobles ou en bordure de cours d'eau, est l'une des voies possibles.

Trois pratiques sont analysées ; elles correspondent à l'implantation :

- de cultures intermédiaires semées entre deux cultures de vente pour les systèmes de grande culture (couverts temporaires de 3 à 6 mois selon la durée de l'interculture) ;

- de cultures intercalaires dans les vergers et vignobles (couverts herbacés temporaires ou pérennes entre les rangs d'arbres ou de ceps) ;

- de bandes enherbées en bordure de cours d'eau ou en périphérie de parcelles cultivées (couverts pérennes).

Ces pratiques sont déjà utilisées, notamment en application de la réglementation "Directive Nitrates" (CIPAN) ou de la conditionnalité de la PAC (bandes enherbées), ou bien en raison de leurs effets agricoles bénéfiques (portance du sol améliorée par l'enherbement dans les vergers et vignobles, par ex.). L'action envisage leur extension ou leur généralisation.

II- Mécanismes et modalités techniques de l'action

Le principal effet visé est le stockage additionnel de carbone dans le sol permis par les apports supplémentaires de matières organiques végétales. Les couverts sont en outre susceptibles de réduire les émissions de N₂O par immobilisation d'azote du sol. Enfin, les modifications de la fertilisation azotée et des pratiques culturales liées à leur implantation ont un impact sur d'autres émissions de GES (CO₂).

Les références scientifiques sur les effets des cultures intermédiaires et intercalaires, et des bandes enherbées sur les émissions de GES sont peu nombreuses. L'examen des cultures intermédiaires bénéficie toutefois des analyses bibliographiques réalisées dans le cadre de l'expertise INRA 2002⁸ consacrée au stockage de carbone dans les sols, et de l'étude INRA 2012⁹ sur la gestion des intercultures.

• Les effets sur le stockage de carbone dans le sol

Le stockage additionnel de C dans le sol provient des résidus des cultures intermédiaires enfouis par un labour, ou bien des résidus aériens et racinaires des couverts herbacés pérennes (cultures intercalaires et bandes enherbées).

Pour les **cultures intermédiaires**, la biomasse produite dépend de l'espèce implantée, de la durée de croissance et des conditions climatiques au cours du développement ; le stockage de C est fonction de la composition (par ex. rapport C/N) des résidus de culture. La valeur retenue est issue de l'étude INRA 2012. Ce stockage est négligé pour les repousses des cultures précédentes car leur croissance est très aléatoire.

Les effets des **cultures intercalaires** dans les vergers et les vignes étant peu renseignés dans la littérature, le stockage additionnel de C est estimé en référence à d'autres situations : la valeur du stockage d'un couvert prairial (valeur issue de l'expertise INRA 2002) a été retenue pour un enherbement pérenne, celle d'une culture intermédiaire (valeur issue de l'étude INRA 2012) pour un couvert temporaire hivernal. Sur ces bases, le stockage est calculé en tenant compte du type d'enherbement pratiqué : soit couverture totale, soit 2/3 de la surface pour un enherbement de tous les inter-rangs.

Les **bandes enherbées** sont assimilées à des prairies ; un stockage additionnel (valeur issue de l'expertise INRA 2002) n'intervient que si elles succèdent à une culture annuelle.

Les calculs sont conduits avec deux valeurs, basse et haute, obtenues à partir de la moyenne, à laquelle la valeur de l'écart-type est soustraite ou ajoutée (Tableau 1). Le stockage dans le sol ne se produit pas à vitesse constante et est limité dans le temps. Néanmoins, il est supposé constant sur la période considérée (2010-2030), et le maximum est atteint en 2030.

Stockage additionnel de C dans les sols (tCO _{2e} /ha/an)	
Cultures intermédiaires semées	0,874 ± 0,393
Repousses de la culture précédente	0
Cultures intercalaires :	
couvert permanent, 100% surface	1,798 ± 0,954
couvert permanent, tous les inter-rangs	1,187 ± 0,630
couvert temporaire hivernal	0,584
Bande enherbée remplaçant - une culture	1,798 ± 0,954
- une prairie	0

Tableau 1. Valeurs de stockage issues de la littérature

⁸ Arrouays et al., 2002. Contribution à la lutte contre l'effet de serre. Stocker du carbone dans les sols agricoles de France ? Expertise scientifique collective, INRA

⁹ Justes et al., 2012. Réduire les fuites de nitrate au moyen de cultures intermédiaires. Conséquences sur les bilans d'eau et d'azote, autres services écosystémiques. Synthèse du rapport d'étude, INRA, 60 p.

• Les effets sur les émissions de N₂O du sol

Les émissions de N₂O "directes" à partir des sols de la parcelle sont distinguées des émissions "indirectes" (la lixiviation du nitrate

et la volatilisation de l'ammoniac) à partir des espaces proches de l'exploitation. Ces émissions, directes et indirectes, très variables dans l'espace et le temps, dépendent des apports de fertilisants azotés et de nombreux facteurs environnementaux (nature des sols, conditions climatiques...). Les couverts étudiés peuvent potentiellement modifier les émissions de N₂O par leurs effets propres et par les évolutions des pratiques de fertilisation liées à leur implantation.

Les **cultures intermédiaires** (CI) sont susceptibles de réduire les émissions de N₂O par absorption du nitrate et de l'ammonium présents dans les sols. La synthèse bibliographique de l'étude INRA 2012 conclut cependant à une émission augmentée de 0,1 kgN/ha/an ($\pm 1,12$ kgN/ha/an) dans l'année qui suit la CI, selon les sites. Ce résultat très variable et l'absence de références sur les CI légumineuses conduisent à négliger ces émissions dans les estimations réalisées.

Pour l'**enherbement des vergers et des vignes**, les données disponibles sont peu nombreuses, acquises dans des conditions pédoclimatiques différentes de celles qui prévalent en France et les résultats sont variables. L'effet de cet enherbement sur la réduction des émissions de N₂O ne sera pas pris en compte.

Les **bandes enherbées** n'ont pas fait l'objet d'études spécifiques sur ce sujet.

En revanche, les impacts de l'évolution des **pratiques de fertilisation azotée** sont comptabilisés. Grâce à l'effet "piège à nitrate" de la CI, la fertilisation minérale peut être réduite sur la culture de printemps suivante ; cette réduction est plus importante après une CI de légumineuse, dont les résidus sont plus riches en azote. L'enherbement des vignes conduit à augmenter les apports d'engrais pour compenser les prélèvements d'azote du couvert. La fertilisation est interdite sur les bandes enherbées le long des cours d'eau.

III- Calculs du potentiel d'atténuation et du coût de l'action

• Systèmes et modalités de calcul retenus

Les situations retenues pour les calculs et les sources de données mobilisées sont les suivantes.

A. Cultures intermédiaires :

A1. Privilégier l'implantation de CI composées de légumineuses, sur 15% des surfaces de CI (pour éviter un retour trop fréquent sur la même parcelle, générant des risques phytosanitaires). La réduction de la fertilisation sur la culture suivante, pour une CI produisant en moyenne 2 tMS/ha, est évaluée à 5 kgN/ha après une CI de graminée ou de phacélie, 10 kgN/ha après une crucifère et 20 kgN/ha après une CI composée de légumineuses.

A2. Développer l'implantation de nouvelles CI en ZNV. Les réductions de fertilisation azotée sur la culture suivante sont les mêmes que dans l'option A1. Les évolutions des pratiques culturales seront prises en compte, telle la destruction de la CI par un labour sur 80% des surfaces ou par un herbicide sur 20%.

A3. Favoriser le développement des repousses. Du fait de leur croissance aléatoire, aucune modification de la fertilisation azotée de la culture suivante n'est envisagée. Seules les évolutions des pratiques liées à leur destruction seront comptabilisées.

B. Cultures intercalaires :

B1. Généraliser l'enherbement permanent de toute la surface des vergers. Seul le stockage de C dans les sols sera comptabilisé.

B2. Etendre l'enherbement permanent sur tous les inter-rangs à tous les vignobles situés en zones d'alimentation hydrique non limitante. Les calculs portent sur le stockage de C et les évolutions

• Les autres effets de l'action sur les GES

L'implantation des couverts conduit à des modifications des pratiques culturales susceptibles d'influer sur d'autres émissions de GES :

- la réalisation d'opérations culturales supplémentaires (semis, entretien des couverts herbacés, destruction des CI), ou au contraire d'interventions moins nombreuses que pour une culture influe sur la consommation de gazole, soit sur les émissions directes de CO₂ ;

- les modifications de la fertilisation azotée minérale, de la consommation de carburant et de la protection phytosanitaire ont un impact sur les émissions "induites" liées à la fabrication et au transport de ces intrants.

• Les sous-actions étudiées

A. Cultures intermédiaires. Trois leviers techniques sont analysés : (A1) pour l'ensemble des CI existantes, réduire systématiquement la fertilisation azotée sur la culture suivante et privilégier l'implantation de CI légumineuses ; (A2) dans les zones "non vulnérables" (ZNV) de la "Directive Nitrate", planter des CI en interculture longue (5 à 8 mois) et réduire la fertilisation azotée sur la culture suivante ; (A3) favoriser, en ZNV, les repousses de la culture précédente (colza, céréale à paille...).

B. Cultures intercalaires. Trois leviers sont proposés : (B1) enherbement permanent de toute la surface pour tous les vergers ; (B2) enherbement permanent de tous les inter-rangs pour certains vignobles ; (B3) enherbement temporaire hivernal pour d'autres vignobles.

C. Bandes enherbées. Seule l'implantation d'une bande enherbée de quelques mètres de large le long des cours d'eau, en remplacement d'une culture annuelle ou d'une prairie, a été étudiée.

des pratiques culturales, variables selon la situation initiale (sol nu, couvert temporaire ou couvert herbacé un inter-rang sur deux).

B3. Développer l'enherbement temporaire dans les vignobles où l'alimentation hydrique est limitante (Languedoc-Roussillon et région PACA). Le stockage de C et les modifications des pratiques culturales sont quantifiés.

C. Bandes enherbées :

Le long des cours d'eau, les bandes enherbées remplacent soit une culture (sur 40% des surfaces), soit une prairie (sur 60%). La réduction de la fertilisation est évaluée en moyenne à 85 kgN/ha/an (les quantités moyennes de fertilisants azotés d'une culture et d'une prairie en France étant estimées à 138 kgN/ha/an et 50 kgN/ha/an respectivement).

Les données de surfaces sont issues de la Statistique agricole annuelle (SAA) 2010.

• Effets de l'action sur les GES et estimation de son potentiel d'atténuation unitaire

Les calculs sont effectués avec la méthode définie par le GIEC en 1996 (utilisée par le CITEPA pour les émissions de 2010), puis avec celle retenue par le GIEC en 2006 (révision des valeurs de certains facteurs d'émission, et prise en compte du stockage de C dans les sols, valeur basse et valeur haute). Les résultats présentés dans le Tableau 2 correspondent à cette seconde évaluation (calcul "expert").

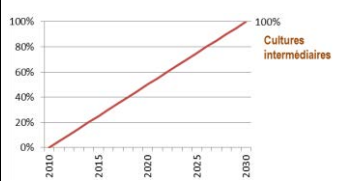
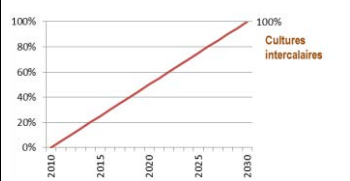
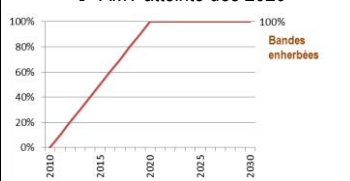
	Sous-actions	A. Cultures intermédiaires	B. Cultures intercalaires	C. Bandes enherbées
Contenu technique	Situation initiale	CI imposées sur zone vulnérable (ZV) "Nitrate", pour les intercultures longues	92% des vergers déjà enherbés Enherbement variable selon les régions viticoles	Bordures de cours d'eau déjà enherbées : surfaces non quantifiées
	Implantations de couverts	A1 : réduire la fertilisation azotée de la culture suivant la CI, proposer des CI composées de légumineuses sur 15% des surfaces (toutes zones confondues) A2 : proposer CI en zone non vulnérable (ZNV) pour les intercultures longues A3 : favoriser les repousses de la culture précédente en ZNV	Proposer un enherbement : B1 : permanent, sur 100% des surfaces en verger B2 : permanent, un inter-rang sur deux, dans certains vignobles B3 : temporaire hivernal dans certains vignobles	Planter des bandes enherbées le long des cours d'eau, remplaçant une culture (40% des surfaces) ou une prairie (60%)
Potentiel d'atténuation unitaire	Stockage additionnel de C kgCO ₂ e/ha/an	A1 : 0 car CI déjà obligatoire en ZV A2 : 480 à 1 265 A3 : 0	B1 : 1 798 ± 954 B2 : 1 187 ± 630 (selon situation initiale) B3 : 584	Après culture : 1 798 ± 954 Après prairie : 0
	Emissions de N ₂ O (directes + indirectes)	↘ de fertilisation sur la culture suivant la CI, variable selon espèce de CI ↘ de 11 kgN/ha/an : 60	B1 : non estimée B2 : ↗ due à +30 kgN/ha/an : - 170 B3 : 0 car aucune fertilisation supplém.	↘ due à non-fertilisation (-85 kgN/ha/an) : 488
	Emissions directes de CO ₂ (gazole) kgCO ₂ e/ha/an	A1 : 0 car déjà en CI ↗ travaux agricoles (↗ consommation de gazole) : A2 : - 62 A3 : - 50	B1 : non estimée B2 : variables selon la situation initiale B3 : ↘ travaux agricoles (↘ consommation de gazole) : 20	↘ des travaux agricoles non quantifiables (économie de gazole)
	Total émissions directes + indir. kgCO ₂ e/ha/an	A1 : 61 A2 : 479 à 1 264 A3 : -45	B1 = 844 à 2 753 B2 = 1 078 B3 = 587	822 à 1 578
	Emissions induites (amont) de CO ₂ et N ₂ O kgCO ₂ e/ha/an	A1 : 56 A2 : 40 A3 : -10	B1 : non estimée B2 : variables selon la situation initiale B3 : ↘ travaux agricoles (↘ consommation de gazole et herbicides) : 20	Fertilisation : 450 Une partie non quantifiée (↘ des travaux agricoles)
	Total kgCO ₂ e/ha/an	A1 : 118 A2 : 520 à 1 305 A3 : -58	B1 : 844 à 2 753 B2 : 46 à 999 B3 : 610	1 270 à 2 029
Coût unitaire	Economie/achat d'intrants Travaux pour les couverts	Economie d'engrais A1 : aucun, car CI déjà obligatoire A2 : implantation et destruction de la CI A3 : destruction des repousses	B1 & B2 : implantation et entretien du couvert (3 coupes/an) B2 : achat d'engrais B3 : implantation et destruction	Economie d'engrais et de pesticides 1 coupe du couvert /an
	Pertes de production	0	B2 : ↘ production en quantité et en qualité non quantifiée	↘ production sur la surface enherbée
	Total €/ha/an	41 (toutes options confondues)	10 (toutes options confondues)	633
Assiette	Assiette théorique	A1 : toutes zones (ZV et ZNV) A2 et A3 : surfaces avant une culture de printemps en ZNV	Tous les vergers Certains vignobles	Toutes les bordures de cours d'eau identifiées sur une carte IGN au 1/25 000
	Critères techniques	Exclusion des sols à taux d'argile >60% A1 et A2 : une CI composée de légumineuses / 6 ans	B2 et B3 : exclusion des sols avec une forte charge en éléments grossiers B2 : exclusion des vignes en climat sec	
	Ass. Maximale Technique (AMT)	A1 : 2,829 Mha A2 : 1,070 Mha A3 : 0,352 Mha	B1 : 13 800 ha B2 : 127 900 ha B3 : 71 300 ha	250 000 ha
Scénario de diffusion	Etat de référence 2010	CI dans l'enquête "Pratiques culturales" 2006 (sous-estimées car obligation de CI intervenue depuis) A2 : CI déjà sur 8% en ZNV	B1 : 92% des vergers déjà enherbés B2 + B3 : 415 900 ha déjà enherbés	Bandes enherbées non recensées mais nombreuses
	Scénario de diffusion	AMT atteinte en 2030 	AMT atteinte en 2030 	↗ conditionnalité PAC "maintien des éléments topographiques" en 2013 → AMT atteinte dès 2020 

Tableau 2

Effet visé :

. **Le stockage additionnel de C dans le sol.** Le stockage de C n'est pas actuellement comptabilisé dans l'inventaire national (calcul "CITEPA"). Une méthode "expert" est proposée ici, fondée la littérature scientifique et utilisant les valeurs du Tableau 1.

Autres effets comptabilisés (N₂O et CO₂) :

. **La modification des émissions directes et indirectes de N₂O.** Suite aux évolutions des pratiques de fertilisation azotée, les émissions sont calculées en utilisant les facteurs d'émission fournis par le GIEC en 2006.

. **L'évolution des émissions directes de CO₂.** Les émissions liées à la consommation de carburant supplémentaire pour l'implantation, l'entretien, la destruction des CI ou des couverts herbacés sont estimées avec les facteurs d'émission établis à partir de la Base Carbone®.

. **Les effets induits** (en amont de l'exploitation). Les émissions induites, liées à la production et au transport des engrais azotés minéraux, des herbicides et du gazole, sont calculées en utilisant les données de la base Dia'terre® - Ges'tim.

Effets négligés ou non quantifiés :

- Les modifications des émissions directes de N₂O liées à la présence de CI (minéralisation des résidus) ou de couverts herbacés dans les vergers, les vignes et le long des cours d'eau.
- La réduction des émissions indirectes de N₂O liée à la diminution de la lixiviation de nitrate et de la volatilisation d'ammoniac à partir des sols portant ces couverts.
- Les émissions induites associées à la production et au transport d'intrants mineurs (semences des couverts...).

• Estimation du coût unitaire pour l'agriculteur

Ces coûts comprennent :

- les économies ou les charges supplémentaires d'engrais azotés,

- les dépenses occasionnées par l'implantation et la gestion des couverts ;
- les pertes de production dues à l'implantation de bandes enherbées (qui réduisent la surface en production).

Les pratiques agricoles retenues devraient permettre de maintenir les niveaux de production des cultures suivant les CI, et des vergers et vignes nouvellement enherbés. L'éventuel impact sur la qualité des raisins et des vins n'a pas pu être estimé globalement.

• Estimation de l'impact à l'échelle nationale

Assiette Maximale Technique (AMT)

A : Elle est constituée des surfaces actuelles de CI, plus les surfaces cultivées avec des espèces de printemps en zone non-vulnérable de la "Directive Nitrates". Les terres inappropriées à l'implantation de CI (sols à forte teneur en argile, >60%) sont exclues.

B : Elle concerne l'ensemble des vergers et vignes à l'exception des surfaces dont la charge en éléments grossiers est élevée. L'option technique est choisie selon les conditions d'alimentation en eau.

C : La totalité des surfaces le long des cours d'eau identifiés sur une carte IGN au 1/25000 est concernée, soit 250 000 ha (fiche BCAEI, Bande tampon).

Les surfaces à exclure en raison des caractéristiques de leurs sols (trop argileux ou caillouteux) sont estimées en croisant les surfaces concernées et les données issues du *Corine Land Cover*.

Scénario de diffusion de l'action

La situation de référence 2010 a été décrite à partir des données statistiques disponibles, qui sont un peu anciennes (enquêtes sur les "Pratiques Culturelles" 2006) pour les CI, incomplètes sur certains vignobles, et absentes pour les bandes enherbées.

L'adoption des trois sous-actions a été considérée progressive et régulière dans le temps. L'assiette maximale technique est atteinte dès 2020 (C) ou en 2030 (A et B).

IV- Résultats et mise en perspective

	unités (M : millions)	Année 2030				Cumul sur la période 2010-2030		
		Cultures intermédiaires	Cultures intercalaires	Bandes enherbées	Total 3 sous- actions	Cultures intermédiaires	Cultures intercalaires	Bandes enherbées
Potentiel d'atténuation (méthode "CITEPA") Sans émissions induites		0,3	-0,02	0,2	0,5	3,3	-0,2	3,2
Potentiel d'atténuation (méthode "expert")	Sans émissions induites	1,1*	0,14*	0,3*	1,5*	11,8*	1,6*	4,7*
	Avec émissions induites	[0,7 / 1,5]	[0,07 / 0,2]	[0,2 / 0,4]	[0,9 / 2,1]	[7,2 / 16,3]	[0,8 / 2,4]	[3,2 / 6,2]
		1,3*	0,13*	0,4*	1,8*	13,9*	1,5*	6,5*
		[0,9 / 1,7]	[0,06 / 0,2]	[0,3 / 0,5]	[1,2 / 2,4]	[9,4 / 18,5]	[0,7 / 2,3]	[5,0 / 7,9]
Coût total pour les agriculteurs	M€	173,9	2,0	158,3	334,3	1891	22	2468
Coût de la tonne de CO_{2e} pour l'agriculteur (méthode "expert", sans émissions induites)	€/tCO _{2e}	160	14	528	219	-	-	-
		(115 à 260)	(10 à 34)	(402 à 771)				

* Les valeurs moyennes sont des moyennes arithmétiques entre les valeurs basses (hypothèse de stockage de C haut) et hautes (hypothèse de stockage de C bas) retenues pour les facteurs d'émission, sauf dans le cas du coût de la tonne de CO_{2e}.

Tableau 3

• Les résultats

Par rapport au calcul "CITEPA" (basé sur les recommandations GIEC 1996), la prise en compte du stockage de C dans le sol et

l'évolution de la valeur des coefficients d'émission liés aux fertilisants azotés minéraux tels que proposés par le GIEC 2006 améliorent de façon notable le potentiel d'atténuation de ces trois sous-actions. Parmi elles, l'adoption des CI conduit au potentiel le

plus élevé. Ce résultat s'explique par les surfaces importantes ciblées par cette sous-action, la valeur unitaire d'atténuation n'étant pas particulièrement haute. Toutefois, le coût à la tonne de CO₂e évité est important, en raison des nombreuses interventions culturales. Le potentiel d'atténuation lié à l'enherbement des vignes et des vergers est relativement faible et cette sous-action concerne peu d'hectares. Le coût est peu élevé du fait des faibles évolutions dans les pratiques culturales. Pour les bandes enherbées, malgré un potentiel d'atténuation unitaire élevé, le résultat global est faible en raison des surfaces limitées assignées à cette sous-action. Leur adoption s'accompagne d'un coût élevé pour les agriculteurs du fait de la perte de revenus sur ces surfaces.

• La sensibilité des résultats aux hypothèses

La quantification des atténuations, unitaires et globales, est très sensible à divers paramètres. Le manque de données précises (références techniques dans les vignobles), ou l'utilisation de données anciennes (pratiques culturales sur les CI) conduisent à formuler de nombreuses hypothèses et à simplifier certains calculs. N'ont pas été comptabilisés :

- la variation de production de la biomasse des CI. La valeur retenue est de 2 tMS/ha/an à l'échelle de la France, alors qu'elle est très fluctuante (0 à 5 tMS/ha/an),
- l'effet des CI sur la diminution de la lixiviation du nitrate (car non quantifiée),
- certaines régions viticoles (données statistiques absentes),
- les surfaces déjà enherbées en bordure des cours d'eau en 2010 (données non renseignées),
- la réduction des émissions de N₂O suite à l'adoption des différents leviers techniques (très variables selon les conditions pédoclimatiques, et très peu renseignées).

La surface (25 ha) des parcelles élémentaires, prise en compte dans le Corinne Land Cover pour calculer les surfaces dont la teneur en argile était élevée et les surfaces à forte charge en éléments grossiers n'est pas adaptée aux tailles de parcelles analysées.

Pour définir l'assiette maximale technique des bandes enherbées, l'hypothèse retenue est de leur assigner la totalité de la SET (Surface Equivalente Topographique), alors qu'elle peut aussi être affectée aux haies, bosquets, murets....

• Les conditions d'une prise en compte de l'action dans l'inventaire national

Comptabilisation de l'effet

La méthode "CITEPA" ne prend en compte ni le stockage additionnel de C dans le sol, ni la révision des valeurs des facteurs d'émission des engrais azotés minéraux. Les règles de calcul retenues par le GIEC en 2006 ont à la fois fait évoluer les coefficients d'émissions liés aux fertilisants et permettent l'évaluation du stock de C.

Vérifiabilité de la mise en œuvre

La mise en œuvre de ces sous-actions pourraient être évaluée soit par le biais d'enquêtes chez les agriculteurs, soit par la réalisation de photographies aériennes permettant d'identifier si les sols sont couverts par de la végétation.

• Les contextes et mesures susceptibles de favoriser le déploiement de l'action

Les options techniques proposées pour les CI et les bandes enherbées ne sont pas difficiles à mettre en œuvre et ne nécessitent pas de matériel spécifique. En revanche, dans certains vignobles, l'enherbement sera délicat à conduire (pour des vignes

en gobelet, ou en situations de densité élevée de ceps) et nécessitent parfois l'achat de matériels spécifiques.

Le développement des différents leviers techniques identifiées pour les **cultures intermédiaires** est difficile à chiffrer. En effet, il existe des freins à la réduction de la fertilisation azotée des cultures (cf. action "Fertilisation azotée"), et l'implantation de nouvelles CI conduit à des coûts financiers non négligeables.

L'évolution de l'**enherbement des vignes** est complexe à quantifier. En effet, le devenir des droits de plantation en viticulture, dictés par la nouvelle PAC, n'est pas encore fixé. La réglementation européenne pourrait influencer sur les pratiques agricoles, dont l'enherbement. En parallèle, les démarches agronomiques engagées dans le cadre du plan Ecophyto 2018 sont plutôt favorables au développement de l'enherbement des vignobles français. Toutefois, les incertitudes quant à la maîtrise technique de la conduite des vignes enherbées et de la vinification de leurs produits sont à prendre en considération.

La généralisation des **bandes enherbées** le long des cours d'eau est soumise aux règles de la conditionnalité de la PAC qui leur sont favorables.

• Vulnérabilité et adaptabilité de l'action au changement climatique

Un changement climatique qui se traduirait par des précipitations moins abondantes et des températures plus élevées renforcerait la concurrence pour l'eau soit entre les cultures principales et les CI, soit entre les arbres fruitiers ou ceps et le couvert herbacé. Dans ces contextes limitants, l'introduction de CI ou l'enherbement des vergers et des vignes seraient moins développés. Par ailleurs, le risque d'une raréfaction en eau pour l'irrigation pourrait conduire à une diminution des surfaces en cultures d'été, fortement consommatrices en eau, et à la réduction des surfaces en CI.

• Les autres effets de l'action

Impacts sur la production

L'**enherbement des vignes** est susceptible d'avoir un effet négatif sur la production, mais peu de références existent. En Alsace, la présence d'un couvert herbacé ne modifie pas la production en situation de sols profonds et fertiles, mais la réduit de 20% sur des sols superficiels malgré un apport de 40kgN/ha/an. Par ailleurs, l'évolution de la qualité des raisins et des moûts peut nécessiter un ajustement des procédés œnologiques. L'implantation de **bandes enherbées** conduit à une perte de production lorsque les surfaces étaient initialement assignées à des cultures ou prairies.

Impacts agronomiques et environnementaux

Les **cultures intermédiaires** et **intercalaires** ont des effets démontrés sur l'augmentation du potentiel de minéralisation des matières organiques stockées dans les sols, la réduction des phénomènes d'érosion hydrique et éolienne et l'amélioration des propriétés physiques des sols (réduction du ruissellement et de la battance, décompaction). Dans les vignes, l'enherbement constitue une niche écologique pour les insectes auxiliaires, permettant de mieux maîtriser le développement de certains bioagresseurs. Les **bandes enherbées** contribuent à la réduction des pollutions des eaux par le nitrate et les produits phytosanitaires.

• Conclusions

Cultures Intermédiaires

L'implantation de CI n'est pas techniquement difficile à mettre en œuvre, hormis les éventuelles difficultés de levée en cas de

sécheresse post-semis. L'incorporation réitérée de résidus des CI peut entraîner une augmentation des processus de minéralisation des matières organiques stockées dans les sols permettant le maintien des niveaux de production des cultures suivantes. Toutefois, malgré leurs impacts positifs sur l'environnement et l'absence d'effet dépressif sur la production de la culture suivante, leur adoption représente un coût financier pour l'agriculteur.

Cultures Intercalaires

Dans certaines conditions, l'enherbement de certains vignobles peut être délicat à conduire et nécessite parfois l'achat de matériels

spécifiques. Malgré les effets positifs environnementaux déjà démontrés, l'adoption de cette pratique par les vignerons n'est pas généralisée du fait des modifications quantitatives et qualitatives des productions non quantifiées de façon spécifique dans chaque vignoble.

Bandes enherbées

L'option proposée n'est pas techniquement difficile à mettre en œuvre et rend de nombreux services environnementaux ; son inconvénient majeur est de réduire la surface de production et donc de générer des pertes de revenu pour les agriculteurs.



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

I- Enjeu et principe de l'action

Le bilan de GES de l'agriculture peut être amélioré par une augmentation du stockage dans la biomasse ou le sol de carbone sous forme organique, c'est-à-dire provenant de CO₂ capté par des végétaux. Ce stockage peut être accru par le développement de la biomasse ligneuse et par des restitutions au sol plus importantes de matières organiques.

L'action vise l'implantation d'arbres au sein des parcelles agricoles en grandes cultures assolées ou en herbe (agroforesterie), ou à leur périphérie (haies). Les cas retenus sont une plantation d'arbres à faible densité (30-50 arbres par ha) et l'installation de 60 ou 100 mètres linéaires de haies par ha, situations compatibles avec le maintien d'une production agricole mécanisée.

II- Mécanismes et modalités techniques de l'action

• Modalités et intérêts de l'introduction d'arbres

"Agroforesterie" est un terme générique qui désigne un mode d'exploitation des terres agricoles associant des arbres et des cultures ou des pâturages. Autrefois courantes en Europe, ces pratiques ont été abandonnées progressivement au cours du XX^e siècle, essentiellement pour des raisons liées à l'intensification et à la mécanisation de l'agriculture. Récemment est apparue une agroforesterie "moderne", associant des alignements d'arbres et une culture intercalaire mécanisée.

Dans l'étude, la sous-action "agroforesterie" correspond à l'introduction d'arbres au sein de parcelles cultivées ou de prairies et la sous-action "haies" correspond à l'introduction d'arbres en périphérie des parcelles. La définition retenue pour les haies est celle de l'Inventaire forestier national¹⁰.

Indépendamment de ses bénéfices environnementaux (stockage de carbone et autres), l'intérêt de l'agroforesterie réside dans l'hypothèse que sa production totale de biomasse (arbres + production agricole) par hectare sera supérieure à celles obtenues sur des surfaces séparées.

L'**agroforesterie** présente une grande diversité de systèmes, qui diffèrent par les essences plantées, leur densité et leur disposition dans la parcelle. Les résultats disponibles concernant le fonctionnement et la productivité de ces systèmes sont ponctuels et le plus souvent limités aux premières années suivant la plantation des arbres. Ces références sont souvent centrées sur l'évaluation des effets biophysiques et techniques de l'agroforesterie. Pour une approche intégrée technico-économique, les références disponibles, peu nombreuses, proviennent principalement du projet de recherche européen *Silvoarable Agroforestry For Europe* (SAFE), qui a étudié des systèmes agroforestiers utilisant 5 espèces (chêne vert, pin parasol, peuplier, merisier et noyer).

Quant aux **haies**, leur définition recouvre une très grande diversité de pratiques, avec des haies plantées ou spontanées, à végétation basse, arbustive ou arborée, élaguées ou non, implantées à plat ou sur des talus.

¹⁰ Une haie est une formation linéaire arborée comportant des arbres et des arbustes sur au moins 25 mètres de long sans interruption de plus de 10 m, sur une largeur d'assise inférieure à 20 m (80% de la biomasse étant concentrée sur moins de 2 m de largeur) et d'une hauteur potentielle supérieure à 2 m.

• Effets sur le stockage de carbone

Le stockage additionnel de carbone dans les parcelles cultivées ou prairies agroforestières ou entourées d'arbres peut provenir principalement :

- du stockage dans la biomasse végétale pérenne (aérienne et souterraine),
- de la restitution de matière organique au sol *via* la litière (feuilles mortes), le renouvellement des racines fines et les exsudats racinaires.

Le stockage dans la biomasse ligneuse dépend du devenir du bois produit : il sera de plusieurs dizaines voire centaines d'années pour le bois d'œuvre, mais considéré comme nul pour les produits utilisés comme bois de chauffage, brûlé dans l'année. Ce dernier usage, se substituant à des combustibles fossiles, contribue à réduire les émissions de CO₂. Les branches coupées peuvent également être broyées et apportées au sol dont elles alimentent le stock de carbone.

• Les sous-actions étudiées

Agroforesterie. L'analyse de la bibliographie sur le stockage additionnel de carbone dans les arbres et dans le sol met en évidence une forte variabilité des stockages mesurés suivant le contexte pédoclimatique, le type de système agroforestier (notamment la densité d'arbres) ou la méthode utilisée (profondeur de sol prise en compte...). Très peu de mesures ont été effectuées en climat tempéré.

L'analyse de la littérature a conduit à retenir la valeur de **3,7 tCO₂e/ha/an** pour le stockage de carbone dans la biomasse et dans le sol, sur une durée de 20 ans, avec comme fourchette une valeur basse autour de 0,4 tCO₂e/ha/an et une valeur haute de 4,97 tCO₂e/ha/an. On note donc une très forte incertitude associée au stockage agroforestier.

A noter que le rythme de stockage de carbone n'est pas constant, la valeur retenue doit donc être considérée comme une valeur moyenne, "linéarisée" sur 20 ans.

Haies. Peu de travaux ont quantifié le stockage additionnel de C dans le sol en relation avec l'implantation de haies en milieu tempéré. Les valeurs retenues sont de **0,55 tCO₂e/ha/an** (valeur basse : 0,17 et valeur haute : 0,94) et **0,92** (valeur basse : 0,28 et valeur haute : 1,56), suivant que la haie est introduite dans une parcelle cultivée ou une prairie, sur 60 ou 100 mètres linéaires respectivement. Ces valeurs sont plus basses que celles mesurées dans certaines études, mais cohérentes avec une valorisation des produits des haies comme bois de chauffage, qui conduit à

considérer que seul le carbone des racines et du sol est durablement stocké.

• Autres effets de l'action sur les GES

La réduction de l'érosion liée à la présence d'arbres a été considérée sans effet sur le bilan GES dans la mesure où les matières organiques déplacées par érosion peuvent se redéposer

III- Calculs du potentiel d'atténuation et du coût de l'action

• Systèmes retenus et modalités de calcul

Les systèmes pris comme référence sont :

- pour l'**agroforesterie** : une plantation de faible densité (de l'ordre de 30 à 50 arbres /ha), restant en place durant au moins 20 ans ; pour les évaluations économiques, 3 essences sont envisagées (peuplier, merisier et noyer) ;
- pour les **haies** : l'implantation de 100 mètres linéaires (ml) de haie par ha de prairies et sur 60 ml par ha de cultures.

En agroforesterie, l'indice le plus utilisé pour évaluer la productivité globale des cultures associées est le *Land Equivalent Ratio* (LER). Il s'interprète comme la surface qu'il faudrait cultiver avec des cultures pures (témoin agricole et témoin forestier) pour produire autant (et dans les mêmes proportions) que ce qui est produit par un hectare de plantation agroforestière¹¹. Peu d'évaluations de ce LER ont été réalisées en conditions tempérées. Dans l'étude, les estimations sont faites sous l'hypothèse d'un LER égal à 1,3.

Concernant le devenir du bois, l'hypothèse retenue est un stockage durable du bois (bois d'œuvre) pour l'agroforesterie, et un stockage nul pour la biomasse aérienne des haies, utilisée pour le chauffage (vente pour la fabrication de plaquettes) - mais cette production de bois énergie représente une économie de fioul.

L'introduction des arbres engendre une réduction de la surface affectée à la culture ou à l'herbe, estimée à 5% pour la sous-action agroforesterie et 1,2 à 2% pour la sous-action haies. Pour l'agroforesterie, les pertes de productions (dues notamment à l'ombre) sont estimées à partir du LER. On suppose que les charges restent proportionnelles au produit, avec toutefois un léger surcoût. Les marges brutes initiales sont issues du RICA 2010, et les données sur la conduite des cultures et prairies (consommation d'engrais par ex.) proviennent de l'enquête "Pratiques culturales" 2006. Tous les calculs sont effectués en différenciant les grandes cultures et les prairies (temporaires ou permanentes), dont les surfaces sont fournies par la SAA 2010.

La diversité des situations régionales, qui influent sur les niveaux de production des cultures et prairies et sur la croissance et la productivité des arbres, n'a pu être prise en compte ; les données utilisées sont des moyennes nationales. Les éventuels effets de la présence des arbres sur la conduite des cultures et des prairies n'ont pas non plus été considérés.

Pour les prairies, les résultats du projet SAFE sont à prendre avec prudence, peu d'études économiques ayant abordé le sylvo-pastoralisme.

• Effets de l'action sur les GES et estimation de son potentiel d'atténuation unitaire

Dans l'inventaire national 2010, les haies brise-vent, rideaux et couloirs d'arbres sont inclus dans la forêt s'ils ont une superficie

¹¹ Une association est donc "globalement" intéressante d'un point de vue productif si son LER est supérieur à 1, c'est-à-dire si l'association permet de produire plus, par unité de surface, que les cultures pures.

et s'accumuler en aval de la parcelle.

L'introduction des arbres réduit la surface cultivée, et donc la consommation d'intrants (engrais, pesticides, gazole) et la production agricole par hectare. Elle est susceptible de modifier la conduite de la culture : réduction de la fertilisation (permise par l'apport de matière organique) ou de l'irrigation (à l'ombre des arbres).

supérieure à 0,5 ha et une largeur de plus de 20 m ; les parcelles agroforestières sont comptabilisées dans la catégorie "cultures". Ni les haies, ni l'agroforesterie ne peuvent donc être prises en compte. L'inventaire ne comptabilise pas le stockage de C dans le sol, et considère nul le stockage dans la biomasse ligneuse en faisant l'hypothèse que l'accroissement compense la récolte à la suite de laquelle tout le bois est brûlé dans l'année qui suit sa récolte.

Dans cette étude, le potentiel d'atténuation lié à l'introduction à l'agroforesterie et aux haies sera donc principalement estimé à partir d'une compilation effet par effet des valeurs disponibles dans la littérature.

Effet visé :

• **Le stockage additionnel de carbone** dans le sol et la biomasse des arbres. Les valeurs de stockage additionnel utilisées sont celles retenues précédemment : +3,7 (0,4-4,97) tCO₂e/ha/an pour l'agroforesterie, et 0,55 (0,17-0,94) et 0,92 (0,28-1,56) tCO₂e/ha/an pour les haies.

Autres effets comptabilisés :

• **La réduction des émissions de N₂O** liées à la fertilisation azotée minérale, par la suppression des engrais *au prorata* des surfaces cultivées réduites. Ces émissions, directes et indirectes, sont estimées d'après les fertilisations moyennes en France et les facteurs d'émission fournis par les lignes directrices du GIEC 2006.

• **Les modifications des émissions de CO₂** liées aux travaux supplémentaires réalisés pour les arbres (plantation, travaux d'entretien et récolte des arbres) et à la réduction de la surface agricole travaillée.

• **Les modifications des émissions induites**, liées à la substitution du bois issu de la taille des haies à des combustibles fossiles pour le chauffage, et liées à la fabrication et au transport :

- des engrais azotés minéraux (émissions induites estimées d'après les fertilisations moyennes en France et les valeurs fournies par la base Dia'terre® - Ges'tim) ;
- du gazole (émissions induites estimées d'après la Base Carbone® de l'ADEME) ;
- du fioul (dont la consommation est évitée par la valorisation en énergie du bois récolté à partir des haies).

Effets négligés :

- La consommation énergétique en aval de l'exploitation, liée à l'exploitation de la récolte (transport, scierie, fabrication des plaquettes ou des meubles).

• Estimation du coût unitaire pour l'agriculteur

Sont pris en compte :

- les coûts et gains associés aux arbres, considérés hors subventions : coûts d'implantation, d'entretien puis d'exploitation des arbres, et ventes de bois ;

- les effets de la perte de la surface agricole : économie d'intrants et de travail, et manque à gagner dû à une production réduite.

Pour l'agroforesterie, l'estimation des coûts s'est appuyée sur une actualisation des résultats publiés du projet SAFE. Pour les haies,

un itinéraire technique type pour l'installation, l'entretien et la récolte des haies, a été reconstitué.

Les recettes et les coûts sont additionnés à un taux d'actualisation de 4%.

	Sous-actions	A. Agroforesterie	B. Implantation de haies
Contenu technique	Implantation d'arbres	Arbres à l'intérieur des parcelles, en cultures annuelles ou en prairies (permanentes ou temporaires) Densité faible (30-50 arbres /ha), compatible avec le maintien de la production agricole, et l'accès aux aides de la PAC -5% de surface pour la culture annuelle ou la prairie	Arbres en périphérie des parcelles 100 mètres linéaires (ml) par ha de prairies 60 mètres linéaires (ml) par ha de cultures -1,2 à -2 % de surface pour la culture annuelle ou la prairie
Potentiel d'atténuation unitaire	Stockage de C kgCO ₂ e/ha/an	Dans le sol, la biomasse souterraine et aérienne : Cultures et prairies : 3 700 (400 à 4 970)	Dans le sol et la biomasse souterraine : Cultures : 550 (170 à 940) Prairies : 920 (280 à 1 560)
	Emissions directes de CO₂ (gazole) kgCO ₂ e/ha/an	Travaux d'implantation des arbres, d'entretien, de récolte du bois :	
		Consommation supplémentaire : - 14	Consommation supplémentaire : Cultures : - 3 Prairies : - 6
	Emissions de N₂O (directes + indirectes) kgCO ₂ e/ha/an	Economie d'engrais (-5% de surface) : Cultures : 63 Prairies : 8	Economie d'engrais (-1,2 à 2% de la surface) : Cultures : 15 Prairies : 25
	Total des émissions directes + indirectes kgCO ₂ e/ha/an	Cultures : 3 749 (449 à 5 019) Prairies : 3 694 (394 à 4 964)	Cultures : 562 (182 à 952) Prairies : 939 (299 à 1 579)
	Emissions induites (amont) de CO₂ et N₂O kgCO ₂ e/ha/an	Economie d'engrais et consommation accrue de gazole : Cultures : 33 Prairies : 2	Economie d'engrais, consommation accrue de gazole et valorisation énergétique : Cultures : 690 Prairies : 1 140
Total kCO ₂ e/ha/an	Cultures : 3 782 (482 à 5 052) Prairies : 3 696 (396 à 4 966)	Cultures : 1 252 (872 à 1 642) Prairies : 2 079 (1 439 à 2 719)	
Coût unitaire	Investissement plantation	▲ Peu de références technico-économiques disponibles	
		De 17 € (merisier) à 45 € (peuplier) par hectare	15 € (plants + main d'œuvre) par ml soit 54 €/ha/an
	Entretien et exploitation des arbres	Autour de 50 € par hectare	Taille d'entretien et de formation des hauts jets, recépage, désherbage, récolte : 17 €/ha/an
	Perte de production	Cultures : de 80 à 124 €/ha/an, selon les essences Prairies : de 42 à 70 €/ha/an, selon les essences	Cultures ou prairies : 9 €/ha/an
	Valorisation de bois	Vente de bois d'œuvre : 84 à 147 €/ha	Vente du bois : 16 €/ha/an
Total €/ha/an	Cultures : 54 €/ha/an (noyer), 45 (peuplier), 69 (merisier) Prairies : 28 €/ha/an (noyer), 52 (peuplier), 45 (merisier)	75	
Assiette	Assiette théorique	Toutes les surfaces en grandes cultures (13,8 Mha) et en prairies (9,8 Mha), soit un total de 23,6 Mha	
	Critères techniques	Sols à profondeur (1 m) et RU (120 mm) suffisantes Parcelles d'au moins 4 ha	Sols à profondeur (0,5 m) suffisante Parcelles d'au moins 4 ha
	Ass. maximale technique (AMT)	Cultures : 3,9 Mha ; Prairies : 1,98 Mha Total : 5,9 Mha	Cultures : 7,6 Mha ; Prairies : 4,5 Mha Total : 12,1 Mha
Scénario de diffusion	Etat de référence 2010	2000 ha en 2010	
	Scénario de diffusion	<p>Scénario 4% de l'AMT en 2030</p> <p>Scénario 10% de l'AMT en 2030</p>	<p>Scénario 10% de l'AMT en 2030</p> <p>Scénario 20% de l'AMT en 2030</p>

Tableau 1

• Estimation de l'impact à l'échelle nationale

Assiette maximale technique (AMT)

Pour les 2 sous-actions, les surfaces toujours en herbe peu productives (parcours, landes, alpages) sont exclues car difficilement accessibles (relief).

Pour l'**agroforesterie**, sont retenues les parcelles d'une taille > 4 ha (compatible avec la mécanisation du travail entre les rangées d'arbres), et dont le sol a une profondeur > 1 m et une réserve utile > 120 mm (soit 38% des sols en cultures, 31% en prairies). Pour les **haies**, le même critère est retenu pour la taille

des parcelles, mais l'exigence est moindre pour la profondeur du sol, > 0,5 m (soit 74% des sols en cultures, 71% en prairies).

Scénario de diffusion de l'action

Pour l'**agroforesterie**, qui représente une profonde mutation dans la stratégie de production, l'hypothèse est une diffusion lente, avec 2 scénarios : une adoption sur 4 et 10% de l'AMT d'ici 2030.

Pour les **haies**, dont l'extension actuelle peut être estimée à 4% des terres (principalement situés en zones bocagères d'élevage), l'hypothèse est là aussi une diffusion lente, avec 2 scénarios : une adoption sur 10 et 20% de l'AMT d'ici 2030.

IV- Résultats et mise en perspective

	unités (M : millions)	Année 2030			Cumul sur la période 2010-2030	
		Agroforesterie* Moyenne*** [4% / 10%]	Haies** Moyenne [10% / 20%]	Total 2 sous-actions	Agroforesterie* Moyenne [4% / 10%]	Haies** Moyenne [10% / 20%]
Potentiel d'atténuation (méthode "CITEPA") Sans émissions induites		0	0	0	0	0
Potentiel d'atténuation (méthode "expert") Sans émissions induites	M _{tCO_{2e}}	1,5	1,3	2,8	17,7	18,1
		[0,1 / 2,3]	[0,3 / 2,9]	[0,4 / 5,2]	[1,2 / 27,1]	[4,2 / 38,9]
Avec émissions induites		1,5	2,8	4,4	17,7	40,2
		[0,1 / 2,4]	[1,3 / 4,9]	[1,4 / 7,3]	[1,2 / 27,3]	[20,3 / 67]
Coût total pour les agriculteurs	M€	20,5	136,1	156,6	236,5	1931
		[11,7 / 29,2]	[90,8 / 181,5]	[102,5 / 210,7]	[135,1 / 337,8]	[1406 / 2456]
Coût de la tonne de CO_{2e} pour l'agriculteur (méthode "expert", sans émissions induites)	€/tCO _{2e}	14	107	56	-	-
		[13 / 118]	[63 / 332]	[41 / 275]	-	-

* 2 valeurs correspondant aux 2 scénarios : 4% et 10% de l'AMT ; ** 2 valeurs correspondant aux 2 scénarios : 10% et 20% de l'AMT ;

***les valeurs moyennes correspondent à l'introduction de l'agroforesterie sur 7% de l'AMT et des haies sur 15% de l'AMT, en utilisant les potentiels et coûts centraux. Les fourchettes d'atténuations basses sont appliquées aux scénarios d'AMT bas, et les fourchettes hautes aux scénarios d'AMT hauts.

Tableau 2

• Les résultats

Pour l'**agroforesterie**, le potentiel d'atténuation unitaire des émissions directes et indirectes est de 3,75 tCO_{2e}/ha/an pour les cultures et de 3,7 tCO_{2e}/ha/an pour les prairies. Les émissions induites sont très faibles (33 kgCO_{2e}/ha/an) pour les cultures, et négligeables en prairies.

Pour les **haies**, le potentiel d'atténuation unitaire des émissions directes et indirectes est de 0,55 tCO_{2e}/ha/an pour les cultures et 0,92 tCO_{2e}/ha/an pour les prairies. Les émissions induites sont non négligeables du fait de la valorisation énergétique de la récolte prise comme hypothèse (0,14 et 0,22 tCO_{2e}/ha/an pour les cultures et les prairies respectivement).

Le potentiel d'atténuation unitaire de la sous-action "agroforesterie à faible densité" est bien supérieur à celui de la sous-action "haies" (3,7-3,75 contre 0,55 et 0,92 tCO_{2e}/ha/an), ce qui est logique compte tenu de la part de la surface parcellaire concernée (1,2 ou 2% pour les haies contre 5% pour l'agroforesterie) et de la valorisation durable sous forme de bois d'œuvre prise comme hypothèse pour l'agroforesterie. Par ailleurs, le coût unitaire de la tonne de CO_{2e} est plus bas pour l'agroforesterie que pour les haies (14 € contre 107 €). Compte tenu des AMT différentes (5,9 millions d'ha pour l'agroforesterie et 12,1 pour les haies) et des potentiels unitaires de stockage différents, les atténuations cumulées moyennes sur la période 2010-2030 sont équivalentes pour les deux sous-actions, autour de 18 millions de tCO_{2e}, pour un coût cumulé de 237 millions d'euros (M€) dans le cas de l'agroforesterie, contre 1931 M€ pour la sous-action "haies". Notons toutefois que la perspective d'atteindre 10% de l'AMT en

2030 apparaît beaucoup plus réaliste dans le cas des haies (déjà présentes sur plus de 500 000 ha agricoles en 2010) que pour l'agroforesterie à base de bois précieux à faible densité.

La mise en œuvre des deux sous-actions sur une même parcelle est peu probable. Toutefois, compte tenu des faibles niveaux de diffusion considérés (10% et 20% maximum de l'AMT pour l'agroforesterie et les haies respectivement), un développement des deux sous-actions sur des surfaces différentes est envisageable. Leurs effets peuvent donc être sommés au niveau national.

Ce sont les valeurs moyennes qui seront retenues pour l'analyse comparée des actions.

Comparaisons avec les résultats d'autres études "atténuation de GES". Plusieurs rapports et expertises récents portant sur des zones tempérées considèrent l'introduction d'arbres dans les parcelles agricoles comme une pratique stockant du carbone. Aux Etats-Unis, le potentiel de développement de l'agroforesterie sur 10 Mha a été estimé à 4,97 tCO_{2e}/ha/an. En Europe, une étude, qui reprend d'une expertise technique française des taux de stockage en agroforesterie de 5,55 à 14,8 tCO_{2e}/ha/an selon la densité de plantations, la durée de la rotation et la vitesse de croissance des arbres, a estimé que la contribution potentielle de l'agroforesterie au stockage de carbone est très importante (1566 millions de tonnes CO_{2e} par an) à l'échelle européenne (UE 27).

• La sensibilité des résultats aux hypothèses

Les résultats concernant l'efficacité environnementale et économique de cette action sont assortis d'une incertitude forte en raison

du grand nombre d'hypothèses faites. En particulier, les hypothèses faites pour quantifier l'atténuation potentielle sont fortes du fait d'un manque de références mesurées en milieu tempéré dans des situations comparables, de densité d'arbres notamment. La nature des essences plantées n'a pas été prise en compte, alors que la vitesse de croissance des arbres est un élément déterminant de la production de biomasse et donc du potentiel d'atténuation. La valeur utilisée pour estimer le stockage de carbone est réaliste notamment pour le peuplier, espèce à croissance rapide, mais pourrait être revue à la baisse pour les espèces à croissance plus lente comme le noyer. Selon les hypothèses faites sur le stockage de carbone, le potentiel d'atténuation unitaire varie d'un facteur 10 pour l'agroforesterie.

Une autre hypothèse forte a porté sur la valorisation ultérieure du bois, avec un stockage durable sous forme de bois d'œuvre pour l'agroforesterie, et un stockage limité dans le cas des haies. L'hypothèse de production de bois d'œuvre est discutable notamment pour le peuplier. Cette approche est d'autant plus critiquable que tout le carbone stocké dans le bois n'est pas exporté des parcelles, et que seule une portion des grumes commercialisées est transformée en produits plus ou moins durables. Dans l'idéal, il faudrait séparer le stockage dans les produits, du stockage dans la végétation et le sol.

L'estimation de l'assiette maximale technique est également sensible aux critères biophysiques et agricoles retenus. Ces derniers, quoique raisonnables, sont discutables : les plantations d'arbres sont également possibles dans des situations *a priori* moins favorables ; d'autres critères de faisabilité technique, liés à l'exploitation agricole (SAU, équipement, intégration dans les filières bois) n'ont pas été pris en compte. Le niveau de diffusion des sous-actes envisagés en % de l'AMT est également difficile à justifier : les deux valeurs (réaliste et optimiste) retenues dans l'étude permettent d'encadrer l'estimation d'atténuation à l'horizon 2030.

Enfin, les estimations des **coûts** apparaissent également très variables et sensibles aux hypothèses retenues. Le scénario central retient un coût (certes modéré) au développement de l'agroforesterie, alors que le projet SAFE concluait, dans une certaine mesure, à sa rentabilité – toutefois variable selon les scénarios envisagés. L'une des raisons tient au contexte des prix agricoles très différents en 2006 (année de base du projet SAFE) et en 2010 (année de base de l'étude). De nombreuses variables jouent en fait sur la rentabilité de l'agroforesterie. Le taux d'actualisation choisi (4%) est notamment très pénalisant pour l'agroforesterie, or un débat existe sur ce taux, compte tenu de la stagnation de la croissance qui semble durable. Pour l'estimation des coûts, il a fallu fixer le niveau de perte de rendement engendré par la présence des arbres : un niveau de LER a été fixé, sur la base des rares données disponibles.

• Les conditions d'une prise en compte de l'action dans l'inventaire national

Comptabilisation de l'effet

Dans l'inventaire national des émissions de 2010, en l'absence de changement d'usage des sols, les variations de stocks de C dans le sol (et la biomasse) liées aux pratiques (dont l'agroforesterie, les haies) ne sont pas comptabilisées. A notre connaissance, il n'y a pas de prise en compte explicite et spécifique, ni des haies, ni de l'agroforesterie dans l'inventaire national.

Les lignes directrices du GIEC 2006 mentionnent l'agroforesterie comme une pratique stockant du carbone dans le sol et la biomasse qui correspond à une conversion de terres cultivées ou prairies en terres boisées, mais elles ne fixent pas de méthode de calcul explicite pour estimer les effets de l'agroforesterie.

Vérifiabilité de la mise en œuvre

La mise en œuvre de l'action serait facilement traçable via la contractualisation de la mesure 222 auprès des collectivités territoriales, et vérifiable, notamment par images satellitaires. Le réseau associatif (Association française d'agroforesterie - AFAF, Association française des arbres et des haies champêtres - AFAC), particulièrement actif, pourrait être un relais précieux pour accompagner et suivre le développement de l'action.

• Les contextes et mesures susceptibles de favoriser le déploiement de l'action

Aujourd'hui l'agroforesterie est identifiée par le Ministère de l'agriculture comme une pratique culturelle novatrice et agroécologique et comme une voie de diversification potentiellement rentable pour l'agriculteur. Dans ce contexte, les associations françaises (AFAF) et européenne (EURAF) d'agroforesterie et l'AFAC travaillent à la diffusion et au soutien de l'agroforesterie.

Dans le cadre du Programme de Développement Rural pour l'Hexagone (PDRH) 2007-2013, l'agroforesterie peut être subventionnée à travers quatre mesures de soutien : mesure 121-B "*Plan Végétal Environnement, installation de haies et d'éléments arborés*" ; mesure 216 "*Investissement non-productif*" ; MAET 214-I "*Entretien de haies localisées de manière pertinente*", et (depuis 2009) mesure 222 "*Première installation de systèmes agroforestiers sur des terres agricoles*". Cette mesure 222, cofinancée par le FEADER (Fonds européen agricole pour le développement rural) et les collectivités territoriales qui le souhaitent, ne peut couvrir que les coûts d'installation des arbres et l'entretien de la plantation les premières années. Le taux de subvention peut atteindre 70%, voire 80% dans les zones défavorisées. Le cahier des charges précis de la mesure est défini au niveau régional.

La multiplicité et les conditions de mise en œuvre des dispositifs actuels les rendent difficiles à mobiliser. Toutes les mesures sont zonées, selon les périmètres définis dans le cadre de Natura 2000, de la Directive cadre sur l'eau, des Directives Oiseaux et Habitats hors Natura 2000 : ce zonage ne permet pas de couvrir la totalité des territoires. Par ailleurs, ces diverses mesures sont assorties de seuils minimaux, en termes de surfaces d'aménagement et d'enveloppe financière, très restrictifs au regard des surfaces et linéaires visés dans chaque aménagement (spécifique à chaque objectif fléché). Enfin, l'éclatement des objectifs très ciblés de ces mesures, ainsi que de l'inscription de l'arbre champêtre comme réponse apportée à ces objectifs, rend difficile l'identification de la validité des aménagements arborés.

Aujourd'hui, dans le cadre des négociations de la PAC, est proposée l'idée d'une **mesure globale de soutien aux systèmes agroforestiers**, comprenant toutes les formes d'aménagements arborés champêtres, et applicable à tous les systèmes agricoles sans limite de densité d'arbres à l'hectare.

• Les autres effets de l'action

Politiquement, l'**agroforesterie** est surtout mise en avant pour ses performances agri-environnementales, en tant que moyen de lutte contre l'érosion des sols, la pollution des nappes et des rivières, l'uniformisation des paysages et la perte de biodiversité. Les **haies** quant à elles, constituent aussi bien des brise-vent que des habitats et refuges pour la faune sauvage, et notamment les auxiliaires des cultures. De façon générale, l'hétérogénéité de la végétation (cultures, arbres et enherbement) permet l'établissement d'une biodiversité plus riche sur la parcelle, mais les travaux de recherche quantifiant ces effets sont rares.

Enfin, l'agroforesterie représenterait un moyen d'adaptation au changement climatique, en protégeant les cultures contre les excès climatiques (notamment les stress thermiques précoces de printemps). La compétition pour l'eau entre les arbres et la culture pourrait être accrue en cas de sécheresses plus fréquentes ou plus prononcées, mais les choix techniques explorés (faible densité d'arbres, sols à forte RU) minimisent ce risque.

• Conclusions

La disponibilité en données (données fragmentaires) est un réel verrou pour l'estimation du potentiel d'atténuation unitaire de cette action. Par ailleurs, l'estimation d'une assiette technique réaliste est difficile pour une action impliquant des pratiques agricoles très innovantes, dont ni les critères d'acceptabilité ni les résultats économiques ne sont connus. Cette situation a conduit à devoir faire de nombreuses hypothèses, qui affaiblissent les évaluations.

Pour l'**agroforesterie**, encore peu développée sur le territoire, les stockages unitaires proposés sont prudents, l'assiette technique a été évaluée de manière réaliste et les taux d'adoption, compte tenu de la grande innovation que représente cette pratique, sont raisonnables ; cela conduit à considérer que le résultat global est plausible et autorise la comparaison avec les autres actions étudiées. L'analyse montre qu'il est possible en conservant la production agricole française d'introduire des arbres dans les parcelles agricoles et de stocker du carbone dans le sol et la biomasse.

Au-delà des incertitudes sur ses résultats économiques, l'agroforesterie constitue une alternative intéressante par rapport à

d'autres options (le boisement des terres agricoles, par ex.) pour contribuer au stockage du carbone, même si son développement ne peut être que limité compte tenu des pertes de production agricoles qu'elle induit. Ces calculs simples de rentabilité ne prennent pas en compte en outre les coûts d'opportunité, qui sont importants dans la mesure où il s'agit d'un investissement de long terme dans un avenir incertain.

En ce qui concerne la sous-action **haies**, il s'agit d'une pratique déjà mise en œuvre à l'échelle du territoire dont l'assiette est très importante. Pour autant, les références en termes de potentiel de stockage additionnel suite à l'implantation de haies font état d'une grande variabilité temporelle et spatiale, ce qui a conduit à choisir un potentiel d'atténuation unitaire assez modeste. Le potentiel de développement apparaît donc important et le scénario de 10% de l'assiette maximale technique en 2030 est réaliste, celui de 20% étant considéré comme optimiste. Reste la question du coût assez élevé d'implantation et d'entretien des haies, qui peut constituer un frein à leur mise en place. Dans cette étude, nous avons en effet considéré une valorisation bois d'œuvre pour l'agroforesterie et une valorisation déchetage et plaquette pour les haies, ce qui correspond à des hypothèses plausibles mais discutables.

L'action modifie la production agricole, mais son AMT (10% de l'assiette théorique) est faible par rapport à celle d'autres actions. Ces calculs ne concernent que les plantations à faible densité. Les plantations à densités moyenne et élevée, non considérées pour cette action, peuvent conduire, en fin de période, à des baisses importantes de la production agricole, voire à son arrêt.



↘ CO₂
↘ N₂O

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 des prairies permanentes et temporaires les plus intensives
- D. Intensifier modérément les prairies permanentes peu productives par augmentation du chargement animal

I- Enjeu et principe de l'action

Les surfaces prairiales sont au cœur du débat environnemental en raison de leur apport à la multifonctionnalité des élevages et de leur effet sur la réduction des impacts environnementaux. Cependant, leur existence dépend largement des activités d'élevage puisque ces surfaces sont le plus souvent maintenues pour le pâturage. Des travaux récents montrent que les prairies constituent des puits de carbone (C) et sont, à ce titre, susceptibles de compenser en partie les émissions de GES du secteur de l'élevage, qui représentent environ 9% des émissions françaises de GES. Toutefois, l'importance de ce stockage additionnel de C des prairies, et plus globalement leur bilan de GES, dépendent de leur type (prairie permanente ou temporaire) et de leur mode de

conduite (pâturage et/ou fauche, chargement animal, niveau de fertilisation...).

L'action vise à modifier la gestion des prairies existantes pour améliorer leur bilan de GES ; elle n'envisage pas la création de nouvelles surfaces en herbe (qui relèverait d'un changement d'utilisation des terres, exclu du périmètre de l'étude). Quatre voies d'optimisation sont proposées, jouant sur le stockage de C mais aussi sur les émissions de N₂O : un allongement de la saison de pâturage, un accroissement de la durée d'exploitation des prairies temporaires, une "désintensification" des prairies les plus fertilisées et une intensification modérée des prairies permanentes peu productives.

II- Mécanismes en jeu et modalités techniques de l'action

Les modes de gestion des prairies sont susceptibles d'influer sur : 1) le stockage de C dans le sol, 2) les émissions de N₂O liées à la fertilisation azotée minérale ou à la gestion des déjections, 3) les émissions de CO₂ dues à la consommation de carburant fossile lors des interventions sur les prairies et 4) les émissions de CH₄ liées à la fermentation entérique et à la gestion des déjections.

premières années ; le déstockage est moindre dans le cas d'une prairie temporaire âgée de quelques années.

• Gestion des prairies et stockage de carbone

Les prairies accumulent le carbone majoritairement sous forme de matières organiques dans les trente premiers centimètres du sol. Le stock de C d'une prairie est fonction des conditions pédoclimatiques, de l'histoire de la parcelle, de l'âge et de la composition floristique du couvert. Les facteurs clés dans la constitution et la préservation du stock de carbone sont les niveaux de la production primaire (biomasse végétale produite) et des restitutions organiques (déjections du troupeau au pâturage ou épandage d'effluents), ainsi que les perturbations du sol qui, en accélérant la minéralisation des matières organiques, induisent un déstockage.

• Gestion des prairies et émissions de N₂O et de CH₄

Les émissions de N₂O directes (intervenant sur les parcelles) et indirectes (intervenant sur les espaces proches de l'exploitation, à partir de l'azote lixivé sous forme de nitrate ou volatilisé sous forme d'ammoniac) sont principalement liées à la fertilisation azotée, minérale et organique. Ces émissions sont d'autant plus importantes que les apports azotés sont excédentaires par rapport aux capacités d'absorption de la végétation ; or les études récentes suggèrent que la fertilisation dépasserait souvent d'un quart les apports efficaces. Une réduction des apports azotés permet donc de diminuer les émissions directes et indirectes de N₂O. Les émissions de N₂O proviennent également des déjections des animaux ; une modification de leur alimentation peut influencer sur les quantités d'azote excrété et donc sur les émissions de N₂O.

Les modalités de la conduite de la prairie qui influent donc le plus sur le stockage de C sont :

- le mode d'exploitation de l'herbe : i) par le pâturage (qui s'accompagne d'une restitution directe par les déjections du carbone et de l'azote non assimilés par les animaux) ; ii) par la fauche (les exportations de carbone ne sont généralement pas compensées par des apports de matières organiques exogènes) ;
- l'intensité de l'exploitation, mesurée par le nombre de fauches ou par le chargement animal (nombre d'animaux par unité de surface), qui se traduit par un prélèvement de biomasse mais peut aussi stimuler la production végétale ;
- le niveau de la fertilisation, minérale (engrais de synthèse) et/ou organique (déjections, fumier/lisier) ;
- l'existence et la fréquence des retournements de la prairie (par un labour), qui provoquent la destruction du couvert végétal et une décomposition accélérée des matières organiques du sol : le retournement d'une prairie permanente (PP) peut ainsi déstocker de l'ordre de 6,2 à 11 t de CO₂e par hectare et par an durant les

Les émissions de CH₄ issues de la fermentation entérique sont influencées par le régime alimentaire ; elles sont réduites par une ration à base d'herbe. Celles issues de la fermentation des déjections sont plus importantes dans les conditions anaérobies qui prévalent en bâtiment et lors du stockage des effluents, que dans les prairies.

Le pâturage est susceptible d'accroître les émissions de N₂O parce que le sol peut être compacté par le piétinement des animaux (conditions plus anaérobies), et que les déjections évoluent dans des conditions d'humidité ou de température moins favorables que lorsque l'épandage est réalisé dans des conditions choisies. Mais par ailleurs le pâturage évite, par rapport à la consommation à l'étable d'herbe récoltée, les émissions de N₂O et CH₄ associées à la gestion des déjections en bâtiment et à l'épandage des effluents. Le chargement animal sur la parcelle a une influence sur les émissions de N₂O directes et indirectes et sur les émissions de CH₄ issue de la fermentation entérique et des déjections animales.

Le retournement de la prairie, en accélérant la décomposition des matières organiques du sol, transforme l'azote organique en azote minéral, à l'origine d'émissions directes et indirectes de N₂O.

Des études récentes montrent que les pratiques d'élevage peu intensives augmentent le stockage de C tout en diminuant les émissions de GES provenant du sol (N₂O issu des excédents azotés) et de l'animal (CH₄). Toutefois, en prairie très extensive, le stockage de C peut être limité par la faible productivité primaire du système. Un pâturage modéré permet un meilleur stockage de C que la fauche, *via* le retour des litières ariennes (tissus végétaux non consommés) et des déjections au sol.

• Les sous-actions étudiées

A. Allonger la durée de pâturage. La sous-action consiste à rallonger la période de pâturage d'une vingtaine de jours, en sortant les vaches à l'herbe plus tôt au printemps et en les rentrant plus tard en fin d'automne. Le principal effet de cette extension du pâturage est d'accroître la part des déjections au pâturage, moins émettrices de CH₄ et de N₂O que celles produites en bâtiment puis épandues. La sous-action peut être envisagée sans augmentation de la surface d'herbe car elle valorise une biomasse généralement négligée ; elle modifie les rations et donc les émissions de GES des animaux.

B. Accroître la durée des prairies temporaires (PT). Cette sous-action vise à réduire la fréquence des retournements de prairies, ce qui prolonge la phase de stockage de C, et réduit des émissions de CO₂ et de N₂O. La réduction du travail du sol diminue aussi les émissions liées à la consommation de gazole. Cette sous-action n'implique pas d'augmentation des surfaces en PT.

III- Calculs du potentiel d'atténuation et du coût de l'action

• Systèmes et modalités de calcul retenus

Les difficultés tiennent au manque de références régionalisées sur les effets de la conduite des prairies (impacts sur la végétation, le stockage de C...), et à l'absence de données statistiques sur l'utilisation et la gestion des prairies (part des surfaces pâturées par des vaches et type de vaches...) et sur l'alimentation des animaux (nombre de vaches laitières au pâturage...). Ces lacunes conduisent à devoir faire des hypothèses dont la pertinence est parfois difficilement vérifiable.

Les sources statistiques utilisées sont la Statistique agricole annuelle (SAA) 2010 (pour les effectifs bovins et les superficies des différentes catégories de prairies) et l'enquête "Pratiques culturales" 2006 (pour les niveaux de fertilisation et l'âge des PT).

Les modalités de gestion retenues pour effectuer les estimations sont les suivantes.

Sous-action A. L'allongement de 20 jours de la période de pâturage est appliqué aux prairies utilisées par les vaches laitières et mixtes lait/viande, dans des exploitations de plaine dont la surface fourragère principale (SFP) comporte plus de 10% de maïs ; les systèmes plus herbagers sont exclus car ils utilisent souvent déjà au maximum les possibilités de pâturage.

Afin de pouvoir prendre en compte les effets sur le système d'alimentation et les émissions de GES des animaux et des déjections, ce surcroît de pâturage est appliqué aux rations-types décrites par l'Observatoire de l'alimentation des vaches laitières de l'Institut de l'élevage (méthode également utilisée dans l'Action 7). Les rations modifiées par une prolongation de la période de pâturage sont recalculées (avec le modèle CowNex), ce qui permet d'estimer les économies réalisées sur les autres aliments (100-200

C. "Désintensifier" les prairies permanentes et temporaires les plus intensives. L'objectif est une réduction des apports d'azote minéral, qui diminue les émissions de N₂O issues des engrais. Cette baisse des apports, de 10 à 14% en moyenne, est différenciée selon le niveau actuel de fertilisation. Elle devrait avoir peu d'impact sur la production d'herbe dans la mesure où les apports actuels d'azote sur prairies sont souvent excédentaires.

D. Intensifier modérément les prairies permanentes peu productives (pacages, alpages et landes). Il s'agit d'accroître le stockage de C en stimulant la production végétale (limitée par la carence en éléments nutritifs) par un prélèvement d'herbe modéré et un apport accru de déjections (restituant carbone et azote). Le moyen de cette intensification est une augmentation du chargement animal de 20% sur une partie de ces prairies.

• Autres effets de l'action sur les GES

Certaines modifications de la conduite des prairies (niveau de fertilisation, fréquence des retournements, exploitation par le pâturage ou la fauche, gestion des déjections) ont des répercussions sur les consommations d'intrants, émettrices de GES. Elles modifient notamment :

- les émissions directes de CO₂, dégagé par la combustion des carburants fossiles consommés par les engins agricoles (pour la fauche ou l'ensilage, le travail du sol, l'épandage des effluents) ;

- les émissions "induites" de CO₂ et/ou de N₂O liées à la fabrication et au transport des engrais azotés minéraux, du carburant et des d'aliments concentrés achetés (soja notamment).

kg d'ensilage de maïs et d'herbe et 20-40 kg de tourteau de soja par vache, par ex.) ainsi que l'accroissement de la part des déjections émises hors bâtiment.

Sous-action B. La modalité retenue est un allongement à 5 ans de la durée de vie des prairies temporaires, appliqué à toutes les PT ayant 4 ans en 2010, à 80% des PT âgées de 3 ans, à 65% des PT de 2 ans et à 50% de celles d'un an. Ce prolongement de l'exploitation est supposé sans baisse de productivité.

Sous-action C. La réduction de la fertilisation azotée retenue pour "désintensifier" les prairies est de 25% pour une fertilisation annuelle >150 kgN/ha, de 15% pour une fertilisation de 100 à 150 kgN/ha, de 10% pour une fertilisation de 50 à 100 kgN/ha et de 5% pour une fertilisation <50 kgN/ha.

Sous-action D. L'intensification modérée des surfaces en herbe peu productives par une augmentation de 20% du chargement animal est supposée obtenue par le transfert sur ces surfaces d'animaux pâturant des prairies qui pourront alors être fauchées. En l'absence de données statistiques sur l'utilisation de ces surfaces, l'hypothèse retenue est un chargement initial de 0,2 UGB/ha, avec 100 jours de pâturage par an.

• Effets de l'action sur les GES et estimation de son potentiel d'atténuation unitaire

Les atténuations unitaires sont calculées selon la méthode "CITEPA" (application des préconisations 1996 du GIEC), puis selon une méthode "expert" qui utilise :

- pour le stockage de C et les émissions directes de CO₂, de CH₄

et N₂O : les nouvelles valeurs retenues par le GIEC (en 2006) ;
 - pour les émissions indirectes de N₂O au pâturage : la méthode EMEP/EEA (cf. Action 8), qui permet de mieux prendre en compte les différentes formes de l'excrétion d'azote (ammoniac).

Tous les calculs sont effectués par région pour tenir compte de la diversité géographique des stocks de C dans les sols prairiaux, des apports d'engrais minéraux et de l'alimentation des vaches. Les calculs sont ensuite agrégés au niveau national.

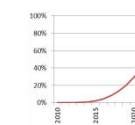
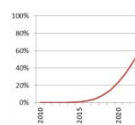
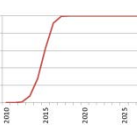
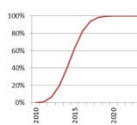
	Sous-actions	A. Durée de pâturage	B. Durée de vie des prairies temporaires	C. Désintensification	D. Pr. peu productives
Contenu technique	Situation initiale	Saison de pâturage ne valorisant pas toute l'herbe disponible	Durées d'exploitation des prairies temporaires (PT) : de 1 à 5 ans, avec 65% de PT < 3 ans	Fertilisation azotée souvent excédentaire	Faible stockage du C à cause d'une faible production primaire. Hypoth.: chargement animal de 0,2 UGB/ha, 100 jours de pâturage (ex. alpage)
	Modification de la gestion	Allongement de la saison de pâturage de 20 jours → modification de la ration, de la localisation des déjections et de la quantité d'effluents à épandre	Allongement à 5 ans de la durée de vie d'une partie des PT	Réduction de la fertilisation minérale, d'autant plus forte que la dose actuelle est élevée	Augmentation de 20% du chargement (0,24 UGB/ha), ce qui économise (ailleurs) 37 kgMS (récoltable en foin)
Potentiel d'atténuation unitaire	Stockage de C kgCO ₂ e/ha/an	-	↘ déstockage par retournement moins fréquent : 520	-	↗ stockage par stimulation de la production primaire : 1416
	Emissions de N ₂ O (directes + indirectes)	↘ émissions liées au stockage et à l'épandage des effluents : 22	↘ émissions liées à la minéralisation de matière organique : 54	↘ émissions liée au moindre apport d'engrais : 52	↗ N ₂ O et NH ₃ issus des pissats liée à une ↗ du chargement animal : -7
	Emissions directes de CO ₂	↘ consommation de carburant : 6	↘ consommation de carburant : 38	-	↗ consommation de carburant : -447
	Emissions de CH ₄ (fermentation entérique et déjections)	↘ fermentation entérique et des déjections : 22	-	-	↗ fermentation entérique et des déjections liée au chargement : -22
	Total émissions directes + indir.	50 kgCO₂e/ha/an [62 kgCO ₂ e/VL/an]	612	52	940
	Emissions induites (amont) de CO ₂ et N ₂ O	↘ carburant (récolte herbe, épandage effluents), ↘ soja importé : 3 kgCO ₂ /ha/an ; 4kgCO ₂ /VL/an	↘ carburant (par ↘ labour) : 8	↘ engrais minéraux : 48	↗ carburant : -90
	Total kgCO₂e/ha/an	53 [66 kgCO ₂ e/VL/an]	620	100	850
Coût unitaire	Modification des consommations	↘ travaux de fauche/ensilage ↘ consommation d'aliments concentrés ↘ coût d'épandage des effluents : -11 €/ha, -13 €/VL	↘ travail du sol et implantation (préparation du sol, semences) : -112 €/ha	↘ engrais : -8 €/ha	Récolte en foin (36 €/tMS) de l'herbe économisée ailleurs : 1,3 €
	Modification des productions	↘ production de lait en période hivernale : 0,90 €/ha ; 1,14€/VL Economie d'ensilage de maïs → vente de maïs grain : -15 €/ha ; -18 €/VL	-	-	Vente de foin (144 €/tMS) : 5,3 €
	Total €/ha	-26 €/ha (-30 à -15) [-32 €/VL (-37 à -20)]	-112 €/ha (-121 à -103)	-8 €/ha (-11 à -6)	-4 €/ha (-4 à -2)
Assiette	Assiette théorique	Les prairies pâturées : 10,8 Mha 3,7 Mtêtes	Les prairies temporaires : 2,6 Mha	Toutes les prairies	Les prairies peu productives : 2,5 Mha
	Critères techniques	Prairies pâturées par des vaches laitières ou mixtes lait/viande Exclusion des élevages où maïs <10% de la SFP	Exclusion des PT ≥ 5 ans, et des 40% de PT en rotation avec le maïs (0,4 Mha)	Prairies recevant de l'engrais minéral	Prairies situées à proximité d'autres pâtures de l'exploitation : hypoth. que condition remplie dans 20% des cas
	Ass. maximale technique (AMT)	4,0 Mha (37% des surfaces pâturées). 3,14 Mtêtes	1,8 Mha	8,9 Mha, dont 2,4 Mha de PT et 6,4 Mha de PP	0,5 Mha
Scénario de diffusion	Etat de référence 2010	0%	0%	0%	0%
	Scénario de diffusion	98,5% de l'AMT en 2030 	99% de l'AMT en 2030 	100% de l'AMT en 2030 	100% de l'AMT en 2030 

Tableau 2

Effets visés :

. **L'augmentation du stockage de carbone**, qui peut résulter d'un allongement de la durée de stockage (retournement différé de la prairie), pour la sous-action B, ou d'un accroissement de la production primaire, pour D. Le stockage additionnel et le déstockage induit par le retournement sont calculés en faisant varier la valeur de facteurs d'émission traduisant les effets de la conduite de la prairie (type de gestion, niveau d'intrants, travail du sol).

. **La réduction des émissions de N₂O** (directes et indirectes) liées à l'apport d'engrais (C) et à la gestion des déjections (A, D), qui diffèrent selon qu'elles interviennent au pâturage, en bâtiment ou à l'épandage. Pour A, les émissions indirectes sont calculées en utilisant la méthode EMEP/EEA, qui fournit des facteurs d'émission plus précis pour l'ammoniac.

. **La réduction des émissions de CH₄** liées à la fermentation entérique (A et D) ou à la fermentation des déjections (moins élevée au pâturage qu'en bâtiment et lors de l'épandage). Ces émissions sont calculées avec les nouvelles valeurs retenues par le GIEC (en 2006) pour certains facteurs d'émission dépendant du poids de l'animal et de sa consommation alimentaire (au pâturage et en bâtiment).

Autres effets comptabilisés :

. **La modification des émissions directes de CO₂** liées à l'utilisation des engins agricoles, lorsque la sous-action implique une diminution ou une augmentation des travaux de récolte de l'herbe (A et D), une réduction des épandages de déjections (A) ou de travail du sol (B). Ces émissions sont calculées avec les données de la base Dia'terre® - Ges'tim.

. **La réduction des émissions induites** (en amont de l'exploitation) liées à la fabrication et au transport des carburants (toutes les sous-actions), des engrais azotés minéraux (C), ou des

aliments importés (A : soja). Ces émissions sont estimées en utilisant les données de la base Carbone®.

• Estimation du coût unitaire pour l'agriculteur

Les coûts/gains comprennent :

- les économies d'intrants, liées à une baisse de la fertilisation (C) ou à du pâturage supplémentaire réduisant les achats d'aliments concentrés (A) ;
- les modifications de travaux : fauche ou ensilage évités (parce que l'herbe est pâturée ; A) ou supplémentaires (récolte de l'herbe économisée par du pâturage sur une autre prairie ; D) ; labour et travaux d'implantation de PT moins fréquents (B) ;
- les ventes de maïs (A) ou de foin (D), permises par l'économie de fourrage réalisée grâce au pâturage supplémentaire ;
- la perte de production laitière en période hivernale du fait d'une alimentation à base d'herbe (A).

• Estimation de l'impact à l'échelle nationale

Assiette maximale technique (AMT)

Les critères techniques mobilisés pour définir ces assiettes portent sur : l'affectation des prairies et les systèmes d'élevage dont elles relèvent (A : pâturage par des vaches laitières et mixtes lait/viande, dans des systèmes utilisateurs de maïs ensilage) ; l'âge des prairies temporaires et les rotations dans lesquelles elles s'insèrent (B) ; le niveau actuel de fertilisation minérale (C) et la localisation des prairies peu productives (D : situation à proximité d'autres pâtures de la même exploitation, permettant le transfert de quelques animaux).

Scénario de diffusion de l'action

Les sous-actions étant économiquement intéressantes pour les éleveurs et relativement faciles à mettre en œuvre, les hypothèses retenues sont une application à toute l'AMT en 2030 pour les sous-actions A, B et C, et dès 2020 pour D.

IV- Résultats et mise en perspective

	Unités	Année 2030					Cumul sur la période 2010-2030			
		A	B	C	D	Total	A	B	C	D
Potentiel d'atténuation, calcul "CITEPA" (sans émissions induites)	Unités	0,1	0,09 (a)	0,7	0,5	1,3	0,9	0,18 (a)	12,2	7,0
Potentiel d'atténuation, calcul "expert"	Sans émissions induites	0,2 (0,1 à 0,2)	1,44 (0,5 à 1,2)	0,5 (0,2 à 0,9)	0,5 (0,3 à 1,5)	2,5 (1,1 à 3,6)	1,5 (0 à 0,2)	13,9 (9,8 à 28,0)	7,6 (3,5 à 14,5)	7,3 (4,4 à 21,0)
	Avec émissions induites	0,2 (0,1 à 0,2)	1,5 (0,5 à 1,6)	0,9 (0,6 à 1,3)	0,4 (0,2 à 1,3)	3,0 (1,5 à 4,0)	1,6 (0,1 à 0,3)	14,0 (10,0 à 28,1)	14,6 (10,5 à 21,6)	6,5 (3,7 à 20,3)
Coût total pour les agriculteurs	M€	-101 (-118 à -61)	-265 (-285 à -243)	-70 (-99 à -48)	-1,9 (-2 à -1)	-437 (-504 à -353)	-789 (-922 à -474)	-2546 (-2742 à -2338)	-1150 (-1625 à -783)	-31 (-33 à -16)
Coût de la tonne de CO ₂ e pour l'agriculteur (calcul "expert", sans émissions induites)	€/CO ₂ e	-515	-184	-152	-4	-172	-	-	-	-

(a) prise en compte uniquement du carburant
M : million

Tableau 2

• Les résultats

Toutes les sous-actions ont un coût négatif. Concernant les gains par tonne de CO₂e évité, les plus intéressantes sont : l'allongement de la durée annuelle de pâturage (A), le prolongement de la durée vie des PT (B) et la "désintensification" des prairies (C).

Sur le plan de l'atténuation des émissions (hors émissions induites) obtenue sur l'AMT et la période 2010-2030, les sous-actions les plus intéressantes à mettre en œuvre sont l'allongement de la durée de vie des PT (B), puis la désintensification (C) et l'intensification (D).

La comparaison avec les résultats d'autres études équivalentes (Irlande, Grande-Bretagne...) confirme ces résultats concernant l'allongement de la durée annuelle de pâturage, la désintensification (C) et l'allongement de la durée de vie des PT (B).

• La sensibilité des résultats aux hypothèses

Dans le cas des émissions de N₂O, il existe un écart important entre les deux méthodes de calcul utilisées.

Par ailleurs, plusieurs hypothèses fortes, ayant un impact important sur les résultats, ont dû être formulées concernant la valorisation actuelle et possible de l'herbe, ainsi que ses impacts sur d'autres postes du système.

La sous-action A suppose que les élevages de plaine visés sous-utilisent le pâturage et consomment plus d'ensilage de maïs ou d'herbe et de tourteau de soja que nécessaire, ce qui n'est pas toujours le cas. Elle considère ensuite que le pâturage supplémentaire permet d'économiser de l'ensilage de maïs, et de produire à la place du maïs grain – dans des conditions de rendement et de prix de vente plutôt favorables. L'économie d'alimentation à l'étable (12,5 €/VL) calculée sur ces bases représente 40% du gain unitaire de la sous-action.

Pour les sous-actions B et C, l'hypothèse forte est que le prolongement de la durée d'exploitation des PT et la réduction de la fertilisation minérale n'induisent pas de baisse de rendement ; or une telle baisse aurait une incidence économique importante (recours à des fourrages ou des aliments concentrés achetés, baisse des productions animales...).

La sous-action D suppose l'existence initiale d'herbe sous-utilisée, dont la consommation dégage, ailleurs, un surplus d'herbe utilisable pour la production de foin ; cette production est estimée d'après des hypothèses (de rendement, de coût de récolte, de prix de vente et d'accessibilité des parcelles) favorables.

Néanmoins, les calculs réalisés avec des valeurs basse et haute pour diverses variables ne modifient pas les ordres de grandeur des gains unitaires pour l'agriculteur, et des "coûts" (négatifs) de la tonne de CO_{2e} évité.

• Les conditions d'une prise en compte de l'action dans l'inventaire national

Comptabilisation de l'effet

L'inventaire actuel du CITEPA ne prend pas en compte les changements de stocks de C des prairies. Il existe cependant un mode de calcul *tier 1* tenant compte des conditions agronomiques et pédo-climatiques que la France pourrait éventuellement utiliser, et la méthode développée ici pourrait servir de base à un calcul *tier 2*.

L'amélioration du bilan de GES liée à l'augmentation de la durée de pâturage ne ressort pas avec la méthode actuelle du CITEPA car les émissions gazeuses de N₂O au pâturage y sont considérées comme aussi importantes que pour la séquence bâtiments-stockage-épandage des déjections. La méthode EMEP/EEA utilisée pour estimer plus précisément les émissions indirectes de N₂O montre en revanche un effet significatif (réduction) de l'augmentation du pâturage.

Vérifiabilité de la mise en œuvre

Les changements de conduite des prairies sont difficiles à connaître, et plus encore à vérifier, comme la plupart des modifica-

tions de pratiques de gestion. Seules les durées de vie des prairies temporaires figurent dans les statistiques agricoles annuelles. Les données statistiques sur le mode d'exploitation des prairies font défaut : l'enquête quinquennale "Pratiques culturales" ne spécifie pas les modalités de pâturage (type d'animal et chargement) et ne renseigne pas les prairies permanentes.

• Les contextes et mesures susceptibles de favoriser le déploiement de l'action

Depuis 30 ans, malgré des soutiens (dont la prime à l'herbe depuis 1993), une diminution régulière des surfaces en prairie est observée (12,8 Mha en 1980 contre 7,4 Mha en 2010), au profit du maïs ensilage et des céréales (surfaces de culture plus émettrices de GES). Une réduction de la fréquence de retournement des PT et de l'utilisation d'engrais pourrait être favorisée par une reconnaissance par le marché de la qualité (label environnemental, Appellation d'origine protégée...).

• Les autres effets de l'action

Les surfaces prairiales contribuent à la multifonctionnalité des élevages (biodiversité, esthétique des paysages) et à la réduction de leurs impacts environnementaux (qualité de l'eau...).

L'allongement de la période de pâturage réduit la quantité de déjections produites en bâtiment et donc disponibles pour la méthanisation ou pour l'épandage sur des surfaces où elles sont susceptibles d'être remplacées par des engrais minéraux.

• Vulnérabilité et adaptabilité de l'action au changement climatique

L'évolution du climat (événements extrêmes) et le changement d'utilisation des terres sont susceptibles d'avoir un effet important sur le stockage de C des prairies, *via* une accélération de la décomposition de la matière organique de sol (suite au retournement, température élevée).

• Conclusions

Toutes les sous-actions examinées sont de type "gagnant-gagnant" (les pratiques proposées pour améliorer le bilan de GES sont aussi économiquement intéressantes), et semblent faciles à mettre en œuvre. Le fait qu'elles ne soient néanmoins pas adoptées spontanément par les éleveurs implique l'existence de freins.

Sous-action A : L'astreinte de sortir les vaches pendant la journée à des périodes où les conditions météorologiques restent aléatoires apparaît souvent comme un frein. Ce pâturage précoce aide toutefois à réguler la croissance de l'herbe au printemps, et il permet d'économiser de l'ensilage et des tourteaux. Cette pratique conduit à de faibles économies de GES, mais le gain par tonne de CO_{2e} évité apparaît très élevé.

Sous-actions B et C : Le risque de légère baisse des rendements et des stocks fourragers peut dissuader l'agriculteur à mettre en œuvre ces actions. Mais leurs fortes économies financières et en GES apparaissent comme un atout qui pourrait compenser cette baisse potentielle du rendement.

Sous-action D : Même si cette action semble facile à mettre en œuvre, le faible gain économique pour l'éleveur et l'astreinte d'un travail supplémentaire (déplacement d'animaux et fauche) peuvent apparaître comme un frein.



7

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

↘ CH₄

- A. Substituer des glucides par des lipides insaturés dans les rations
- B. Ajouter un additif (à base de nitrate) dans les rations

I- Enjeu et principe de l'action

Les émissions de méthane (CH₄) entérique (produit presque exclusivement par les ruminants) représentent 29 millions de tonnes de CO₂ équivalent (MtCO₂e) en 2010, soit 27% des émissions de GES du secteur agricole et 5% du total des émissions françaises.

La digestion des glucides dans le rumen s'accompagne de la production de dihydrogène (H₂) qui est transformé en CH₄ par des microorganismes méthanogènes. Il est possible d'orienter le fonctionnement du rumen vers des voies métaboliques moins

productrices de méthane, par des modifications limitées de la ration des animaux.

L'action examine deux modifications de la ration : (A) l'ajout de lipides (en remplacement d'une partie des glucides) ou (B) d'un additif à base de nitrate. Ces techniques ne sont appliquées qu'aux animaux dont la ration peut être aisément modifiée par l'éleveur (alimentation au moins en partie à l'étable). Seuls les bovins sont visés - les autres ruminants, ovins et caprins, ne représentant que 7% des émissions entériques françaises.

II- Mécanismes et modalités techniques de l'action

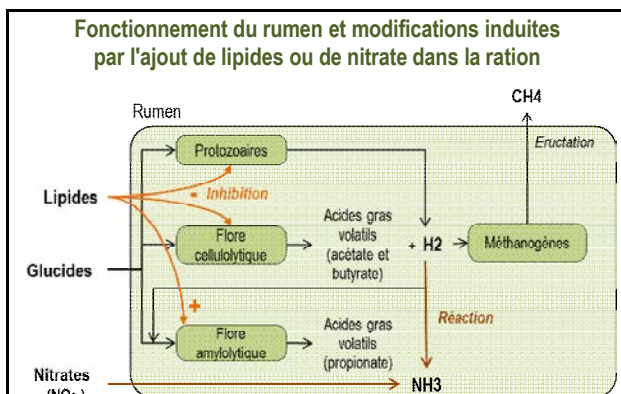
L'émission de CH₄ correspond à l'élimination du H₂ produit dans le rumen par la dégradation des glucides ; sa réduction peut être obtenue par une moindre production de H₂ ou par l'élimination de ce H₂ sous une autre forme que le CH₄. Ces effets peuvent être produits, respectivement, par l'incorporation à la ration de lipides ou d'un additif (Figure). Ces modifications de la ration doivent respecter certaines règles.

• Les sous-actions étudiées

L'ajout de lipides

Diverses huiles et graines oléagineuses entières (brutes ou extrudées) sont utilisables comme sources de lipides ; certaines présentent des compositions en acides gras particulières, considérées comme ayant un intérêt nutritionnel pour les consommateurs

(richesse en acides gras insaturés de type oméga 3, notamment). L'incorporation de lipides est plafonnée par des limites nutritionnelles (trop de lipides peut diminuer la digestibilité de la cellulose et modifier excessivement la composition en acides gras des produits), par des contraintes technologiques (taux maximum d'incorporation d'huile dans les aliments concentrés) et par des considérations pratiques pour la distribution aux animaux (produits extrudés facilement manipulables). Le choix des sources de lipides doit privilégier les moins coûteuses pour l'éleveur (colza) et tenir compte de leur disponibilité actuelle ou potentielle (la culture du lin a de bonnes probabilités de développement). Un recours partiel à la graine de lin (riche en oméga-3) est retenu, bien qu'elle soit plus chère que celle de colza. La matière sèche de la ration modifiée est enrichie de 3 à 3,5% de lipides insaturés selon les catégories d'animaux (apport plus faible pour les animaux recevant peu d'aliment concentré).



La fermentation des glucides par la flore cellulolytique et les protozoaires produit du H₂, alors que cette fermentation par la flore amylolytique en utilise. Le H₂ restant est transformé en CH₄ par les méthanogènes.

A. Les populations de bactéries cellulolytiques et de protozoaires sont réduites par la présence de **lipides insaturés**, ce qui diminue la production de H₂ et favorise son utilisation dans les voies biochimiques privilégiées par la flore amylolytique.

B. Une partie du H₂ est transformée en NH₃ par réaction avec le **nitrate**, qui limite sa disponibilité et donc la production de CH₄.

L'ajout d'un additif

Cet additif doit avoir un effet démontré *in vivo* et à long terme. Le seul dans ce cas est, jusqu'à présent, le nitrate, qui capte le H₂ produit. Les expérimentations *in vivo* ont validé des doses de 1,7 à 2,6% de nitrate dans la ration. Un excès de nitrate pouvant être toxique pour l'animal (accumulation de nitrites), il est impératif de limiter les risques de surdosage, et donc que l'incorporation dans les aliments composés soit effectuée par l'industrie de l'alimentation animale. L'ajout ne devant pas induire d'augmentation des pertes azotées, il faut substituer le nitrate à l'urée ou à une partie des tourteaux dans des régimes carencés en azote fermentescible (c'est-à-dire à base d'ensilage de maïs). L'hypothèse retenue est une ration modifiée par l'addition de 1% de nitrate.

A l'heure actuelle, aucun essai *in vivo* publié n'a combiné l'utilisation de lipides insaturés avec celle de nitrate. A notre connaissance, des essais sont en cours, mais les résultats ne seront disponibles que fin 2013. Les 2 sous-actions sont *a priori* cumulables car elles font appel à des processus indépendants.

• Autres effets de l'action sur les GES

La substitution d'ingrédients dans la ration (sous-action A) modifie la demande de matières premières agricoles, produites en France (graines oléagineuses et céréales) ou importées (tourteau de soja),

et a donc des répercussions sur les émissions de GES "induites" (en amont de l'exploitation).

Ce levier d'atténuation n'a pas d'effet sur l'action "Réduire les apports protéiques dans les rations animales pour limiter les teneurs

en azote des effluents et les émissions de N₂O associées", car on ne modifie pas sensiblement les quantités d'azote excrété dans les déjections.

III- Calculs du potentiel d'atténuation et du coût de l'action

• Systèmes et modalités de calcul retenus

Tous les calculs sont effectués en différenciant des catégories de bovins (15 catégories issues de la nomenclature Statistique agricole annuelle - SAA), subdivisées en fonction de la quantité de concentrés reçue par les animaux (sur la base de la typologie de rations élaborée par l'Observatoire de l'alimentation des vaches laitières de l'Institut de l'élevage). Les effectifs bovins sont ceux de SAA 2010.

La méthode de calcul du CITEPA pour les émissions de 2010 est fondée sur l'application de facteurs d'émission adaptés aux caractéristiques de l'élevage français (c'est-à-dire spécifiques à chaque catégorie d'animaux), mais qui ne peuvent prendre en compte des effets de la modification de la ration. Une méthode de calcul "expert", fondée sur des données de la littérature scientifique, est proposée : des **coefficients correcteurs sont appliqués aux émissions calculées selon la méthode du CITEPA**, en fonction de la quantité de lipides ou de nitrate ingérés.

• Effets de l'action sur les GES et estimation de son potentiel d'atténuation unitaire

Effet visé :

. **La réduction des émissions de CH₄** de la fermentation entérique. Elle est estimée en calculant les émissions avec la méthode "CITEPA", puis en les corrigeant à l'aide du coefficient tenant compte de la ration modifiée, pour les jours de l'année où l'aliment concentré est effectivement distribué à plus de 1 kg/j.

Autre effet comptabilisé :

. **La modification des émissions induites**, liée à la substitution de matières premières agricoles dans la ration. Elle est calculée en comptabilisant les changements d'émissions de GES dus au fait que les productions de cultures oléagineuses et céréalières n'ont pas les mêmes émissions. L'estimation est fondée sur des données ACV standards, fournies par la base Dia'terre® - Ges'tim pour les céréales et les tourteaux, ou sur des données INRA pour les oléagineux (non renseignés dans Dia'terre® - Ges'tim). Un facteur d'émission agrégeant les différents effets est affecté à chaque aliment, et les calculs tiennent compte du nombre de jours où le concentré est donné (-2 mois de tarissement des vaches par ex.)

Effets négligés :

- Les effets possibles sur la **fermentation des déjections** (↗ CH₄) **et les rejets azotés** (↗ N₂O). En réduisant la digestibilité des glucides, les lipides pourraient accroître la matière organique non digérée et donc la quantité de CH₄ produit par la fermentation des déjections : ces effets sont mal connus, mais limités par les hypothèses retenues pour la constitution des rations modifiées. Pour la sous-action B, l'hypothèse retenue d'un ajout de nitrate compensé par une réduction de l'apport d'urée conduit à un effet limité sur la quantité d'azote fermentescible dans le rumen et donc sur les pertes d'azote par l'urine.

- La consommation d'énergie (émettrice de CO₂) associée à la fabrication de l'additif (nitrate de calcium et d'ammonium) est négligée car elle se substitue à la fabrication d'urée.

• Estimation du coût unitaire pour l'agriculteur

Il s'agit du coût associé à la modification de composition de la ration ; le mode de distribution est identique, donc sans surcoût d'équipement ou de travail pour l'éleveur.

Substitution d'aliments : le coût de la substitution d'une partie des glucides de la ration par des lipides est calculé aux prix 2010 des graines oléagineuses et des huiles, sachant que les cours des matières premières agricoles sont devenus très volatils.

Achat de l'additif : le **produit n'étant pas commercialisé actuellement**, une hypothèse de prix a été déterminée pour l'étude ; l'ajout de nitrate s'accompagne d'un moindre achat d'urée.

Le développement de la technique (additif) et la nécessaire formation des éleveurs (lipides et nitrate) étant assurés par les firmes d'alimentation du bétail, aucun coût supplémentaire n'est à prévoir pour l'agriculteur.

• Estimation de l'impact à l'échelle nationale

Assiette maximale technique (AMT)

L'action s'applique à la fraction du cheptel bovin dont la ration peut être modifiée par l'éleveur, c'est-à-dire aux animaux qui reçoivent des aliments concentrés en bâtiment. Les sous-populations identifiées pour les 2 sous-actions sont : la majorité du troupeau laitier et une partie du troupeau allaitant pour la première, et une partie des vaches laitières et des taurillons des troupeaux laitiers et allaitants pour la seconde.

Scénario de diffusion de l'action

Pour les **lipides**, aucun frein à la diffusion de la technique n'a été identifié (aucun segment de marché du lait ou de la viande n'interdit l'emploi des sources de lipides sélectionnées pour cette action). L'accessibilité des ingrédients n'est pas limitante : en cas d'indisponibilité de l'une des sources lipidiques (colza, soja ou lin), le recours à d'autres matières premières est toujours possible. L'hypothèse retenue est donc l'atteinte du maximum dès 2022.

Pour le **nitrate** en revanche, vitesse et maximum d'adoption sont limités :

- la technique n'est considérée applicable qu'à partir de 2015 (disponibilité des additifs). A noter qu'une partie de la mise en œuvre de la technique est protégée par un brevet, ce qui peut constituer une limitation pour les fabricants d'aliments.

- l'acceptabilité de la méthode pourrait être médiocre (technique "industrielle", connotation négative du mot "nitrate", risque d'accidents dus à un surdosage), freinant son adoption par les éleveurs ou en faisant une technique non admissible dans certains cahiers des charges de production (Agriculture biologique, Appellation d'origine protégée...).

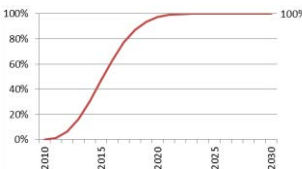
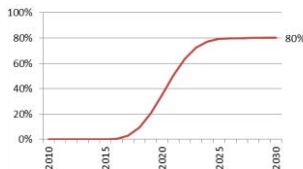
	Sous-actions	A. Substitution glucides/lipides	B. Ajout de nitrate dans les rations
Contenu technique de l'action	Situation initiale	La ration moyenne de référence contient 1,5% d'acides gras dans la matière sèche et ne comporte pas de nitrate sous forme d'additif . Les rations de référence et modifiées sont considérées par catégorie d'animaux	
	Modification de la ration	La ration modifiée contient 4,5 à 5% d'acides gras dans la matière sèche (+3 à 3,5% par rapport à la référence) Deux options techniques couplées dans les calculs : Graines oléagineuses extrudées substituées aux glucides (50% lin, 50% colza) ; pour compléter si nécessaire : Huiles incorporées dans un aliment concentré (50% soja, 50% colza)	La ration modifiée contient 1% de nitrate (sous forme de nitrate de calcium). ! Un surdosage fort constitue un risque pour la santé de l'animal ; un surdosage plus faible accroît les pertes azotées urinaires. Il est indispensable que la ration soit produite par des fabricants pour éviter les surdosages.
Potentiel d'atténuation unitaire	Emissions de CH ₄ (fermentation entérique)	Méthode "CITEPA" : La modification de la ration n'a pas d'effet sur la valeur des facteurs d'émissions utilisés à l'heure actuelle dans les calculs du CITEPA. Méthode "expert" : Calcul de l'atténuation des émissions pour chaque catégorie d'animaux :	
		-14% de CH₄ pour +3,5% de lipides dans la ration (-4% pour +1% de lipides)	-10% de CH₄ pour 1% de nitrate dans la ration
	Total direct + indirect kgCO _{2e} /animal/an	Vaches laitières : 401 Vaches allaitantes et jeunes bovins de 1 à 2 ans : 240 à 320 Autres catégories : < 240	Vaches laitières : 289 Jeunes bovins : 203
	Emissions induites de CO ₂ (amont)	Modification de la composition de la ration ▲ Valeurs nettement plus faibles avec les données INRA que Dia'terre® - Ges'tim	
	↗ des émissions Vaches laitières : 191 Vaches allaitantes, jeunes bovins de 1 à 2 ans et bœufs > 2 ans : 100 à 130 Autres catégories : < 130	pas d'émissions induites	
Total kgCO _{2e} /animal/an	Vaches laitières : 210 Vaches allaitantes et jeunes bovins de 1 à 2 ans : 100 à 200 Autres catégories : < 100	Vaches laitières : 289 Jeunes bovins : 203	
Coût unitaire	Coût de la ration	Substitution d'une partie des glucides de la ration par des lipides ▲ Calcul sensible aux hypothèses de prix des matières premières agricoles	Achat du nitrate et économie d'urée
	Total €/animal/an	Vaches laitières : 109 Autres animaux > 12 mois : 47 à 78	Vaches laitières : 11,6 Jeunes bovins (troupeau laitier) : 6,8 Jeunes bovins (troupeau allaitant) : 5,7
Assiette	Assiette théorique	Tous les bovins (sauf veaux de boucherie) : 18 716 000 équivalent animaux	
	Critères techniques	Animaux recevant des aliments concentrés en bâtiment Quantité d'aliments concentrés reçus > 1 kg/jour Au cours de la période où ils reçoivent l'aliment concentré en bâtiment	Animaux recevant des aliments concentrés en bâtiment Animaux ayant des rations carencées en azote fermentescible (i.e. à base d'ensilage de maïs)
	Assiette Maximale Technique (AMT)	Tous bovins répondant aux critères ci-dessus , au prorata de la durée pendant laquelle leur ration est modifiée, soit 6 595 000 équivalent animaux	3 469 000 bovins : 2 990 000 vaches laitières 200 000 taurillons du troupeau laitier 279 000 taurillons du troupeau allaitant
Scénario de diffusion	Etat de référence 2010	5% des vaches laitières reçoivent une ration enrichie en lipides (cas des animaux forts producteurs)	Aucune vache ne reçoit de nitrate dans sa ration
	Scénario de diffusion	Hypothèses : Pas de freins à la diffusion → 100% de l'AMT sont atteints dès 2022 	Hypothèses : additif supposé disponible seulement en 2015 (sous réserve de l'AMM) et freins à la diffusion → 80% de l'AMT sont atteints en 2030 

Tableau 1

IV- Résultats et mise en perspective

	unités (M : millions)	Année 2030			Cumul sur la période 2010-2030	
		Lipides	Nitrate	Total 2 sous-actions	Lipides	Nitrate
Potentiel d'atténuation* (méthode "CITEPA") Sans émissions induites		0	0	0	0	0
Potentiel d'atténuation* (méthode "expert")	Sans émissions induites	1,9 (1,5 à 2,3)	0,5 (0,4 à 0,9)	2,4 (1,9 à 3,1)	27,0 (21,6 à 32,4)	4,5 (3,6 à 8,0)
	Avec émissions induites	1,0 (0,7 à 1,4)	0,5 (0,4 à 0,9)	1,5 (1,0 à 2,3)	14,7 (9,3 à 20,1)	4,5 (3,6 à 8,0)
Coût total pour les agriculteurs	M€	505,9	18,4 (18,4 à 27,6)	524,3 (524,3 à 533,5)	7209,2	170,1 (170,1 à 255,1)
Coût de la tonne de CO₂e pour l'agriculteur (méthode "expert", sans émissions induites)	€/tCO ₂ e	267 (223 à 335)	38 (32 à 48)	221	-	-

* Le potentiel d'atténuation est fourni avec des valeurs hautes et basses, liées au pourcentage d'atténuation par unité de lipides ou de nitrate apportée, et à la dose de nitrate apportée (la dose de lipides apportés étant constante).

Tableau 2

• Les résultats

Le potentiel d'atténuation pour l'ensemble de l'action est de 2,4 MtCO₂e/an en 2030 lorsque les lipides et le nitrate sont développés sur respectivement 100% et 80% de l'AMT. Cependant, cette atténuation est réduite à 1,5 Mt lorsque les effets induits en amont de l'exploitation sont pris en compte.

Cette prise en compte, ou non, des émissions "induites", c'est-à-dire intervenant en dehors de l'exploitation, modifie considérablement le potentiel d'atténuation de la sous-action "Lipides" (atténuation potentielle réduite de presque 50%), tandis que les effets induits par la sous-action "Nitrate" sont négligeables.

Le coût de la tonne de CO₂e pour l'agriculteur apparaît particulièrement élevé pour la sous-action "Lipides" (267 €/tCO₂e) par rapport à la sous-action "Nitrate" (38 €) : cela est dû au différentiel de prix entre les céréales (de l'ordre de 200-250 €/t) et les oléagineux (plus de 400 €/t). Le coût de l'action serait réduit par la seule utilisation de la graine de colza, moins onéreuse pour une atténuation similaire.

L'ajout de lipides ou d'un additif à la ration n'a été examiné par aucune des autres études disponibles. Celles réalisées en Irlande et aux États-Unis ne proposent pas de mesures spécifiques pour diminuer le méthane entérique. L'étude britannique a envisagé cet objectif mais elle a retenu comme options l'amélioration génétique de la productivité et de la fertilité, considérée ici comme une pratique en cours ne nécessitant pas d'inflexion, et l'utilisation d'antibiotiques ionophores, bannie dans l'UE.

• La sensibilité des résultats aux hypothèses

Incertitudes sur les émissions induites :

Le niveau de ces émissions dépend fortement des références choisies : les calculs ont été effectués avec, pour les céréales, les valeurs de la base Dia'terre® - Ges'tim ; avec les données de la base publiées par l'INRA, l'estimation des émissions induites est trois fois plus faible.

Les émissions induites sont très sensibles à la nature des graines oléagineuses (atténuation d'émission plus forte avec le colza qu'avec le lin) et des tourteaux auxquels elles se substituent (atténuation d'émission beaucoup plus forte avec une substitution du soja par rapport à un mélange de tourteaux).

Sensibilité au coût des matières premières agricoles :

Sous-action "Lipides" : l'optimisation de la composition de la

ration et son coût sont très dépendants des cours des matières premières. Le coût de l'action pourrait donc être sensiblement modifié par un renchérissement global, tel qu'observé depuis quelques années, ou une évolution des prix relatifs des différentes productions (liée par exemple à une demande accrue pour certaines graines). Toutefois ces variations de prix ont un impact plus faible que l'incertitude sur les empreintes carbone.

Sous-action "Nitrate" : si l'hypothèse d'un coût du kg d'urée variant peu dans l'avenir paraît robuste, celle retenue pour le nitrate est en revanche sujette à discussion ; un prix plus faible de la source de nitrate, qui rendrait cet apport d'azote fermentescible dans la ration moins cher qu'avec l'urée, pourrait entraîner un gain financier pour l'éleveur.

• Les conditions d'une prise en compte de l'action dans l'inventaire national

Comptabilisation de l'effet

Tel qu'il est mis en œuvre actuellement (émissions forfaitaires par animal), le mode de calcul "CITEPA" ne permet pas de rendre compte de l'atténuation escomptée par cette action. Une concertation avec le CITEPA permettrait cependant une prise en compte au moins pour les lipides.

Vérifiabilité de la mise en œuvre

Un suivi de la mise en œuvre peut se faire à partir de données fournies par les firmes productrices de suppléments lipidiques ou de nitrate. Toutefois, le contrôle ne sera possible que si ces fabricants différencient les quantités produites pour les ruminants de celles destinées aux monogastriques dans le cas des lipides, et le nitrate en tant qu'engrais et en tant qu'additif pour ruminants.

• Les contextes et mesures susceptibles de favoriser le déploiement de l'action

L'ajout de lipides insaturés, coûteux pour l'éleveur, pourrait être favorisé par une reconnaissance par le marché de la qualité spécifique du lait et de la viande produits (rémunération de l'amélioration de la composition en acides gras qui compenserait le surcoût). Une démarche de ce type valorise déjà l'incorporation de graine de lin via une allégation "santé" (produits présentant un profil lipidique enrichi en oméga 3, plus conforme aux recommandations nutritionnelles actuelles).

- **Vulnérabilité et adaptabilité de l'action au changement climatique**

A priori, la mise en œuvre de cette action ne dépend pas du changement climatique, et le problème de vulnérabilité ne se pose pas pour un changement de composition de la ration.

- **Les autres effets de l'action**

Sous-action "lipides" : les effets sur la santé humaine ne devraient pas être négatifs car les acides gras sélectionnés pour la sous-action ont des chaînes non saturées. Il n'y a pas d'effet connu sur la santé animale.

Sous-action "nitrate" : un risque pour la santé de l'animal n'existe que si l'éleveur ne respecte pas les conditions d'emploi proposées et dépasse de 2 fois la dose prescrite, ou ne respecte pas une période d'adaptation à la distribution de nitrate.

- **Conclusions**

Ces résultats montrent en premier lieu la possibilité d'atténuation importante des émissions suite à l'apport de lipides, trois fois plus élevée que celle du nitrate en atténuation cumulée, et en second lieu le coût très élevé de cette mesure, en particulier par rapport au nitrate. Toutefois il faut souligner la très grande sensibilité des résultats, d'une part aux variations de coût des matières premières, d'autre part aux estimations d'empreinte carbone liée à la production de ces matières premières. Si le nitrate, dont l'autorisation de mise sur le marché n'est pas acquise, est commercialisé à un prix raisonnable, et si le mode de distribution par incorporation aux aliments du bétail est maîtrisé, il pourrait constituer une technique efficace d'atténuation. Jusqu'à présent, les autres pistes d'atténuation du méthane entérique n'ont pas été retenues. Il est possible que dans quelques années un additif ou un mélange d'additifs autres que le nitrate se révèlent efficaces.



↘ N₂O

8

Réduire les apports protéiques dans les rations animales pour limiter les teneurs en azote des effluents et réduire les émissions de N₂O associées

A. Réduire la teneur en protéines des rations des vaches laitières

B. Réduire la teneur en protéines des rations des porcs et des truies

I- Enjeu et principe de l'action

Les émissions de N₂O associées à la gestion des effluents sont évaluées à 5,2 millions de tonnes de CO₂ équivalent (MtCO_{2e}) pour l'ensemble des élevages en 2010, soit 4.9 % des émissions agricoles. Ces émissions interviennent en bâtiment, au pâturage, ou pendant le stockage et après épandage des effluents. Elles proviennent de l'azote alimentaire non fixé par l'animal, qui est excrété par voie fécale (sous une forme relativement stable), mais surtout par voie urinaire sous forme d'urée, qui est très instable et se volatilise facilement en ammoniac (NH₃) et peut donner lieu à des émissions de N₂O lors de transformations ultérieures.

Pour réduire ces émissions, les niveaux d'azote ingéré et donc excrété peuvent être diminués conjointement en ajustant mieux la

quantité de protéines apportées aux besoins des animaux, et en améliorant la qualité de ces protéines et donc leur rendement d'utilisation. L'objectif de l'action est de mettre en œuvre cette stratégie en affectant peu ou pas la production.

L'action est appliquée aux vaches laitières et aux porcins, qui reçoivent des quantités importantes d'aliments protéiques dont il est facile de maîtriser la distribution. Les autres bovins sont exclus en raison du manque de références sur les pratiques d'alimentation, les ovins et caprins parce que leurs effectifs sont faibles. Pour les volailles, les pratiques de réduction des apports azotés sont déjà mises en œuvre ou plus difficilement applicables sans baisse des performances.

II- Mécanismes et modalités techniques de l'action

Quelle que soit l'espèce animale, les émissions gazeuses d'azote sont surtout proportionnelles à l'azote ammoniacal (NH₄⁺) présent dans les déjections, lui-même très lié à la quantité excrétée d'urée - qui est le principal déchet du métabolisme de l'azote chez les mammifères. Si cette quantité d'azote urinaire est élevée et varie assez peu chez les monogastriques (70-80% de l'azote total excrété), elle est beaucoup plus variable chez les ruminants (de 30 à 80% de l'azote excrété suivant le type de ration). Ensuite, l'évolution du NH₄⁺ en NH₃ ou en N₂O dépend du type de bâtiment et du mode de gestion des effluents.

• Alimentation et excrétion azotée

Si augmenter la part de protéines de la ration permet en général d'améliorer les performances zootechniques, le supplément d'azote protéique non retenu dans l'animal ou le lait est excrété pratiquement totalement sous forme d'urée. Cette excrétion peut être réduite sans perte de production en limitant les matières azotées totales (MAT) de la ration tout en assurant la couverture des besoins de l'animal en acides aminés (AA) essentiels (que l'organisme ne produit pas et qu'il doit donc trouver dans les aliments). L'apport d'AA industriels de synthèse, ajusté aux besoins de l'animal, permet d'assurer cette couverture en se substituant à du tourteau de soja.

Des références sont régulièrement éditées par le CORPEN pour les excréments d'azote pour les animaux d'élevage, plus ou moins modulées en fonction de leur alimentation. Ces références peuvent servir pour le calcul des émissions gazeuses d'azote (NH₃ et N₂O) et pour les calculs des quantités d'azote organique à épandre.

Le cas des bovins

Chez les ruminants, le métabolisme de l'azote est compliqué par les réactions intervenant dans le rumen, où les microorganismes consomment les protéines facilement dégradables en produisant du NH qui est partiellement réutilisé pour la synthèse des protéines microbiennes, le surplus étant absorbé au niveau de l'animal (c'est alors un toxique) pour être rapidement transformé en urée par le foie, puis excrété.

L'excrétion d'urée peut être réduite de deux manières :

- par une réduction, modérée, des MAT (un manque trop important de protéines peut diminuer la digestibilité des rations) ;
- par l'utilisation de protéines protégées de la dégradation par les microorganismes (tourteaux tannés) qui, en créant une subcarence en azote dégradable dans le rumen, induit une moindre excrétion d'urée et son recyclage dans le rumen.

L'utilisation d'AA de synthèse n'est pas retenue pour les bovins parce que son impact sur les rejets azotés est moindre que pour les monogastriques, et qu'elle est rendue coûteuse par la nécessité de protéger les AA de la dégradation dans le rumen.

Ces adaptations de la fraction azotée de la ration ne sont possibles que dans les régimes hivernaux, où l'azote est apporté par des compléments protéiques (tourteau de soja, notamment) qu'il est facile de modifier. Ce n'est pas le cas pour les régimes à base d'herbe pâturée ou d'autres fourrages verts ou ensilés apportés à l'auge avec des valeurs élevées en MAT, qui apportent des quantités importantes (et non modifiables) d'azote dégradable¹².

Chez les vaches, la teneur en urée du lait reflétant celle du sang, on dispose, avec les données du contrôle laitier, d'un moyen de diagnostic des animaux recevant une ration trop riche en azote, également utilisable pour le suivi de l'effet de l'action.

Le cas des porcins

De nombreuses études ont établi qu'une alimentation des porcs à l'engrais à teneur abaissée en protéines réduit l'excrétion d'azote, mais n'affecte pas le gain quotidien ou l'indice de consommation si la teneur en énergie et les teneurs en acides aminés essentiels sont maintenues.

Actuellement dans les élevages naisseurs-engraisseurs, l'animal reçoit un seul type d'aliment tout au long de sa vie (alimentation monophasée) ou deux types d'aliments, adaptés chacun à une

¹² Certains travaux prônent ainsi l'utilisation de maïs ensilé en remplacement de l'herbe pour réduire des émissions de N₂O.

phase de son développement (alimentation biphasé). Ajuster la composition de l'aliment dix fois au cours de la vie de l'animal (multiphasé) permet de diminuer globalement la quantité de protéines distribuée. Le remplacement des protéines par des céréales associées à des acides aminés industriels (lysine par ex.) adaptés aux besoins de l'animal permet de réduire encore sa consommation d'azote. Ces diminutions de l'azote ingéré réduisent effectivement l'excrétion : une baisse de la teneur en protéines de 20 à 12% peut réduire de 67% les émissions de NH₃ lors du stockage du lisier.

• Les sous-actions étudiées

Pour les **bovins**, la sous-action porte sur l'alimentation des vaches laitières en période hivernale, c'est-à-dire principalement sur des rations à base d'ensilage de maïs : l'objectif est de ramener à 14% le taux de matière azotée totale pour toutes les vaches qui reçoivent actuellement davantage. L'action modifie la ration, mais n'a pas d'effet sur le rapport fourrage / aliment concentré, sur le

temps passé en bâtiments / à l'extérieur, ou sur le volume d'effluents.

Pour les **porcs**, **deux options techniques** (exclusives l'une de l'autre puisqu'elles portent sur la même population d'animaux) sont étudiées :

- "2PAA+" : généralisation de l'alimentation biphasé, avec utilisation accrue d'AA industriels en substitution du tourteau de soja ;
- "MPAA+" : développement de l'alimentation multiphasé avec utilisation d'AA de synthèse.

• Autres effets de l'action sur les GES

La réduction des apports protéiques pourrait affecter la valeur fertilisante des effluents : elle diminue en effet l'azote total dans les effluents, mais aussi la part de l'azote ammoniacal, qui est la fraction la plus rapidement disponible pour les plantes. En fait, la disponibilité mesurée de l'azote pour les plantes reste élevée même avec une teneur réduite en protéines du régime, ce qui suggère que cette modification des aliments pour porc a peu d'impact sur la valeur fertilisante de l'effluent.

III- Calculs du potentiel d'atténuation et du coût de l'action

• Systèmes et modalités de calcul retenus

Les calculs sont effectués en différenciant : des catégories d'animaux selon les rations qu'ils reçoivent, puis le mode de gestion des déjections (fumier ou lisier).

Pour les **vaches**, ces catégories sont fondées sur les rations-types décrites par l'Observatoire de l'alimentation des vaches laitières de l'Institut de l'Élevage ; un calendrier annuel de rations permet de déterminer la ration hivernale et sa teneur moyenne en MAT (avec le modèle Mélodie), les consommations, productions et excréctions associées.

Pour les **porcs**, 6 catégories d'animaux (truies en gestation et en lactation, porcs en post-sevrage 1^{er} et 2^e âge, en croissance et en finition) sont distinguées ; les compositions des rations de chaque catégorie sont obtenues par formulation à moindre coûts sur les besoins en énergie et en acides aminés ; les teneurs en MAT des différentes rations sont calculées.

Les effectifs d'animaux sont ceux de la SAA 2010.

Les calculs ont d'abord été effectués avec la méthode du CITEPA pour les émissions de 2010 qui applique les facteurs d'émissions du GIEC 1996. Ils ont été réalisés en supposant que les estimations des excréctions seront adaptées à l'avenir pour être sensibles aux pratiques de rationnement proposées. Le mode de calcul GIEC 1996 est très ancien et peu précis pour le calcul des émissions de NH₃. Un calcul "expert" plus précis a donc ensuite été réalisé avec la méthode proposée par l'Agence européenne de l'environnement (*EMEP/EEA emission inventory guidebook 2009*), qui permet de prendre en compte l'effet des rations grâce à une meilleure modélisation des émissions à partir de la fraction d'azote urinaire et des facteurs qui influencent sa volatilisation en NH₃.

• Effets de l'action sur les GES et estimation de son potentiel d'atténuation unitaire

Effet visé :

• **La réduction des émissions de N₂O par les déjections.** Elle résulte de la diminution de la quantité d'azote excrété du fait de la diminution de la quantité d'azote ingérée (porcs et vaches) et d'une augmentation du recyclage de l'urée dans le rumen (vaches laitières).

Pour chaque type de ration (ration-type des vaches ou ration par catégorie de porc), la quantité d'azote excrété et le pourcentage d'azote ammoniacal sont calculés. L'azote ammoniacal est ensuite affecté à un mode de gestion : rejet au pâturage (pour les bovins) ou en bâtiment, puis lisier ou fumier. Les émissions directes de N₂O ou indirectes via le NH₃ sont calculées en fonction des flux d'azote excrétés avec des facteurs d'émissions à chaque étape propres aux deux méthodes utilisées (CITEPA et EMEP).

Pour les vaches, la méthode "CITEPA" surestime globalement les émissions de NH₃ et de N₂O, et retient des émissions plus élevées au pâturage qu'en bâtiment, ce qui semble contraire aux données actuelles. L'atténuation moyenne est ainsi de 0,44 kgNH₃/VL/an avec la méthode "CITEPA", contre 6,24 kgNH₃/VL/an pour l'EMEP.

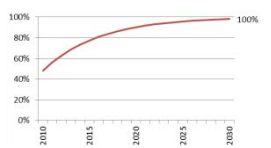
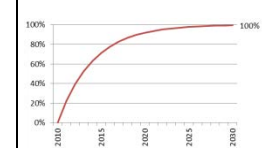
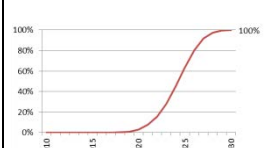
Autres effets comptabilisés :

• **La réduction des émissions de N₂O à l'épandage des effluents.** Alors que le CITEPA ne prend pas en compte les différents modes d'épandage des effluents, la méthode EMEP en tient compte avec des coefficients d'émission différenciés selon la technologie utilisée et la composition des effluents.

• **La modification des émissions induites de CO₂ liée à la substitution de matières premières agricoles pour la ration modifiée.** Cet effet en amont de l'exploitation est estimé, pour chaque ingrédient de la ration, en se référant aux données ACV disponibles dans la base Dia'terre® - Ges'tim (céréales, tourteaux et son) ou sinon à des données INRA (huile de soja, graine de soja extrudée, acides aminés industriels). A noter que les évaluations peuvent être assez différentes selon les sources.

Effets négligés :

• **Les émissions de CH₄ qui pourraient croître en raison d'une augmentation de :**
- la **fermentation entérique**, modifiée par le rapport sucres/protéines. Cet effet ne peut être pris en compte, faute de convergence des résultats scientifiques actuellement ;
- la **fermentation des déjections**, qui pourrait être favorisée par la diminution du taux de NH₃ (modification du pH) et une augmentation de la matière organique des déjections (moindre digestibilité). Ces effets sont négligés car l'effet du NH₃ est encore peu documenté, et l'impact sur la digestibilité est limité par le choix d'une diminution faible des protéines de la ration.

	Sous-action Option	A. Vaches laitières	B. Porcins	
			Option 2PAA+	Option MPAA+
Contenu technique	Situation initiale	Actuellement : grande variabilité de la composition des rations hivernales, avec de 10 à 18% de matières azotées totales (MAT)	Deux types d'alimentation : monophasé (MP) et biphasé (2P) Hypothèses : les niveaux de protéines édités par le CORPEN sont respectés ; les protéines proviennent du tourteau de soja	
	Modification de la ration	Réduction de la teneur en MAT des rations trop complémentées en protéines (objectif 14%). Calculs pour 15 rations-types	Toute l'année. Utilisation d'acides aminés industriels (AA) en substitution de tourteaux (soja et colza) et de pois. Recherche de la composition par formulation au moindre coût. Calculs pour 6 catégories d'animaux Généraliser l'alimentation en biphasé et l'utilisation d'AA Développer l'alimentation multiphasé avec utilisation d'AA	
Potentiel d'atténuation unitaire	Emissions* de N ₂ O (liées aux déjections avant et lors de l'épandage)	\ émissions des déjections en bâtiment, au stockage, au pâturage - Méthode "CITEPA" : peu sensible aux pratiques de complémentation en aliments protéiques et à une bonne gestion des effluents (VL) et peu sensible aux augmentations de consommation de protéines (porcins). - Méthode "expert" : prise en compte de la modification de la consommation de protéines et des différents modes de gestion par la méthode EMEP. \ émissions des déjections à l'épandage - "CITEPA" : pas de prise en compte des différents modes d'épandage des effluents. - "expert" : prise en compte, par la méthode EMEP, de l'épandage avec des coefficients d'émission différenciés selon la technologie utilisée et la composition des effluents. Hypothèse : pas de modification des apports de fertilisants minéraux azotés.		
	Total* direct + indirect kgCO ₂ e/animal/an	70 / 124	276 / 510	381 / 692
	Emissions induites de CO ₂ (amont) kgCO ₂ e/animal/an	\ émissions par \ des ingrédients azotés de la ration ▲ Sensibilité à la source de données ACV utilisée (base de données Dia'terre® - Ges'tim ou données INRA)		
	Total* kgCO ₂ e/animal/an	241 / 295	582 / 816	755 / 1066
Coût unitaire	Coût de la ration	Coût de la modification de la ration, calculé aux prix 2010 des matières premières		
	Equipement	0	0	Equipement pour mélange et distribution (amorti sur 12 ans) : 29,5 €/truite/an
	Pertes de production	En période hivernale : diminution de la production suivant les rations-types (0 à 25 litres x 0,3 €/l) + diminution du taux protéique du lait (-0,1 à -0,3 g/l x 0,006 €/g/l) Pas de variation des performances des animaux		
	Coût* total €/animal/an	-11,6 (8 à -84)	-49,2	-51,6
Assiette	Assiette théorique	Toutes les vaches laitières (3 743 390, en 2010) Effectif porcin : 13 860 000 dont 1 119 000 truies reproductrices		
	Critères techniques	VL ayant des rations hivernales à plus de 14% de MAT (détectées par leur taux d'urée du lait > 210-200 mg/l) Exclusion des verrats et des truies non productives Dans les calculs, porcelets et porcs à l'engrais sont affectés aux truies		
	Assiette Maximale Technique (AMT)	52% des vaches laitières : 1 957 554 vaches 951 450 truies avec les porcelets et porcs à l'engrais qu'elles produisent par an (28,2 porcelets sevrés/an/truite)		
Scénario de diffusion	Etat de référence 2010	48% des VL ont des rations hivernales à MAT ≤ 14% Alimentation : 20% monophasé, 80% biphasé, 0% multiphasé Effluents : gérés majoritairement sous forme de lisier.		
	Scénario de diffusion	Hypothèse : un contexte économique favorable + une sensibilisation importante des éleveurs 100% de l'AMT atteints en 2030  100% de l'AMT en biphasé et AA+ en 2030  100% de l'AMT en multiphasé et AA+ en 2030 		

* calcul "CITEPA" / calcul "expert"

Tableau 1

• Estimation du coût unitaire pour l'agriculteur

Le principal coût, négatif, est celui de la **modification de composition des rations**, c'est-à-dire des substitutions d'aliments, avec

notamment une diminution des aliments riches en protéines (tourteaux) et l'achat d'acides aminés de synthèse pour les porcs.

Autres coûts : seul le passage à l'alimentation multiphasé des

porcs nécessite l'acquisition d'un équipement spécifique ; seule la production laitière (quantité et taux protéique) pourrait être affectée par la modification de la ration.

• Estimation de l'impact à l'échelle nationale

Assiette maximale technique (AMT)

Pour les vaches laitières, l'analyse des rations-types actuelles et les données du contrôle laitier sur les taux d'urée dans le lait convergent pour diagnostiquer que la moitié des vaches (52%) reçoit des rations à plus de 14% de MAT.

Presque tout le cheptel porcin est concerné par le passage au multiphase, et 20% par la généralisation du biphase.

Scénario de diffusion de l'action

L'adoption de l'action ne comportant pas de freins techniques et présentant un intérêt économique pour les éleveurs, l'hypothèse retenue est que tous les animaux sont alimentés selon les rations proposées en 2030. La cinétique d'adoption est plus lente pour le multiphase, en raison de l'achat de matériel qu'il requiert.

IV- Résultats et mise en perspective

	unités (M : million)	Année 2030				Cumul sur la période 2010-2030		
		Vaches laitières	Porcins		Total Vaches lait. + 2PAA+	Vaches laitières	Porcins	
			OT 2PAA+	OT MPAA+			OT 2PAA+	OT MPAA+
Potentiel d'atténuation (méthode "CITEPA") Sans émissions induites		0,13	0,26	0,36	0,39	1,8	4,0	2,0
Potentiel d'atténuation (méthode "expert")	Sans émissions induites	0,23 (0,12 à 0,47)	0,48 (0,24 à 0,96)	0,66	0,72 (0,36 à 1,43)	3,2	7,4	3,7
	Avec émissions induites	0,56 (0,44 à 0,79)	0,77 (0,53 à 1,25)	1,01	1,33 (0,97 à 2,04)	7,7	11,9	5,7
Coût total pour les agriculteurs	M€	-21,9	-46,8	-49,1	-69	-304,8	-713,9	-277,4
Coût de la tonne de CO₂e pour l'agriculteur (méthode "expert", sans émissions induites)	€/tCO ₂ e	-94	-97	-75	-96	-	-	-

Tableau 2

• Les résultats

Cette action a un impact modéré sur les émissions de GES (0,72 Mt en 2030 en cumulant les sous actions VL et porcs 2PAA+) mais présente l'avantage d'être économiquement favorable aux éleveurs, même si ces économies restent faibles, environ 20 € par vache et par an, et 50 € par truie environnée par an. Les coûts par tonne de CO₂e épargnée sont très proches pour les deux sous-actions, de l'ordre de -90 €/t CO₂e pour les émissions calculées avec la méthode EMEP, ce qui semble cohérent car les deux actions relient la diminution du coût d'utilisation de protéines en excès à son excréation urinaire, source des émissions de N₂O.

L'action affecte plus la consommation de tourteaux de soja par tonne d'aliments concentrés pour les vaches laitières que pour les porcs (environ -11% vs -8,5%), ce qui explique que les atténuations des émissions induites soient proportionnellement plus importantes pour les vaches alors que les atténuations directes et indirectes sont un peu plus faibles.

La sous-action "vaches laitières" a un effet plus limité sur les émissions de GES (de l'ordre de la moitié) que la sous-action "porcs", mais cela tient en grande partie au fait que : toutes les vaches ne sont pas concernées ; celles qui le sont ne le sont pas toutes avec l'amplitude maximale ; seule la ration hivernale, facilement maîtrisable, est revue. Pour les porcs, c'est l'alimentation de toute l'année qui est modifiée.

Le potentiel d'atténuation cumulé sur 2010-2030 est meilleur pour l'option 2PAA+, alors que l'atténuation unitaire est plus élevée pour MPAA+ : cet effet résulte des différences de cinétique de diffusion, l'adoption de 2PAA+ étant beaucoup plus précoce.

Les estimations des émissions sur l'exploitation et en amont montrent que l'incorporation d'acides aminés industriels dans des régimes à teneur réduite en protéines diminue à la fois les

émissions directes de N₂O et les émissions de GES associées à la production des matières premières des aliments pour porcs.

• La sensibilité des résultats aux hypothèses

L'estimation des émissions induites liées à l'utilisation des matières premières agricoles est très sensible à la méthode de calcul, qui actuellement pénalise fortement le soja brésilien (auquel sont imputés 70% de la conversion de la forêt en cultures, avec des émissions estimées à 740 tCO₂e/ha). Il est possible que cette méthode évolue pour répartir plus largement l'impact de la déforestation, ce qui modifierait les valeurs GES des aliments et pourrait réduire fortement l'effet positif obtenu sur les émissions induites.

Pour les porcs, les niveaux de performance des animaux (productivité des truies, indices de consommation) ont un impact important sur les émissions mais faible sur les différentiels d'émission (potentiel d'atténuation), puisque l'impact est comparable sur la situation de référence et sur les deux options techniques.

Le scénario à effectifs et prix constants retenu pour les calculs est bien entendu très discutable pour le chiffrage de cette action.

• Les conditions d'une prise en compte de l'action dans l'inventaire national

Comptabilisation de l'effet

La méthode EMEP/EEA est déjà utilisée par le CITEPA pour le calcul des émissions de NH₃ dans le cadre d'un autre inventaire. Il suffirait de faire valider son utilisation pour la comptabilisation des émissions gazeuses d'azote pour le calcul des GES.

En ce qui concerne l'alimentation multiphase, la méthode du

CITEPA permettrait sa prise en compte dans l'absolu. Mais les données de référence CORPEN, utilisées par le CITEPA pour faire les calculs, ne traduisent pas son effet.

Vérifiabilité de la mise en œuvre

La principale difficulté pour la prise en compte dans l'inventaire national, quelle que soit la méthode, concerne la disponibilité de données fiables concernant les pratiques d'alimentation, en particulier pour les ruminants. Dans le cas des vaches laitières, les teneurs en urée du lait pourraient constituer un indicateur des pratiques de complémentation azotée lorsque les animaux sont en bâtiments sous réserve de mieux valider son interprétation. Pour l'alimentation en porcs, les données techniques sont plus fiables et doivent permettre de prendre en compte plus rapidement cet effet.

• Les contextes et mesures susceptibles de favoriser le déploiement de l'action

Pour les vaches. L'augmentation du prix des matières premières protéiques (tourteau de soja) peut favoriser le développement de l'action, qui est freiné par une stratégie fréquente chez les éleveurs, consistant à prendre une marge de sécurité sur le contenu en azote des rations pour éviter tout risque de limitation de la production.

Pour les porcs. La diffusion du biphase a été rapide, parce qu'elle a été favorisée par le conseil agricole, et que son adoption permettait à l'éleveur de réduire les quantités d'azote organiques dans le cadre de la directive "Nitrates" (limités à 170 kg/ha). Il devrait en être de même pour le multiphase, étant donné son intérêt pour l'éleveur. L'augmentation du différentiel de prix entre les aliments protéiques et énergétiques peut rendre cette technique plus attractive. Son adoption nécessitera toutefois d'avoir accès à des acides aminés industriels plus compétitifs et nombreux (ex. valine) et de pouvoir intégrer ces types d'alimentation dans les normes CORPEN, mais aussi de mettre en place un soutien à l'investissement et un suivi plus rapproché des performances des animaux.

• Les autres effets de l'action

- La réduction des émissions de NH₃, présente des intérêts multiples, puisqu'elle intervient aussi dans les processus d'acidification, d'eutrophisation (*via* la redéposition et la transformation en nitrate) et de toxicité terrestre, et qu'elle influe sur la santé humaine (particules fines).

- En diminuant les importations de tourteau de soja et en favorisant l'utilisation des ressources produites en métropole, l'action accroît l'autonomie protéique de la France. Pour les porcs, elle contribue à la compétitivité des élevages grâce à une réduction intéressante des coûts d'alimentation.

- Un changement de consommation de matières premières par les animaux pourrait modifier les surfaces des cultures à l'échelle France, mais cet effet n'est pas certain car la modification peut se faire sur des produits importés.

• Conclusions

Cette action fait partie des actions de type "gagnant-gagnant" dont la mise en œuvre peut paraître facile. Il faut cependant considérer que des freins existent, au moins pour les vaches laitières, sinon elles recevraient déjà quasiment toutes le régime préconisé. Le renchérissement des protéines alimentaires favorisera clairement le développement de cette action.

En retenant les chiffres issus de la méthode EMEP, les effets cumulés des deux sous-actions sont de plus de 11 millions de tonnes de CO₂e sur la période 2010-2030, auxquels s'ajoutent les 8,9 millions de tonnes de CO₂e induits en amont par les sources d'aliments utilisées, même si ces effets pourraient ne pas concerner les inventaires français.

Le potentiel d'atténuation reste d'une ampleur limitée globalement en termes d'impacts sur les GES, mais la prise en compte d'une méthode plus précise dans le calcul des inventaires suffirait à en augmenter la portée.



9

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

↘ CH₄

- A. Développer la méthanisation
- B. Couvrir les fosses de stockage et installer des torchères

I- Enjeu et principe de l'action

Actuellement la majorité des déjections animales récupérées (environ 150 millions de tonnes par an) sont stockées dans les bâtiments d'élevage et dans des ouvrages extérieurs ou aux champs pendant une période pouvant atteindre 6 mois. Ces stockages s'accompagnent d'un rejet direct vers l'atmosphère de composés gazeux, notamment du CH₄ et du N₂O, représentant respectivement 13,7 et 5,2 millions de tonnes de CO₂ équivalent (MtCO_{2e}) en 2010, soit 13% et 4,9% des émissions du secteur agricole français.

L'objectif de l'action est de développer le captage du CH₄ produit durant cette phase de stockage puis son élimination par com-

bustion. Le CH₄ est brûlé, et donc transformé en CO₂, soit dans des chaudières ou des moteurs de cogénération permettant de produire de l'électricité et/ou de la chaleur, soit tout simplement en torchère. Le pouvoir de réchauffement global (PRG) du CO₂ étant 25 fois inférieur à celui du CH₄, la combustion du CH₄ en CO₂ permet de réduire fortement l'impact effet de serre, même en l'absence de valorisation énergétique (cas des torchères).

Les émissions de CH₄ liées à la gestion des déjections animales étant très majoritairement issues des filières bovines (60%) et porcines (25%), seules ces deux espèces sont prises en compte dans l'action.

II- Mécanismes et modalités techniques de l'action

• Les émissions des effluents d'élevage

Ces émissions dépendent principalement des conditions, aérobies et/ou anaérobies, dans lesquelles sont placés les déjections ou leurs produits : ces conditions déterminent le type de dégradation que subit la matière organique et donc les émissions gazeuses associées. Ce facteur déterminant conduit à une distinction majeure entre lisier et fumier, qui présentent, respectivement, des conditions totalement et partiellement anaérobies.

Les émissions de CH₄

Ces émissions au cours du stockage des déjections sont quantitativement importantes mais très variables. Elles dépendent de nombreux facteurs : l'espèce animale, le type et la composition des déjections, les conditions du stockage (température...) et sa durée...

Les émissions de CH₄ résultant de la fermentation qui se produit en conditions anaérobies seront importantes pour le lisier et de façon générale dans les produits liquides, et seront faibles dans le fumier et, pour tous les produits, après épandage au champ, où les conditions sont très majoritairement aérobies.

Dans les méthodes de calcul élaborées par le GIEC, l'effet de l'espèce animal est pris en compte à partir d'une estimation, par espèce animale, de la quantité de matière organique excrétée (SV) et d'un potentiel maximum de production de méthane de cette matière organique (B₀). L'effet du mode de gestion des déjections est ensuite pris en compte par un "Facteur de conversion en

méthane" (FCM, en %) permettant de calculer l'émission en modulant le B₀ en fonction des modes de gestion. Ainsi, les valeurs (définies pour un climat donné) sont très différentes pour les fumiers et les lisiers (Tableau 1).

Au cours du stockage des effluents, les conditions de production du CH₄ ne sont pas optimales (température relativement faible, microorganismes non adaptés...) et les cinétiques d'émission qui en résultent sont relativement faibles et constantes pour un climat donné. Ainsi le principal déterminant des émissions cumulées de CH₄ est la durée de stockage. Les émissions de méthane ont donc été considérées proportionnelles à la durée de stockage.

Les émissions de N₂O

La production de N₂O nécessite des conditions à la fois aérobies et anaérobies, qui favorisent respectivement la nitrification et la dénitrification. Les émissions de N₂O sont donc significatives pour le fumier, et au contraire très faibles dans les effluents liquides (lisier et produits issus de la méthanisation).

Là encore, l'effet du mode de gestion des déjections est pris en compte par un "Facteur de Volatilisation" (% N volatilisé en N₂O) - dont les valeurs figurent dans le Tableau 1.

• Les sous-actions étudiées

La **méthanisation** consiste à envoyer le plus rapidement possible les déjections dans un réacteur de digestion anaérobie, qui favorise la production de CH₄ et permet de le capter. Ce CH₄ peut être injecté dans le réseau de gaz naturel, mais est en général valorisé par combustion dans des chaudières ou des moteurs de cogénération, produisant de la chaleur et/ou de l'électricité. Cette technique peut s'appliquer à l'ensemble des déjections récupérées, liquides ou solides (lisier et fumier).

Dans la plupart des cas, des co-substrats, provenant de l'exploitation (résidus de culture...) ou de l'extérieur (déchets d'industries alimentaires...), sont méthanisés avec les déjections afin d'augmenter la production de biogaz. En raison de la grande diversité de ces pratiques, et du fait que les effets de la méthanisation ne sont

	Conditions anaérobies (lisier, digestats)	Conditions aérobies/anaérobies (fumier, pâturage)
Facteur de Conversion en Méthane (% CH ₄ émis dans l'atmosphère)	45%	1,5%
Facteur de Volatilisation (% N volatilisé en N ₂ O)	0,1%	2%

Tableau 1. Valeurs de FCM et FV (en climat tempéré)

alors plus forcément imputables au seul secteur agricole, l'ajout de co-substrats n'a pas été pris en compte dans les calculs d'atténuation et de coût bien qu'il participe à la rentabilité de l'unité de méthanisation.

L'autre sous-action étudiée est la **couverture** de la fosse de stockage, qui permet la récupération du CH₄ produit, et l'installation d'une **torchère** pour brûler ce CH₄. Cette technique, qui ne peut s'appliquer qu'aux effluents liquides stockés, ne sera envisagée que pour les exploitations dont la production de lisier est insuffisante pour justifier un équipement de méthanisation.

• Les effets de la "méthanisation" et du "torchage"

Les émissions potentiellement modifiées (Figure ci-contre) sont celles intervenant après la phase de stockage en bâtiment : lors du stockage à l'extérieur à l'air libre (qui est réduit en amont de la méthanisation et supprimé par la couverture des fosses) ; lors d'un éventuel stockage aval et à l'épandage.

Les **émissions de CH₄** sont réduites par un stockage amont de plus courte durée puis la combustion du CH₄. Les émissions des effluents méthanisés sont ensuite considérées comme faibles.

En plaçant les déjections en conditions strictement anaérobies, le procédé de récupération/ combustion réduit également les **émissions de N₂O** lorsqu'il se substitue à des conditions aérobies/anaérobies (fumier) – l'impact est en revanche nul pour les déjections sous forme liquide, déjà en conditions anaérobies et peu émettrices de N₂O. Le procédé de traitement modifie également les caractéristiques du produit résiduel, notamment la teneur en carbone organique biodégradable, et a donc un impact sur les processus mis en jeu dans les émissions de N₂O suite à l'épandage (particulièrement la dénitrification). Cependant, les données existantes, peu nombreuses et parfois contradictoires, ne permettent pas d'établir et de quantifier de tels effets.

Les processus intervenant dans la réduction des émissions de CH₄ (dégradation anaérobie de la matière organique des déjections en conditions maîtrisées ou non) sont bien connus, et leurs bases scientifiques non contestées. Les quantifications de cette réduction peuvent en revanche être controversées.

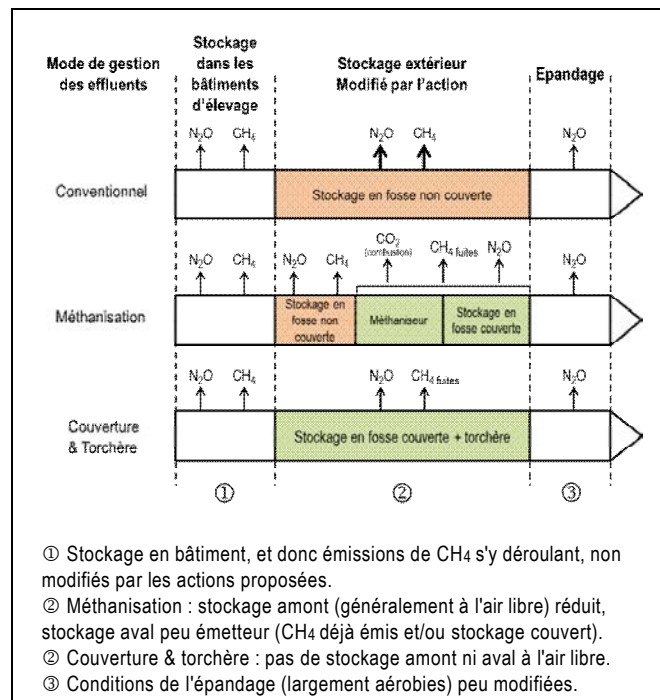
III- Calculs du potentiel d'atténuation et du coût de l'action

• Systèmes et modalités de calcul retenus

Face à la grande diversité des systèmes résultant du type d'animaux, du mode de gestion des déjections (fumier ou lisier) et de ses modalités (litière accumulée, raclage quotidien du lisier ou du fumier ou animaux sur caillebotis...), et à l'absence de données existantes sur les modalités des différents modes de gestion des déjections, le choix a été fait de retenir une référence pour chacune des catégories animales considérées (bovins et porcins) afin de déterminer la répartition temporelle du stockage des déjections entre le bâtiment et l'extérieur. Chacun des cas est défini en choisissant la catégorie d'animaux la plus émettrice de GES, et en y associant le système le plus utilisé. Ces situations prises comme référence sont :

- pour les bovins : les vaches laitières sur lisier, avec un raclage quotidien des déjections vers une fosse extérieure où elles sont stockées jusqu'à l'épandage ;
- pour les porcins : les porcs à l'engrais élevés sur caillebotis (système lisier) où les déjections sont considérées comme stockées 20% du temps dans le bâtiment et 80% à l'extérieur avant l'épandage.

En effet, les résultats dépendent beaucoup des scénarios, avec et sans action, retenus, et des hypothèses de calculs appliquées, ce qu'il est difficile d'approcher précisément du fait de la diversité importante des situations et du manque de données disponibles.



• Autres effets de l'action sur les GES

Lorsque le CH₄ capté est valorisé sous forme de chaleur et/ou d'électricité, l'énergie produite peut se substituer à une énergie émettrice de CO₂ (énergie fossile le plus souvent pour la chaleur, et mix électrique français pour l'électricité).

Enfin, la méthanisation pourrait avoir un impact sur la consommation d'engrais azotés de synthèse si le digestat présente une valeur fertilisante supérieure à celle des déjections non traitées. Toutefois, les données disponibles ne permettent pas de qualifier et de quantifier ces éventuels effets très dépendant du contexte.

Les données temporelles sur le stockage des déjections entre le bâtiment et les fosses extérieures (un épandage tous les 6 mois) sont ensuite appliquées par extrapolation à l'ensemble des animaux de la catégorie considérée.

Les données concernant les effectifs animaux sont celles de la SAA 2010 ; celles concernant la taille du cheptel des exploitations (utilisées uniquement pour déterminer l'assiette technique maximale) proviennent du RICA. Les occurrences des systèmes des modes de gestion des déjections (lisier, fumier ou pâturage) sont issues des données des enquêtes "Bâtiments d'Élevage".

• Estimation du potentiel d'atténuation unitaire

Effet visé :

• **La réduction des émissions de CH₄**, permise par son captage et sa combustion. Elle est limitée par l'existence d'un stockage des déjections à l'air libre en amont et en aval du procédé, et par des fuites de CH₄ au niveau des installations.

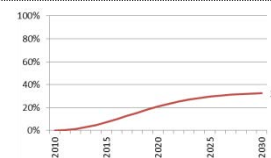
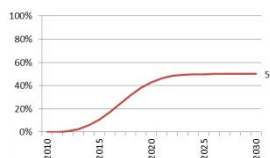
	Sous-actions	A. Méthanisation	B. Couverture & torchère
Contenu technique	Situation initiale	Bovins avec stockage des déjections totalement à l'extérieur (avec un épandage tous les 6 mois). Porcins : déjections stockées 20% du temps dans le bâtiment puis 80% à l'extérieur (avec un épandage tous les 6 mois).	
	Modification de la gestion des déjections	Stockage extérieur amont limité à 3 semaines (durée réduite de 88%) Digestion en réacteur avec production d'énergie	Durée de stockage amont à l'extérieur identique à la situation de référence mais avec couverture, captage et combustion du CH ₄ Pas de valorisation énergétique
Potentiel d'atténuation unitaire	Emissions de CH ₄ (fermentation des déjections)	Emissions proportionnelles à la durée de stockage + fuites Vaches : FCM = 6,9% du B ₀ (stockage amont : 0,12x45% + fuites : 1,5%) Porcs : FCM= 5,8% du B ₀ (stockage amont : 0,12x36% + fuites : 1,5%)	Pas de stockage amont ni aval Fuites (FCM = 1,5% du B ₀)
	Emissions de N ₂ O (au stockage des déjections)	Pour fumier seulement, diminution des émissions par passage en conditions anaérobies : 630 kgCO ₂ e/animal/an pour les vaches laitières par exemple	-
	Total direct + indirect kgCO ₂ e/animal/an	Vaches laitières & fumier : 430 Vaches laitières & lisier : 1 440 Porcs à l'engrais > 50 kg & lisier : 340	Vache laitière & lisier : 1 640 Porcs à l'engrais > 50 kg & lisier : 400
	Substitution énergétique	Electricité : 50 kgCO ₂ e/animal/an ; Chaleur : 70 kgCO ₂ e/animal/an pour les vaches laitières par exemple	0
	Total kgCO ₂ e /animal/an	Vaches laitières & fumier : 550 Vaches laitières & lisier : 1 560 Porcs à l'engrais > 50 kg & lisier : 370	Vache laitière & lisier : 1 640 Porcs à l'engrais > 50 kg & lisier : 400
Coût unitaire pour l'agriculteur	Investissements	Investissement de 9000€/kWe amorti sur 16 ans	Couverture d'une surface de 215 m ² (280 €/m ²) Achat d'une torchère : 21 000 € (amorti sur 16 ans)
	Coûts de fonctionnement	Maintenance par prestataire extérieur (dont 18 €/MWh pour le moteur et 1,3% de l'investissement de divers), assurance (0,4% de l'investissement), consommation électrique (7% de la production d'électricité à 71 €/MWh) Travail : maintenance assurée par l'exploitant (14 €/MWh) et surveillance	Travail : maintenance et surveillance (1000 €/an)
	Recettes	Vente d'électricité correspondant à 25,6% du potentiel énergétique "méthane" à 130 €/MWh ▲ Valorisation de la chaleur non prise en compte	0
	Total	8 283 €/exploitation/an pour une unité de 50kWe	10 075 €/exploitation/an
Assiette	Ass. théorique	Tous les bovins et les porcs	
	Critères techniques	La puissance minimum des moteurs de cogénération existant sur le marché (15 kW _{électrique}) ce qui correspond à une exploitation d'au minimum 140 UGB environ.	Ne s'applique qu'aux déjections liquides ▲ sous-action retenue que pour les effectifs non concernés par la méthanisation.
	Ass. Maximale Technique (AMT)	Animaux se trouvant dans des exploitations ayant > 140 UGB (soit 62% des effectifs totaux correspondant à environ 48800 exploitations).	40 000 exploitations
Scénario de diffusion	Etat de référence 2010	En 2011 : 48 unités de méthanisation agricoles ou basées majoritairement sur des déjections animales (< 1 Mt, soit < 1% des déjections récupérables)	Aucune réalisation actuellement en France
	Scénario de diffusion	Contexte favorable (soutiens, tarifs d'achat de l'énergie), mais développement limité par les capacités de la filière de construction et d'équipement : installation de 680 unités/an → L'AMT est atteinte en 2084 ; en 2030, 12 200 exploitations, représentant 33% des effectifs bovins et porcins totaux sont équipées, soit 53% de l'AMT en termes d'effectifs d'animaux et 25% en termes de nombre d'exploitations 	Installation de 1000 unités/an → Etat en 2030 : 50% de l'AMT, soit 20000 exploitations 

Tableau 2

La méthode de calcul du CITEPA pour les émissions de 2010 agrège toutes les émissions sans distinction entre le stockage en bâtiment et à l'extérieur et n'intègre pas de modalité de gestion des déjections de type méthanisation ou couverture/torchère : elle ne peut donc prendre en compte des effets de l'action. La méthode de calcul "expert" procède, elle, à un découpage en plusieurs phases (stockage amont, procédé, stockage aval) puis affecte, à chacune, un facteur de conversion de la matière organique en méthane spécifique (FCM) ; ces facteurs par étapes sont finalement cumulés pour déterminer un FCM global de chaque filière de gestion des déjections considérée.

Les émissions étant considérées proportionnelles à la durée, réduire le stockage amont à l'extérieur de 6 mois à 3 semaines induit une baisse de l'ordre de 88% de ses émissions. Les émissions ou leurs modifications intervenant lors du stockage aval (faibles car hypothèse de forte transformation en CH₄) et suite à l'épandage sont négligées.

Les fuites de biogaz dues aux défauts d'étanchéité des installations (au niveau de la couverture des fosses, du réacteur et du système de combustion) sont évaluées à 1,5% du CH₄ produit.

Le CO₂ issu de cette combustion du CH₄ n'est pas comptabilisé car il s'agit de carbone à cycle court.

Autres effets comptabilisés :

. **La réduction des émissions de N₂O** permise par le passage à des conditions de stockage complètement anaérobies. Pour les lisiers, les émissions sont identiques avec ou sans action. Par contre, pour les fumiers, les émissions de N₂O sont réduites, le FV global passant de 2 à 0,1% pour les bovins et de 2 à 0,48% pour les porcins en considérant des émissions identiques à un fumier pour la partie amont de la méthanisation et des émissions identiques à un lisier pour la partie méthanisation et aval.

. **La réduction des émissions de CO₂** permise par la substitution d'énergie fossile (effet induit en amont de l'exploitation). L'énergie produite par la méthanisation est calculée en considérant que 80% du FCM restant à l'entrée du digesteur sont récupérés en CH₄, puis que 32% de ce CH₄ sont valorisés sous forme d'électricité (substitution de 78 gCO₂ par kWh produit) et 15% sous forme de chaleur (substitution de 245 gCO₂/kWh).

Effets négligés :

- la **volatilisation de NH₃ au stockage aval et à l'épandage**, qui pourrait être augmentée par le procédé de traitement du produit. Toutefois, des techniques adaptées (couverture de fosses pour le stockage et pendillard pour l'épandage) existent et permettent d'obtenir un impact faible ;

- la **nitrification/dénitrification à l'épandage** c'est-à-dire les émissions de N₂O à l'épandage : les données de la littérature sont controversées et l'effet est donc négligé ;

- l'**économie d'engrais** du fait d'un pouvoir fertilisant plus important des digestats de méthanisation (effet incertain dans l'état actuel des connaissances).

IV- Résultats et mise en perspective

• Les résultats

Action méthanisation

Le potentiel d'atténuation unitaire dépend de la catégorie d'animal considérée mais également du système de gestion des déjections. Ainsi, le potentiel d'atténuation des émissions directes varie par ex. de 0,34 à 1,44 tCO_{2e}/animal/an pour les porcs à l'engrais et les vaches laitières, respectivement.

• Estimation du coût unitaire pour l'agriculteur

Ces **coûts** comportent l'investissement initial (amorti sur 16 ans) et les coûts de fonctionnement des installations (maintenance par un prestataire...), auxquels s'ajoute le travail de surveillance et de maintenance assuré par l'agriculteur. Pour "méthanisation", la simulation est effectuée pour une exploitation moyenne conduisant à une unité de méthanisation de 50-70 kW^{électrique}. Pour "couverture & torchère", le calcul considère une exploitation ayant 100 UGB et une production annuelle d'environ 1500 m³ de lisier : l'investissement comprend la couverture de 215 m² de fosse et l'achat de la torchère auxquels s'ajoutent les frais de maintenance.

Pour la **méthanisation** uniquement, des **recettes** supplémentaires sont générées par la vente d'électricité sur le réseau – les incertitudes techniques et économiques n'ont pas permis de prendre en compte une valorisation financière de la chaleur.

• Estimation de l'impact à l'échelle nationale

Assiette maximale technique

Tous les bovins et les porcins dont une partie ou la totalité des déjections sont récupérées sont *a priori* concernés ("assiette théorique").

Pour "méthanisation", l'assiette est contrainte par la puissance minimum des moteurs de cogénération disponibles sur le marché (15 kW^{électrique}, soit une énergie électrique annuelle minimum de l'ordre de 120 000 kWh), qui requiert pour fonctionner les déjections d'au moins 140 UGB environ. A noter que la disponibilité de co-substrats à fort potentiel méthanogène, condition pour rentabiliser les installations dans les conditions économiques actuelles, n'est pas prise en compte.

L'option "couverture & torchère" ne présente pas de limitation technique importante mais elle ne s'applique qu'aux déjections liquides, et aux exploitations dont le cheptel est insuffisant pour rentabiliser un équipement de méthanisation.

Scénario de diffusion de l'action

Dans le contexte favorable actuel (soutiens, tarifs d'achat de l'énergie), le développement de la **méthanisation** est limité par les capacités de la filière de construction et d'équipement. En Allemagne, avec une tarification intéressante, le rythme des installations a atteint 680 unités/an en moyenne sur plusieurs années. Ainsi, ce scénario de diffusion a été retenu. Le plan français, annoncé en mars 2013, vise l'objectif de 1000 méthaniseurs en 2020, soit 130 installations par an en moyenne mais ce plan considère des unités de puissance moyenne de l'ordre de 200kWe, ce qui correspond pour chaque unité à 3-4 exploitations considérés dans cette étude, donc une puissance installée du même ordre de grandeur.

Pour "**couverture/torchère**", En se basant sur le développement d'équipement du même type, l'hypothèse retenue est l'équipement de 1000 exploitations par an.

L'application d'une méthode (de calcul) adaptée à 33% de l'AMT permet d'atteindre une atténuation annuelle de 5,78 MtCO_{2e} des émissions directes de GES. En appliquant la cinétique de diffusion, le cumul sur la période 2010-2030 est de 62,9 MtCO_{2e} pour les émissions directes.

Le coût associé à cette mesure est estimé à 17 €/tCO_{2e} direct évité avec un cout annuel en 2030 de 99,9 M€ et un coût cumulé sur la période 2010-2030 de 1 087 M€.

	unités (M : million)	Année 2030			Cumul sur la période 2010-2030	
		Méthanisation	Torchères	Total 2 sous-actions	Méthanisation	Torchères
Potentiel d'atténuation (méthode "CITEPA") Sans émissions induites		0	0	0	0	0
Potentiel d'atténuation (méthode "expert")	Sans émissions induites	5,8 (3,8 à 6,9)	3,4 (2,0 à 4,7)	9,2 (5,8 à 11,6)	62,9 (40,9 à 74,8)	45,4 (26,7 à 62,7)
	Avec émissions induites	6,3 (4,1 à 7,5)	3,4 (2,0 à 4,7)	9,7 (6,3 à 12,1)	68,7 (44,7 à 81,7)	45,4 (26,7 à 62,7)
Coût total pour les agriculteurs	M€	100	201,5	301	1086,6	2697,2
Coût de la tonne de CO _{2e} pour l'agriculteur (méthode "expert", sans émissions induites)	€/tCO _{2e}	17	59	35	-	-

Tableau 3

Action torchère

Comme pour la méthanisation, le potentiel d'atténuation unitaire dépend de la catégorie d'animal. Ce potentiel varie par ex. de 0,4 à 1,64 tCO_{2e}/animal/an pour les porcs à l'engrais et les vaches laitières, respectivement.

L'application d'une méthode (de calcul) adaptée à 50% de l'AMT permet d'atteindre une atténuation annuelle de 3,4 MtCO_{2e} des émissions directes de GES. En appliquant la cinétique de diffusion, le cumul sur la période 2010-2030 est de 45,4 MtCO_{2e} pour les émissions directes.

Le coût associé à cette mesure est estimé à 59 €/tCO_{2e} direct évité avec un cout annuel en 2030 de 201,5 M€ et un coût cumulé sur la période 2010-2030 de 2 697 M€.

La sous-action "couverture & torchère" n'étant envisagée que pour les exploitations non concernées par la solution "méthanisa-tion", les deux sous-actions sont additives.

• La sensibilité des résultats aux hypothèses

L'estimation du potentiel d'atténuation est sensible à l'hypothèse retenue pour la répartition des émissions des déjections entre le stockage en bâtiment et à l'extérieur. Dans l'hypothèse, plus défavorable mais réaliste, où 20% du stockage a lieu en bâtiment pour les bovins (0% dans le scénario moyen) et 40% pour les porcins (20% dans le scénario moyen), l'atténuation passe à 3,98 MtCO_{2e} pour "méthanisation" (soit une baisse de 30% par rapport à celle calculée dans le scénario moyen), et à 2,35 MtCO_{2e} pour "couverture & torchère".

L'atténuation est également sensible aux valeurs retenues pour les émissions sans action. Des travaux récents et les lignes directrices 2006 du GIEC revoient à la baisse les quantités de matières organiques excrétées par les bovins et les FCM des gestions conventionnelles, notamment du lisier. Ces révisions se traduisent par des estimations des émissions de CH₄ sans action réduites de 3 à 3,5 MtCO_{2e} (soit -20 à -25%), qui entraînent une baisse du potentiel d'atténuation du même ordre (20-25%), soit des atténuations des émissions directes de l'ordre de 3,8 et 2,2 Mt pour "méthanisation" et "couverture & torchère", respectivement.

Pour "méthanisation", l'application de scénarios de développement plus (1000 unités/an) ou moins (540 unités/an) favorables conduit à des atténuations des émissions directes de 6,9 et 5,3 Mt, respectivement.

L'estimation des coûts varie sensiblement selon les hypothèses de prix utilisées : pour la méthanisation, le coût de la tonne de CO_{2e} est ainsi de 6,6 et 27,9 € pour des coûts d'investissement de 7 500 et 10 500 €/kWe (gamme de prix issue de documents

techniques) et peut atteindre 35,5 € en considérant des coûts de fonctionnement plus important (735 €/kWe installé) ; il tombe à -2,5 €/tCO_{2e} (bénéfice) avec le prix d'achat de l'électricité en vigueur depuis 2011 (170 €/MWh). Pour un prix d'achat de l'électricité sans subvention (54 €/MWh), ce coût est estimé à 54,9 €.

Concernant "couverture & torchère", il existe une incertitude importante sur le nombre d'exploitations concernées pour atteindre les objectifs fixés ainsi que sur les surfaces de fosses à couvrir. Ces données impactent les coûts associés à travers le nombre de torchères nécessaires et les surfaces de couverture nécessaires. Une étude de sensibilité de ces facteurs de variation à la hausse (50%) porte le coût unitaire à 89 €/tCO_{2e}.

• Les conditions d'une prise en compte de l'action dans l'inventaire national

Comptabilisation de l'effet

L'application de la méthode de calcul "CITEPA" ne permet pas de prendre en compte cette action, et l'atténuation dans l'inventaire est donc nulle. Les deux sous-actions pourraient toutefois être prises en compte assez simplement, en les considérant comme des systèmes de gestion des déjections dotés de FCM spécifiques (comme proposé par les lignes directrices du GIEC de 2006).

Vérifiabilité de la mise en œuvre

Pour "méthanisation", le CH₄ produit est valorisé sous forme d'énergie, le plus souvent électrique donnant lieu à un contrat avec EDF et une mesure et un contrôle régulier de cette production. L'utilisation de ces données et l'application d'un ratio moyen de tCO₂ évité/kWh d'énergie produite pourrait permettre de vérifier la mise en œuvre de cette mesure. Toutefois, l'énergie produite peut provenir d'autres substrats et il apparaît donc nécessaire de prévoir une traçabilité des intrants en termes quantitatifs et qualitatifs.

Pour " torchère ", étant donné qu'il n'y a pas de valorisation énergétique de mise en œuvre, la vérifiabilité de l'action s'avère plus difficile. On pourrait cependant envisager en plaçant des compteurs à biogaz avant la torchère.

• Les contextes et mesures susceptibles de favoriser le déploiement de l'action

Pour "méthanisation", les difficultés et les délais de l'instruction administrative des dossiers est une limite au développement de l'action largement soulignée dans les différents rapports. D'autre part, la gestion des digestats, lorsqu'elle doit être fortement modifiée par rapport à la situation avant la mise en œuvre de l'action, est également un frein au développement de cette action

du fait des difficultés d'homologation/normalisation du digestat. Enfin, le coût moyen calculé avec le tarif d'achat actuel de l'électricité est proche de 0€ mais masque, en réalité, de fortes variations en fonction du type et de la taille des exploitations et apparaît donc insuffisant pour un développement maximal de l'action.

La méthanisation bénéficie d'un soutien politique qui se traduit par des aides diverses, et variables dans le temps et dans l'espace, par les agences (ADEME notamment) et les collectivités territoriales. A titre d'exemple, un plan "Méthanisation" a été présenté par le ministre de l'agriculture fin mars 2013 et vise au développement de 1000 méthaniseurs en 2020, ce qui se rapproche, comme indiqué ci-dessus, du développement envisagé dans cette étude.

Le développement de la méthanisation est dans le contexte actuel à la hausse même sans mesure supplémentaire, grâce aux soutiens. La dynamique devrait se renforcer du fait d'une réévaluation du tarif d'achat de l'électricité issue du biogaz intervenue en mai 2011, des tarifs d'injection dans le réseau de gaz naturel et des conditions de double valorisation (électricité/injection) parus plus récemment.

Pour "**couverture & torchère**", la faisabilité technique au niveau national reste à prouver (projet de recherche en cours) et le financement de ce type d'action à travers le marché carbone ne semble pas assuré aujourd'hui.

• Les autres effets de l'action

La volatilité accrue de l'ammoniac (NH_3) par la méthanisation peut entraîner une augmentation des émissions de ce gaz vers l'atmosphère en aval du procédé (stockage et épandage) si des mesures adéquates ne sont pas mises en œuvre. Les actions considérées n'ont pas d'impact direct sur les quantités d'azote des effluents. En conséquence, ces actions n'ont pas d'impact direct sur les transferts potentiels d'azote vers le milieu aquatique. Toutefois, pour "méthanisation", les apports de substrats extérieurs à l'exploitation, non pris en compte dans les calculs mais existant dans la réalité, peuvent entraîner une augmentation de la pression azotée sur l'exploitation. Les apports de substrats autres que les effluents d'élevage peuvent également conduire, pour les substrats n'émettant pas de CH_4 dans la filière de gestion actuelle, à une augmentation des émissions de CH_4 liées à ces substrats à travers les fuites dans les méthaniseurs.

D'autre part, l'action "méthanisation" participe aux politiques mises en œuvre sur les énergies renouvelables.

Enfin, la combustion du gaz produit comportant des traces de composés azotés peut entraîner une augmentation des émissions d'oxyde d'azote (NO_x), notamment pour "couverture & torchère" ou la combustion et les émissions sont peu maîtrisées.

• Conclusions

Deux sous-actions ont été étudiées dans le cadre de cette action avec des potentiels d'atténuation de 5,78 et 3,4 MtCO_2e annuel atteint en 2030 pour la méthanisation et la couverture/torchère, respectivement et un cumul de 9,18 $\text{MtCO}_2\text{e/an}$. Toutefois, les coûts associés à la méthanisation sont 3 fois plus faibles car, même si les investissements et les coûts de fonctionnement sont beaucoup plus élevés, la vente d'électricité subventionnée permet de compenser une partie de ces coûts. De plus, cette sous-action méthanisation permet de produire de l'énergie renouvelable. Pour les 2 sous-actions, les calculs de coûts ont été effectués à partir de données macroscopiques et en considérant une exploitation moyenne et correspondent donc à des coûts moyens. Les économies d'échelle engendreront des coûts plus faibles pour les exploitations les plus importantes et des coûts supérieurs pour les plus petites exploitations. Les différents points d'incertitudes et les études de sensibilité montrent que l'incertitude pour les potentiels d'atténuation est de l'ordre de 20-25% et pourrait même atteindre des valeurs plus importantes (50%) en considérant que la totalité de ces incertitudes sont défavorables. Au niveau des coûts, les études de sensibilité montrent qu'en fonction des hypothèses, le coût unitaire de la méthanisation varie de -2,5 à 54,9 €/t CO_2e alors que ce coût pour la couverture/torchère peut atteindre près de 90 €/t CO_2e .

Au final, même si de nombreuses incertitudes apparaissent, aussi bien sur le potentiel d'atténuation que sur les coûts associés, ces actions permettent une atténuation intéressante. La méthanisation est d'ailleurs une action qui se développe déjà, notamment du fait de son intérêt vis-à-vis de la production d'énergie renouvelable. Il convient toutefois d'accompagner la mise en œuvre de ces actions, notamment la méthanisation, et de maîtriser les effets négatifs induits tels que les émissions de NH_3 et les fuites de CH_4 .



10

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

↘ 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

I- Enjeu et principe de l'action

Avec 3650 ktep consommés en 2012, le secteur agricole représente 2,4% de la consommation énergétique nationale si l'on considère uniquement l'énergie directement consommée sur l'exploitation. Le premier poste de consommation correspond aux engins agricoles, et le deuxième aux bâtiments (serres, locaux d'élevage, séchoirs, ateliers lait) pour le chauffage, la ventilation, l'éclairage...

Les principales sources d'énergie utilisées sont des combustibles fossiles (gaz, gazole, fioul) et de l'électricité. Les émissions de GES associées interviennent majoritairement sur l'exploitation pour les énergies fossiles (émissions *directes* des engins agricoles par ex.), et en amont de l'exploitation pour l'électricité (émissions *induites*, liées à la production d'électricité dans des centrales thermiques par ex.). Les émissions dues aux consommations directes d'énergie fossile sont estimées à 11 millions de tonnes de CO₂ équivalent (MtCO_{2e}) en 2010 pour l'agriculture, la sylviculture et la pêche, qui sont agrégées dans l'inventaire national, soit 10%

des émissions du secteur agricole français.

L'action vise la mise en place de solutions techniques pour réduire la consommation de combustibles fossiles et les émissions directes associées intervenant sur l'exploitation. La diminution des émissions induites n'est pas ciblée. Les activités et ateliers utilisant de l'électricité ne sont donc pas visés par l'action puisque les émissions associées ont lieu hors de l'exploitation. Les substitutions d'énergies fossiles par des énergies renouvelables produites sur l'exploitation n'entrent pas non plus dans le champ de l'action.

L'objectif, au niveau de cette action comme de l'ensemble de l'étude, n'est pas l'exhaustivité, mais l'examen de quelques cas présentant un potentiel significatif d'atténuation des émissions de GES. Les trois sous-actions retenues sont la réduction des consommations énergétiques des bâtiments d'élevage de volailles de chair (chauffés au gaz), des serres chaudes et des tracteurs.

II- Mécanismes et modalités techniques de l'action

• Les émissions liées à l'utilisation d'énergie fossile

La consommation d'énergies fossiles (produits issus du pétrole, gaz...) donne majoritairement lieu à des émissions de CO₂ mais elle peut aussi émettre, si la combustion est incomplète, des oxydes d'azote – dont du protoxyde d'azote (N₂O). Pour cette raison les facteurs d'émission affectés aux différentes sources fossiles (Tableau 1) sont exprimés en équivalent CO₂ (CO_{2e}).

Ces facteurs d'émission distinguent les émissions *directes*, liées à la combustion sur l'exploitation, et les émissions *induites* associées, en amont, à la production et l'acheminement des combustibles ; les secondes sont nettement plus faibles. Ces facteurs ne sont pas discutés ou soumis à révision : les valeurs retenues par le GIEC en 2006 diffèrent très peu de celles de 1996.

• La connaissance des consommations énergétiques

Les incertitudes concernent les consommations et économies d'énergie, c'est-à-dire : la consommation énergétique des bâtiments et installations en place, les performances des divers équipements (de chauffage ou d'isolation par exemple) et les effets des condi-

tions pratiques d'utilisation (optimisation ou non des réglages...), ainsi que les effectifs nationaux (tracteurs utilisés par exemple). L'évaluation des effets des mesures d'économie d'énergie est donc confrontée à la question de la disponibilité et de la fiabilité des références techniques.

Concernant les consommations énergétiques actuelles des serres et des bâtiments d'élevage, les références fournies par le CPDP¹³ (utilisées par le CITEPA) donnent une consommation de gaz pour les activités agricoles (serres + bâtiments d'élevage) d'environ 260 ktep pour 2005 (230 ktep pour 2011). Mais les estimations réalisées pour cette étude, sur la base de consommations relevées en 2005-2006 (publiées par le CTIFL, l'IFIP et l'ITAVI), atteignent 430 ktep (sans prise en compte des tunnels hors gel et de la part de bâtiments d'élevage de porcins et veaux utilisant du gaz).

Concernant les performances des différents matériels et équipements, des références sont diffusées avec la mise en place, depuis quelques années, de plusieurs dispositifs (PPE, CEE... ; voir section IV) visant le développement des économies d'énergie.

Enfin, pour de nombreuses pratiques, simples, d'économie d'énergie (réglages...), on ne dispose pas de références quantifiant leurs effets ; elles ne peuvent donc être prises en compte.

• Les sous-actions et options techniques étudiées

Les cas examinés ont été choisis parce qu'ils contribuent significativement à la consommation d'énergie fossile sur les exploita-

Type de combustible	Emissions directes (kgCO _{2e} /kWh)	Emissions induites (kgCO _{2e} /kWh)
Gaz naturel	0,205	0,04
Propane/butane	0,231	0,04
Fioul domestique/ Gazole	0,271	0,03
Fioul lourd	0,282	0,04
Charbon	0,341	0,07

Tableau 1. Facteurs d'émissions directes (combustion) et induites (production) de GES des combustibles fossiles (Source : ADEME 2010)

¹³ Sigles utilisés. CPDP : Comité professionnel du pétrole ; CTIFL : Centre technique interprofessionnel des fruits et légumes; IFIP : Institut du porc ; ITAVI : Institut technique de l'aviculture.

tions à l'échelle française, que des techniques d'économie d'énergie sont effectivement disponibles sur le marché et que leurs effets sont documentés.

A. Bâtiments d'élevage de volailles de chair. Ils ont été choisis pour leur chauffage majoritairement au propane (contrairement aux bâtiments des bovins et porcins, plutôt chauffés à l'électricité). Les propositions d'économies de chauffage étudiées sont :

1. l'installation d'échangeurs de chaleur air-air (qui permettent de prélever une partie de la chaleur contenue dans l'air extrait du bâtiment pour la transférer à l'air neuf y entrant) ;
2. l'équipement en matériel de chauffage de technique récente : radiants nouvelle génération ou aérothermes (canon à air chaud intérieur et suspendu dans le bâtiment) ;
3. l'isolation du bâtiment.

B. Serres chauffées. Pour ces serres dédiées essentiellement aux productions de concombre et tomate, les 2 propositions sont :

1. la pose d'un double écran thermique qui se positionne au-dessus des cultures pour diminuer les déperditions calorifiques ;
2. l'installation d'un ballon de stockage d'eau chaude (classique ou de type *open buffer*) qui permet (par le découplage, partiel ou

complet, de la production de chaleur et de sa distribution dans la serre) un fonctionnement de la chaudière à régime constant avec un rendement maximal.

C. Tracteurs. Ils représentent de l'ordre de 90% de la consommation de gazole du parc d'engins agricoles français. Les 2 pistes d'atténuation sont :

1. le diagnostic moteur par le passage des tracteurs sur un banc d'essai moteur (BEM), diagnostic qui permet d'optimiser le réglage du moteur ;
2. l'application des règles de l'éco-conduite (promues notamment par les CUMA).

• Autres effets de l'action sur les GES

En modifiant les conditions d'ambiance dans les bâtiments d'élevage, des techniques comme les échangeurs de chaleur et l'amélioration de l'isolation peuvent réduire les émissions d'ammoniac (NH₃), et induire une litière plus sèche, moins émettrice de méthane (CH₄) et moins lourde (économie de gazole lors de la sortie du bâtiment des effluents). Ces effets ne seront pas comptabilisés.

III- Calculs du potentiel d'atténuation et du coût de l'action

• Systèmes et modalités de calcul retenus

Les calculs d'estimations des potentiels d'atténuation et des coûts portent sur les systèmes suivants :

Bâtiments avicoles. Les références techniques disponibles concernant les économies d'énergie (ITAVI) étant exprimées par animal produit, cette unité sera utilisée pour les calculs unitaires. Les calculs réalisés différencient 10 catégories de volailles, définies par l'espèce (poulet, pintade, canard et dinde) et le type de production (standard ou à durée d'élevage plus longue) ; les effectifs sont ceux de la SAA 2010. Les équipements sont raisonnés pour un bâtiment de taille moyenne (1200 m²). Le combustible utilisé est le propane.

Serres chaudes. L'analyse distingue les serres de maraîchage et d'horticulture ornementale (leurs équipements sont différents), ainsi que les effectifs par combustible utilisé (gaz naturel, propane/butane, fioul domestique, fioul lourd ou charbon). Les calculs sont conduits par unité de surface ; la source statistique est le Recensement agricole 2010.

Tracteurs. Les calculs, effectués par tracteur, considèrent deux catégories d'engins, selon leur puissance (inférieure ou supérieure à 80 chevaux). La source statistique est le recensement "Matériel" réalisé en 2005 (Agreste).

Les économies d'énergie permises par les différentes solutions techniques envisagées figurent dans le Tableau 2. Pour certaines techniques, l'économie d'énergie apparaît variable, en fonction du type de matériel mais aussi des conditions climatiques par exemple. Dans le cas de l'isolation, la performance dépend notamment des surfaces traitées (toiture, soubassement et/ou côtés). Seules les valeurs moyennes sont reprises ici.

• Estimation du potentiel d'atténuation unitaire

Le seul effet pris en compte est celui de la baisse de la consommation de combustible fossile, qui réduit les émissions directes de GES (principalement de CO₂, effet visé) ainsi que les émissions induites en amont de l'exploitation. Les émissions directes sont comptabilisées dans la catégorie "Energie" (1A4C) de l'inventaire national - qui agrège agriculture, sylviculture et aquaculture.

Pour estimer ces émissions, la méthode utilisée par le CITEPA pour l'inventaire de 2010 multiplie les consommations annuelles d'énergie fossile (par type de combustible) par le facteur d'émission affecté au combustible utilisé (cf. Tableau 1).

La méthode de calcul "expert" reprend le principe, les modalités de calcul et les facteurs d'émission appliqués par le CITEPA, mais utilise, pour les bâtiments d'élevage et les serres, les références de consommation énergétique établies par les instituts techniques concernés (ITAVI et CTIFL) et non celles du CPDP. Les émissions induites sont estimées en utilisant les facteurs d'émission fournis par la Base Carbone@.

Les économies d'énergie (exprimées en % de la consommation unitaire initiale) permises par les solutions techniques examinées sont déterminées :

- pour les bâtiments avicoles, principalement d'après les références du Guide des bonnes pratiques environnementales (RMT Elevage-Environnement). A noter, pour les échangeurs de chaleur notamment, la forte variabilité des performances annoncées (valeurs basées sur très peu d'études, matériel en cours de développement...);
- pour les serres, d'après les indications figurant dans les Certificats d'économie d'énergie, et des données techniques du CTIFL et de la recherche agronomique (EPHOR) ;
- pour les tracteurs, d'après les essais et tests sur le terrain réalisés par l'association AILE, et les valeurs retenues dans le Certificat d'économie d'énergie concernant le banc d'essai moteur.

• Estimation du coût unitaire pour l'agriculteur

Le coût pour l'agriculteur comprend :

- le coût d'investissement associé à l'achat et l'installation de l'équipement (amorti sur 7 ou 15 ans selon les cas), et éventuellement le manque à gagner durant la réalisation des travaux ; le fonctionnement n'occasionne ensuite aucun surcoût ni modification du temps de travail ;
- les économies de combustibles permises par l'action, calculées aux prix 2010 des énergies.

	Sous-actions	A. Bâtiments avicoles			B. Serres chauffées		C. Tracteurs	
		1. Echangeurs	2. Aérothermes et radiants	3. Isolation	1. Ecrans thermiques	2. Ballon d'eau chaude	1. Banc d'essai	2. Eco-conduite
Contenu technique	Situation initiale	Chauffage au propane 10 catégories d'animaux Consommation en kg gaz / animal : de 0,033 (poulet export) à 0,369 (dinde certifiée)			Chauffage: gaz naturel, propane/butane, fioul domestique, fioul lourd ou charbon 2 types de serres : maraîchères ou d'horticulture ornementale		Consommation de gazole : <80 ch : 5 l/h ; >80 ch : 10 l/h Utilisation : 500 h/an	
	Modification des équipements	Améliorer le système de chauffage et l'isolation (unité = animal produit)			Améliorer l'isolation et installer des ballons d'eau chaude (classique ou type <i>open buffer</i>) (unité = surface de serre)		Réduire la consommation de gazole Eco-conduite Réglages après BEM (unité = tracteur)	
	Economie d'énergie	15 à 50% selon nombre et type d'échangeurs (Moy. = 32,5%)	Aérothermes : 25%	30 à 50% (Moy. = 40%)	5 à 22% (Moy. = 13,5%)	7%	10%	20%
Potentiel d'atténuation unitaire	Fourchette Unité	selon catégorie d'animaux (poulet export à dinde certifiée) kgCO ₂ e/animal produit			selon combustible et zone géographique kgCO ₂ e/m ² /an		kgCO ₂ e/tracteur/an	
	Emissions dir. de CO ₂ e (combustibles)	0,034 à 0,382	0,028 à 0,311	0,04 à 0,47	Maraî.: 8,6 à 14,4 Horti.: 4,3 à 6,0	Maraîch.: 4,7 à 7,8 Horti.: 2,3 à 3,2	<80 ch : 669 >80 ch : 1 472	<80 ch : 1 338 >80 ch : 2 944
	Emissions induites (amont) de CO ₂ e	0,006 à 0,073	0,005 à 0,059	0,01 à 0,09	Maraîch.: 1,1 à 1,8 Horti.: 0,6 à 0,9	Maraîch.: 0,6 à 1,0 Horti.: 0,3 à 0,5	<80 ch : 73 >80 ch : 161	<80 ch : 147 >80 ch : 323
	Total	0,040 à 0,455	0,033 à 0,370	0,05 à 0,56	Maraî.: 10,1 à 15,5 Horti.: 5,1 à 6,8	Maraîch.: 5,5 à 8,4 Horti.: 2,7 à 3,6	<80 ch : 742 >80 ch : 1 633	<80 ch : 1 485 >80 ch : 3 267
Coût unitaire	Investissement	30 000 € (amorti sur 7 ans)	Radiants 5000W 10 000 €	43 €/m ² HT (29 à 57 €/m ²)	Maraîch.: 7€/m ² Horti.: 12 €/m ²	4 à 6 €/m ² HT	1 passage BEM (tous les 6 ans): 200 €/tracteur	Formation (tous les 6 ans) : 220 €
	Unité	€/animal produit			€/m ²		€/heure	
	Economie d'énergie	0,051 à 0,191	0,041 à 0,156	0,051 à 0,235	Maraîch.: 2,6 Horti.: 2,6	Maraîch.: 0,9 Horti.: 0,5	<80 ch : 0,23 >80 ch : 0,47	<80 ch : 0,47 >80 ch : 0,94
	Unité	€/animal (fourchette : poulet export à dinde certif.)			€/m ² /an		€/tracteur/an	
Total	-0,010 à +0,045	-0,042 à -0,139	-0,043 à +0,009	Maraîch.: -0,2 Horti.: 0,2	Maraîch.: -1,9 Horti.: -1,3	<80 ch : -92 >80 ch : -222	<80 ch : -218 >80 ch : -478	
Assiette	Assiette théorique	Tous les bâtiments Toutes les volailles de chair (toutes filières) (886 millions d'animaux produits en 2010)			Toutes les serres (2537m ²)		Tous les tracteurs effectivement en service (840 000)	
	Critères techniques	Pas de limitation technique			Pas de critères spécifiques		Tracteurs récents (1/3 du parc)	Tout le parc de tracteurs utilisés
	Ass. Maximale Technique (AMT)	886 millions de volailles de chair / an			Double écran : Maraîch. : 1300 ha Horti.: 1237 ha	Ballon classique : 247 ha Ballon <i>open buffer</i> : 468 ha	<80ch : 131 600 tracteurs >80ch : 148 400	<80ch: 394 800 tracteurs >80ch : 445 200
Scénario de diffusion	Etat de référence 2010	Hypoth. : 5% des élevages déjà dotés d'échangeurs de chaleur, ou d'équipements de chauffage de nouvelle génération, ou isolés en 2010 (20% en 2012)			Serres déjà équipées : 20%	Déjà équipées : Maraîch.: 65% Horti.: 80%	Hypoth. : déjà fait pour 5% des tracteurs	Hypoth. : déjà appliqué à 5% des tracteurs
		En 2030 : 80% de l'AMT			100% de l'AMT	favorisé par les aides et le coût de l'énergie 100% de l'AMT	80% de l'AMT	80% de l'AMT
	Scénario de diffusion							

Tableau 2

Le bilan (montant de l'investissement et dépenses évitées) est "négatif", c'est-à-dire qu'il correspond à un gain pour l'agriculteur, pour presque toutes les situations examinées (Tableau 2).

• Estimation de l'impact à l'échelle nationale

Assiette maximale technique (AMT)

Pour les 3 sous-actions, les assiettes théoriques correspondent à tout l'effectif de bâtiments, de serres, de tracteurs en service (80% du parc national de tracteurs). Aucune contrainte technique ne restreint cette assiette :

- pour les élevages avicoles, les 3 solutions pouvant être mises en place dans tous les bâtiments, qu'ils soient à ventilation naturelle ou dynamique et quelle que soit leur dimension ;
- pour les serres, les deux solutions peuvent être mises en place dans toutes les serres chaudes sur le territoire national ;
- pour les tracteurs : l'éco-conduite concerne l'ensemble du parc.

Une limitation technique de l'assiette n'intervient que pour le passage au BEM, qui n'est pertinent que pour les tracteurs récents (estimés à 1/3 du parc actuel), sur lesquels les réglages à effectuer seront les moins coûteux.

Scénario de diffusion de l'action

Concernant l'état de **référence 2010**, l'hypothèse définie par défaut (ou au vu de données 2012) est que la technique est déjà mise en œuvre sur 5% de l'effectif ; cette hypothèse est retenue pour les 3 solutions "bâtiments avicoles" et les 2 solutions "tracteurs". Pour les serres, des données d'enquêtes 2011 sont disponibles.

Concernant la vitesse de diffusion de l'action, les hypothèses sont :

- pour les élevages avicoles : une adoption très rapide pour les échangeurs de chaleur (déjà 20% des bâtiments sont équipés en 2012 ; dans le cadre du Plan de Performance Énergétique, les filières standard s'y intéressent ; l'optimisation des systèmes progresse vite), et rapide pour les aérothermes ; la cinétique est plus lente pour l'isolation car les travaux sont contraignants et peuvent nécessiter une cessation temporaire d'activité ;
- pour les serres : une installation progressive des ballons est favorisée par plusieurs dispositifs (cf. section IV) et l'augmentation des prix de l'énergie ; il en est de même pour les écrans thermiques ;
- pour les tracteurs : une diffusion potentiellement rapide est conditionnée par le nombre de formations à l'éco-conduite et le développement des BEM.

IV- Résultats et mise en perspective

		Année 2030						Cumul sur la période 2010-2030							
		Bâtiments avicoles			Serres chauffées		Tracteurs		Bâtiments avicoles			Serres chauffées		Tracteurs	
		A1	A2	A3	B1	B2	C1	C2	A1	A2	A3	B1	B2	C1	C2
Potentiel d'atténuation (méthode "CITEPA")		ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Potentiel d'atténuation (méthode "expert")	Sans émissions induites	0,065	0,053	0,079	0,052	0,028	0,230	1,379	1,098	0,802	1,202	0,696	0,376	3,481	20,89
	Avec émissions induites	0,077	0,063	0,095	0,062	0,033	0,255	1,531	1,303	0,956	1,434	0,828	0,447	3,862	23,18
Coût total pour les agriculteurs	€M	1,6	-37,4	-21,27	-11,4	-0,2	-33,8	-224,5	27,1	-566,9	-322,1	-152,5	-2,9	-511,9	-3398,8
Coût de la tonne de CO₂e pour l'agriculteur (méthode "expert", sans émissions induites)	€/CO ₂ e	25	-707	-268	-221	-8	-145	-163	-	-	-	-	-	-	-

M : millions. ND : données non disponibles

Tableau 3

• Les résultats

Bâtiments avicoles :

Quelle que soit la solution technique proposée, l'atténuation potentielle unitaire (par animal) est plus importante pour les productions ayant les durées d'élevage les plus longues, (donc les consommations de gaz les plus élevées). Les potentiels les plus faibles sont ainsi obtenus pour la filière standard poulet, et les plus élevés pour la filière dinde (certifiée et standard). Le potentiel d'atténuation des émissions induites en amont de l'exploitation (production et fourniture des sources d'énergie) est d'environ 10% de celui des émissions directes de GES.

Quelle que soit la solution technique proposée, les coûts calculés sont des gains pour l'exploitant, sauf pour certaines filières avec la solution échangeur. Ces gains sont toutefois très variables selon les filières, et dépendantes des solutions techniques. Leur estimation reste tributaire des incertitudes pesant sur les coûts d'investissement et sur les performances en termes d'économie

d'énergie, qui se situent dans une fourchette de 15% à 50% dans les deux cas. Les coûts des différentes options seraient aussi nettement modifiés par une hausse même modérée du prix du gaz (cf. infra).

Serres :

Les atténuations potentielles sont plus élevées en maraîchage qu'en horticulture, les consommations d'énergie des serres maraichères étant plus élevées.

Le double écran thermique est la solution permettant le gain le plus élevé par tonne de CO₂e évité et l'abattement des émissions directes et induites le plus fort, quelle que soit la filière. L'intérêt du ballon de stockage dépend davantage de la filière et de la latitude ; les gains sont décroissants selon un gradient géographique nord-sud.

Le potentiel d'atténuation unitaire des émissions induites en amont varie en fonction du type d'énergie entre 11 et 22% du potentiel d'atténuation des émissions directes de GES.

Tracteurs :

Les gains sont nettement plus élevés pour l'éco-conduite que pour le banc d'essai, en raison d'une assiette 3 fois plus large et d'un facteur d'atténuation 2 fois plus élevé (20% contre 10%) pour l'éco-conduite. Les différences de coût par tracteur en fonction de la puissance s'annulent lorsque le coût est ramené à la tonne de CO_{2e} évité.

Le fait que la majorité des pistes examinées apparaissent rentables pour l'agriculteur pose la question des raisons de leur non-adoption ; pour les bâtiments et les serres, le montant de l'investissement et la disponibilité de trésorerie peuvent constituer un frein.

Comparaison entre les sous-actions

Les techniques qui offrent le **potentiel d'abattement** le plus élevé sont l'isolation pour les bâtiments d'élevage et les serres (double écran thermique), et l'éco-conduite pour les tracteurs.

La comparaison des **coûts de la tonne de CO_{2e} évité** montre que les solutions techniques les moins onéreuses (ou les plus rentables) sont le matériel de chauffage pour les bâtiments avicoles et le double écran thermique pour les serres ; concernant les tracteurs, les coûts sont très proches pour l'éco-conduite et le banc d'essai.

Les différentes solutions techniques retenues pour une même sous-action peuvent pour certaines être cumulées, mais dans ce cas aucun élément ne permet de calculer l'atténuation d'émissions résultante (qui sera généralement inférieure à la somme des atténuations permises par chaque technique).

• La sensibilité des résultats aux hypothèses

Les atténuations d'émissions de GES étant déduites d'une économie d'énergie exprimée en pourcentage d'une consommation initiale, les estimations sont particulièrement sensibles aux valeurs retenues pour cette consommation de référence initiale.

Les calculs d'atténuation sont aussi dépendants des incertitudes ou de la variabilité affectant les performances des équipements (échangeurs de chaleur, isolation des bâtiments, écran thermique, notamment) et des pratiques, et des hypothèses de mise en œuvre. Ainsi par exemple, l'économie de gazole comptabilisée suppose que l'agriculteur applique effectivement toutes les règles de l'éco-conduite et des réglages moteur, suite au diagnostic BEM.

Ces incertitudes sur l'évaluation de l'économie d'énergie permise par l'action se répercutent sur l'estimation de son coût, qui est de plus, sensible aux hypothèses retenues pour le prix des combustibles et le coût des équipements.

La variabilité des coûts d'investissement (de l'ordre de 15% à 50%) pour les équipements destinés aux bâtiments avicoles, et une augmentation de 16% du prix des échangeurs (achat + installation), par exemple, donnent lieu à une diminution de 50% des gains. Pour les tracteurs, les prix (formation et diagnostics) sont en revanche peu variables.

L'impact du prix des énergies sur les coûts des 3 sous-actions a été testé. Une augmentation de 10% (c'est-à-dire faible) du coût de l'énergie induit une augmentation du gain qui peut aller jusqu'à 50% (ex : échangeurs de chaleur pour les poulets). Elle n'est en revanche pas suffisante pour transformer les coûts en gain pour les échangeurs en élevage de dinde standard (coûts annulés pour un renchérissement de 35% de l'énergie) ou pour les ballons de stockage en culture ornementale.

Enfin dans les années à venir, le réchauffement climatique peut conduire à des diminutions des consommations d'énergie fossile pour le chauffage, mais engendrer une augmentation de la

demande en eau (refroidissement évaporatif) ou en électricité (ventilation, climatisation).

• Les conditions d'une prise en compte de l'action dans l'inventaire national

Comptabilisation des effets

L'action énergie est prise en compte, mais elle est sous-estimée car les consommations de gaz des serres et bâtiments d'élevage sont sous-évaluées dans le calcul du CITEPA. Par conséquent, les réductions d'émissions quantifiées dans cette étude ne pourraient être effectivement prises en compte que si le CITEPA modifiait ses modalités de calculs pour ces postes, ou si le CPDP revoyait ses estimations de consommations de gaz pour le secteur agricole.

Vérifiabilité de la mise en œuvre de l'action

Le contrôle de l'efficacité de la mise en place des solutions techniques proposées est tributaire de plusieurs facteurs :

- une systématisation des bilans énergétiques des exploitations (Dia'terre® - Ges'tim par ex.) ;
- la modification des modalités de calcul des inventaires du CITEPA (ventilation par poste et source d'énergie) ;
- compléter le contenu des enquêtes nationales avec un volet énergie détaillé incluant les équipements en place, et les ventilations par poste.

• Les contextes et mesures susceptibles de favoriser le déploiement de l'action

Depuis plusieurs années la tendance à la hausse des prix de l'énergie constitue un contexte favorable à la mise en place et au développement de solutions permettant la réduction des consommations de l'énergie des exploitations. Par ailleurs, une politique de soutien aux investissements a été mise en place.

Les **bâtiments avicoles** peuvent ainsi bénéficier depuis 2009 d'aides *via* :

- le Plan de Performance Energétique (PPE, inscrit dans le cadre du second pilier de la PAC et du Programme de développement rural hexagonal) qui propose un soutien pour des investissements permettant des économies d'énergie sur l'exploitation ; l'amélioration de l'isolation ou l'installation d'échangeurs de chaleur sont des investissements éligibles ;
- le Plan de Modernisation des Bâtiments d'Elevage (PMBE) qui, pour soutenir la compétitivité des filières, peut subventionner des équipements améliorant l'utilisation des facteurs de production. Grâce à ces soutiens publics et aux progrès techniques réalisés, l'installation de matériels tels que les échangeurs de chaleur se développe (20% des élevages en volailles de chair en étaient déjà équipés en 2012, selon l'ITAVI).

Les **serres chauffées** peuvent bénéficier :

- du dispositif des Certificats d'Economies d'Energie (CEE, créés par la loi de 2005 sur les orientations de la politique énergétique) que les vendeurs d'énergie ont l'obligation d'acquérir, en aidant financièrement leurs clients à réaliser des économies d'énergie ; les ballons d'eau chaude font partie des "opérations standardisées" du dispositif ;
 - des aides financières proposées (depuis octobre 2012) par FranceAgriMer pour moderniser les serres et notamment améliorer leur efficacité énergétique ; ballons d'eau chaude et écran thermique sont des dépenses éligibles.
- Ces dispositifs et l'augmentation des coûts de l'énergie ont déjà favorisé l'installation de ballons dans les serres.

Pour les **tracteurs**, les agriculteurs peuvent bénéficier d'un CEE pour le passage au banc d'essai moteur.

• Les autres effets de l'action

Les réductions de consommation d'énergies fossiles auront un impact sur les autres émissions intervenant lors de la combustion : émissions de particules, SO₂, CO, NO_x et COV (composés organiques volatils). L'action pourrait donc contribuer à l'atteinte de l'objectif de diminution (30% pour les particules) fixé dans le cadre du deuxième Plan National Santé-Environnement (PNSE), et plus globalement à l'amélioration de la qualité de l'air. Toutefois, certains éleveurs notent, avec les échangeurs, une augmentation de la poussière dans l'air, préjudiciable pour leur santé et celle des volailles.

• Conclusions

Pour cette évaluation des potentiels d'atténuation des émissions de GES par la réduction des consommations énergétiques, seules des solutions techniques dont l'efficacité a été prouvée et quantifiée ont été retenues. D'autres techniques, parfois plus simples et économes, existent (nettoyage des sondes de température, adaptation de la puissance moteur au travail à effectuer...); elles n'ont pu être examinées car aucune quantification de leur

efficacité n'est disponible. Des modifications des pratiques d'élevage (démarrage en poussinière, par ex.) pourraient également permettre des économies d'énergie substantielles. Mais, même lorsqu'elles sont recommandées dans le Guide des bonnes pratiques d'élevage, ces options n'ont fait l'objet d'aucune évaluation.

Les potentiels d'atténuation calculés les plus élevés sont obtenus pour les tracteurs, mais en faisant l'hypothèse d'un comportement optimal de l'exploitant (respect des règles de l'éco-conduite et réglage du tracteur après passage sur le banc d'essai). Pour les deux autres sous-actions, les performances sont moindres mais non liées (ou beaucoup moins) au comportement de l'exploitant. En outre, pour la majorité des sous-actions proposées, l'application des techniques retenues permet de générer des gains financiers pour l'exploitant, parfois très conséquents.

Enfin, conformément au cahier des charges de cette étude, seuls les filières et secteurs consommateurs d'énergie fossile sur l'exploitation (et donc émetteurs de GES sur l'exploitation) ont été considérés. Une étude visant à chiffrer les économies d'énergies dans le secteur agricole toutes formes d'énergies confondues (incluant l'électricité) aboutirait par construction à des conclusions différentes.

Partie III

Analyse comparée et conclusion

5. Analyse comparée des dix actions proposées

5.1. Atténuation cumulée de l'ensemble des actions et sous-actions

● Calcul sous hypothèse d'additivité entre actions et sous-actions

Sous hypothèse d'additivité, et en appliquant les modes de calcul utilisés par le CITEPA pour l'inventaire national 2010, l'atténuation annuelle cumulée hors émissions induites pour l'ensemble des actions est de 10 Mt CO₂e par an en 2030. L'atténuation ainsi calculée représente 9,5% des émissions 2010 du secteur agricole (incluant la consommation d'énergies fossiles, mais hors UTFC), qui se sont élevées à 105 Mt CO₂e (CITEPA 2012).

Les équations de calcul mises en œuvre par le CITEPA pour l'inventaire des émissions nationales suivent des recommandations établies au niveau international. Par construction, certaines de ces équations ne permettent pas de rendre compte de l'atténuation escomptée de certaines actions ou sous-actions proposées dans le cadre de cette étude. C'est le cas pour les actions favorisant le stockage de carbone dans les sols et la biomasse *via* des techniques culturales mises en œuvre sans changement d'usage des terres, comme Non-labour ou Agroforesterie. C'est aussi le cas pour les postes d'émissions calculés à partir de valeurs forfaitaires, comme l'émission de méthane entérique par les ruminants, ce qui ne permet pas de rendre compte des modifications proposées des rations alimentaires. Des évolutions sont en cours, grâce à des travaux ayant abouti à des propositions permettant de mieux rendre compte de l'effet des pratiques agricoles dans l'inventaire national (projet "Mondferent"¹⁴ pour les émissions de méthane entérique, par exemple), mais leur mise en œuvre dans l'inventaire nécessite une validation préalable au niveau international. Par construction, le mode de calcul du CITEPA utilisé pour l'inventaire 2010 sous-estime donc l'atténuation globale escomptée des actions et sous-actions analysées ici.

C'est pour cette raison qu'un second mode de calcul a été mis en œuvre par les experts. Les atténuations annuelles en 2030 pour l'ensemble des actions et sous-actions, estimées avec le mode de calcul alternatif proposé par les experts, sont récapitulées dans le Tableau 1. Pour les actions ou sous-actions pour lesquelles plusieurs options techniques alternatives ont été explorées, seule l'une d'entre elles a été reportée (labour un an sur cinq pour l'action Non-labour, par ex.).

Avec le mode de calcul proposé par les experts, toujours sous hypothèse d'additivité, l'atténuation annuelle cumulée des actions et sous-actions hors émissions induites est de 32,3 Mt CO₂e par an pour l'année 2030, soit plus de trois fois supérieure au calcul précédent. Ce second chiffre ne peut pas être rapproché des émissions d'origine agricole calculées dans le cadre de l'inventaire national puisque les modes de calcul diffèrent. Un tel rapprochement nécessiterait de recalculer les émissions agricoles de l'année 2030 avec les modes de calcul proposés par les experts, calcul qu'il n'a pas été possible de mener à bien dans le temps contraint de cette étude.

● Essai de calcul en tenant compte des interactions entre actions et sous-actions

La mise en œuvre d'une action ou d'une sous-action est susceptible de modifier le potentiel d'atténuation et/ou le coût d'une autre action ou sous-action du fait d'interactions. Celles-ci peuvent porter sur l'assiette (la mise en œuvre d'une action modifie l'assiette d'une autre action : l'accroissement de la surface en légumineuses diminue l'assiette de l'action portant sur la fertilisation azotée, par ex.) et/ou sur le potentiel d'atténuation ou le coût unitaire (la mise en œuvre d'une action modifie la valeur de variables utilisées pour calculer le potentiel d'atténuation ou le coût d'une autre action : par ex., la réduction des doses d'azote minéral liée à un meilleur ajustement des objectifs de rendement diminue la quantité d'azote minéral qui peut être économisée par l'introduction d'un inhibiteur de nitrification). L'effet sur le potentiel global d'atténuation de la prise en compte de ces interactions dépend en outre de l'ordre dans lequel les actions et sous-actions sont mises en œuvre : par exemple, si le non-labour est appliqué en premier, il n'est alors plus possible d'introduire davantage de légumineuses (du pois en l'occurrence) dans la sole en grandes cultures, le pois nécessitant un labour ; inversement, introduire d'abord les légumineuses limite la mise en œuvre du non-labour. Plusieurs hypothèses de calcul sont donc possibles. La méthode qui a été utilisée ici calcule d'abord les interactions entre sous-actions à l'intérieur d'une action, puis les interactions entre actions, en faisant l'hypothèse que les actions touchant l'assolement sont mises en œuvre en premier.

Les actions présentant des interactions "internes" entre sous-actions sont les actions Fertilisation, Economies d'énergie, et Méthanisation et torchères. Pour les deux premières, les interactions portent sur les consommations de référence des intrants. Ainsi, la dose d'engrais minéral de référence apportée à chaque culture décroît successivement après ajustement de l'objectif de rendement, puis la prise en compte des apports d'azote organique, la suppression du premier apport, l'introduction d'un inhibiteur de nitrification et enfin une meilleure localisation des apports d'engrais. De même, la consommation de référence de gaz des élevages diminue après la mise en œuvre, successivement, de l'isolation, puis d'échangeurs de chaleur, enfin d'un nouveau système de chauffage. Pour les méthaniseurs et torchères, l'interaction porte sur l'assiette des sous-actions, c'est-à-dire le nombre d'exploitations sur lesquelles elles peuvent être mises en œuvre. Les calculs de ces interactions sont fournis dans le rapport. Au final, en tenant compte des interactions intra-actions, le potentiel d'atténuation total diminue de 32,3 Mt CO₂e par an à 31,5 Mt CO₂e par an pour l'année 2030.

Les interactions entre actions portent principalement sur les assiettes (par exemple, les surfaces occupées par des bandes enherbées ou des haies ne sont plus concernées par la gestion de la fertilisation), mais aussi, dans certains cas, sur les "intrants" (les déjections émises sur les prairies lors de l'allongement du pâturage ne sont ainsi plus disponibles pour la méthanisation). Pour évaluer l'impact de ces interactions sur le potentiel d'atténuation annuel en 2030, trois étapes ont été mises en œuvre. L'assolement de référence a été recalculé après application des sous-actions Légumineuses sur cultures, Agroforesterie, Haies et Bandes enherbées. Puis, l'assiette maximale technique atteinte

¹⁴ Le projet "Mondferent" a pour objectif d'améliorer la méthode d'estimation du méthane entérique émis par les bovins pour augmenter la fiabilité des calculs réalisés pour l'inventaire (convention INRA-MAAF).

en 2030 a été recalculée pour chacune des autres sous-actions, selon les critères techniques utilisés par les experts pour déterminer l'AMT. Enfin, les potentiels d'atténuation unitaires moyens des différentes sous-actions ont été appliqués à ces nouvelles assiettes. Les interactions "d'intrants" ont été considérées pour les actions portant sur la fertilisation et les effluents d'élevage.

En appliquant ces deux calculs, à savoir la prise en compte des interactions intra-actions puis entre actions, le potentiel d'atténuation cumulé pour l'ensemble des sous-actions diminue de 32,3 à 29,6 MtCO_{2e} par an, soit une réduction de 8%. L'utilisation de deux autres méthodes de calcul (mise en œuvre

des sous-actions par ordre de coûts croissants ou par ordre de potentiels d'atténuation décroissants) conduit à des diminutions plus fortes et donc à des atténuations cumulées plus faibles ; les ordres de grandeur sont néanmoins voisins, respectivement 26,6 et 28,4 MtCO_{2e}.

Au total, la prise en compte des interactions entre actions et sous-actions réduit le potentiel cumulé d'atténuation de 8 à 18% selon le mode de calcul adopté. Ce pourcentage de baisse assez faible s'explique par le fait que les actions et sous-actions proposées portent sur une diversité d'ateliers et de pratiques (productions végétales, productions animales, gestion des effluents...) distincts, donc sans "chevauchements" majeurs.

Sous-actions		Potentiel d'atténuation annuel (en Mt CO _{2e} par an) en 2030
Diminuer les apports de fertilisants minéraux azotés		
①	A. Réduire la dose d'engrais minéral en ajustant mieux l'objectif de rendement	2,60
	B. Substituer l'azote minéral de synthèse par l'azote des produits organiques	1,88
	C1. Retarder la date du premier apport d'engrais au printemps	0,42
	C2. Utiliser des inhibiteurs de la nitrification	0,61
	C3. Enfourer dans le sol et localiser les engrais	0,58
②	A. Accroître la surface en légumineuses à graines en grande culture	0,91
	B. Augmenter et maintenir des légumineuses dans les prairies temporaires	0,48
Stocker du carbone dans le sol et la biomasse		
③	Passer à un labour occasionnel 1 an sur 5	3,77
④	A. Développer les cultures intermédiaires semées entre deux cultures de vente dans les systèmes de grande culture	1,08
	B. Introduire des cultures intercalaires en vignes et en vergers	0,14
	C. Introduire des bandes enherbées en bordure de cours d'eau ou en périphérie de parcelles	0,30
⑤	A. Développer l'agroforesterie à faible densité d'arbres	1,53
	B. Développer les haies en périphérie des parcelles agricoles	1,25
⑥	A. Allonger la période de pâturage	0,20
	B. Accroître la durée de vie des prairies temporaires	1,44
	C. Réduire la fertilisation azotée des prairies permanentes et temporaires les plus intensives	0,46
	D. Intensifier modérément les prairies permanentes peu productives par augmentation du chargement animal	0,45
Modifier la ration des animaux		
⑦	A. Substituer des glucides par des lipides insaturés dans les rations	1,89
	B. Ajouter un additif (nitrate) dans les rations	0,48
⑧	A. Réduire la teneur en protéines des rations des vaches laitières	0,23
	B. Réduire la teneur en protéines des rations des porcs et des truies	0,48
Valoriser les effluents pour produire de l'énergie, réduire la consommation d'énergie fossile		
⑨	A. Développer la méthanisation	5,78
	B. Couvrir les fosses de stockage et installer des torchères	3,40
⑩	A. Réduire la consommation d'énergie fossile pour le chauffage des bâtiments d'élevage	0,20
	B. Réduire la consommation d'énergie fossile pour le chauffage des serres	0,08
	C. Réduire la consommation d'énergie fossile des engins agricoles	1,61
Total	(sous hypothèse d'additivité)	32,3

Tableau 1. Potentiel d'atténuation annuel (en Mt CO_{2e} par an) des sous-actions instruites, pour l'année 2030, hors émissions induites (calcul selon la méthode proposée par les experts)

5.2. Prise en compte des atténuations induites à l'amont et à l'aval

L'objectif principal de l'étude était d'évaluer l'atténuation résultant de la mise en œuvre des actions et sous-actions proposées pour les postes d'émissions intervenant sur le périmètre de l'exploitation agricole et sur les espaces physiquement liés (émissions de N₂O liées à la dénitrification dans les zones humides après transfert du nitrate depuis les parcelles agricoles, par ex.). Les modifications d'émissions induites à l'amont ou à l'aval, liées à des achats ou à la vente de biens modifiés par l'action (émissions de CO₂ liées à la fabrication des engrais minéraux de synthèse, émissions de CO₂ évitées grâce à la production d'énergie sur l'exploitation, par ex.), ont toutefois été également quantifiées pour les postes d'émission majeurs.

La Figure 1 représente, pour l'ensemble des actions, l'atténuation calculée pour l'année 2030 avec ou sans les émissions induites. Les écarts relatifs à la bissectrice les plus importants sont observés pour les actions Fertilisation, Agroforesterie et haies, et Légumineuses (au-dessus de la bissectrice) et Lipides/additifs (au-dessous de la bissectrice). Le détail par sous-action (non représenté sur la figure) montre que dans trois cas seulement (Lipides en alimentation des bovins, Intensification des prairies peu productives et Cultures intercalaires), l'atténuation calculée est réduite lorsque les émissions induites sont incluses. La mise en œuvre de ces 3 sous-actions accroît en effet les émissions induites, en amont de l'exploitation. Dans de très nombreux cas, l'atténuation calculée n'est pas modifiée car la sous-action n'a pas ou très peu d'effet sur les émissions induites (Agroforesterie, Torchères...). La prise en compte des émissions induites accroît en revanche fortement l'atténuation calculée pour les sous-actions relatives à la fertilisation azotée, aux légumineuses, et à l'alimentation azotée des animaux. Cela s'explique du fait des émissions de GES liées, d'une part, à la fabrication des engrais minéraux azotés et, d'autre part, à la production de soja utilisé en alimentation animale. Pour les actions Fertilisation, Légumineuses et Alimentation azotée des animaux, l'atténuation liée aux émissions induites représente respectivement 45%, 91% et 85% de l'atténuation des émissions directes et indirectes. La prise en considération des émissions induites renforce dans ces trois cas

l'intérêt de l'action. A l'inverse pour la sous-action lipides, la prise en compte des émissions induites diminue l'intérêt de l'action puisque la substitution de glucides de la ration (issus de céréales) par des matières premières riches en lipides se traduit par une augmentation des émissions en amont. Pour les autres sous-actions, les effets sur les émissions induites en amont ou en aval sont faibles et leur non-prise en compte modifie peu l'atténuation calculée.

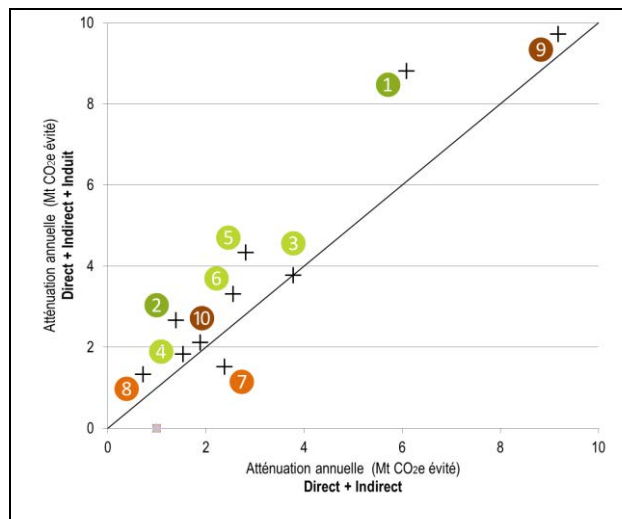


Figure 1. Atténuation annuelle totale par action incluant les émissions induites en fonction de l'atténuation hors émissions induites (en Mt CO₂e par an, calcul pour l'année 2030, mode de calcul proposé par les experts)

- 1 Fertilisation
- 2 Légumineuses
- 3 Labour 1 an sur 5
- 4 Implantation de couverts
- 5 Agroforesterie et haies
- 6 Gestion des prairies
- 7 Lipides et additifs
- 8 Alimentation protéique
- 9 Méthanisation et torchères
- 10 Economies d'énergie

5.3. Calculs des coûts des actions et sous-actions avec ou sans les subventions publiques

Les coûts des actions et sous-actions ont été calculés selon deux modalités, en incluant ou non les subventions publiques. Les subventions considérées ici sont uniquement celles qui sont indissociables des prix pratiqués (subvention au rachat de l'électricité produite par méthanisation et défiscalisation des carburants agricoles). Les subventions "facultatives", telles que les DPU, les aides couplées et les subventions régionales, sont totalement exclues des calculs de coût. Un coût positif représente un manque à gagner pour l'agriculteur. A l'inverse, un coût négatif représente un gain, généralement lié à une économie d'intrants. Pour la plupart des sous-actions, la prise en compte ou non des subventions ne modifie pas ou peu le calcul du coût par tonne de CO₂e évité. L'écart est cependant important pour la

sous-action Méthanisation, du fait du subventionnement du rachat de l'électricité produite. Il est également important pour les actions ou sous-actions impliquant une consommation directe importante d'énergie du fait de la subvention implicite que représente la défiscalisation du carburant agricole. Pour la sous-action Méthanisation, le coût pour l'agriculteur de la tonne de CO₂e évité passe de 17,3 € avec subvention à 54,9 € hors subvention. A l'inverse, pour le labour occasionnel, le prix par tonne de CO₂e évité passe de 7,9 € avec défiscalisation du carburant à -12,9 € sans prise en compte de cette défiscalisation. De même, pour la réduction de la consommation d'énergie des engins agricoles, le coût par tonne de CO₂e évité passe de -164 € avec défiscalisation à -317 € sans défiscalisation.

5.4. Prise en compte des coûts de transaction privés

Les coûts de transaction privés (CTP) correspondent au temps passé par l'agriculteur pour rechercher des informations, se

former, remplir des documents administratifs relatifs à une action. Le Tableau 2 donne les CTP calculés par hectare pour les sous-

actions adossées à des mesures agro-environnementales existantes, pour lesquelles le modèle de calcul utilisé a été validé. Ces valeurs sont données à titre indicatif. En particulier, il n'a pas été tenu compte du fait que les CTP diminuent au cours du temps par effet d'apprentissage.

Les CTP calculés varient de 9 € à 72 € par hectare pour les 12 sous-actions pour lesquelles la formule de calcul a été validée ; ils sont négligeables pour les bandes enherbées. Ils sont également négligeables pour les cultures intermédiaires en zone vulnérable (non indiqué dans le tableau), car ces mesures font partie des "Bonnes conditions agricoles et environnementales" (BCAE) et sont donc déjà obligatoires.

Globalement, il apparaît que les CTP sont du même ordre de grandeur que les coûts calculés hors CTP. Certaines sous-actions à coût hors CTP négatif ont un coût qui devient positif dès lors que les CTP sont pris en compte (la réduction de la dose d'engrais N par ajustement de l'objectif de rendement, par ex.). Cela peut expliquer que certaines actions et sous-actions ne soient pas mises en œuvre spontanément en dépit d'un coût négatif hors CTP. Ce point sera repris plus loin. Dans la suite, compte tenu de l'impossibilité de calculer les CTP de façon homogène et avec la même précision pour l'ensemble des sous-actions, l'analyse sera faite sur la base des coûts hors CTP.

	Coûts (€/ha/an)	Coût de la sous-action hors CTP	CTP	Coût de la sous-action avec CTP
Fertilisation	Réduction de la dose par ajustement de l'objectif de rendement	-9	18	9
	Fertilisation organique	-12	18	6
	Date d'apport de l'azote	-23	19	-4
	Localisation des apports d'engrais	-9	19	10
Légumineuses	Légumineuses en grandes cultures	19	25	44
	Légumineuses en prairies	-31	39	8
Non-labour		3	17.3	20.3
Implantation de couverts	Cultures intermédiaires (en zone non vulnérable)	41	16	57
	Cultures intercalaires	10	72	82
	Bandes enherbées	633	négligeable	633
Gestion des prairies	Durée de pâturage	-26	9	-17
	Intensification	-4	19	15

Tableau 2. Coûts (en €/ha/an), avec ou sans prise en compte des coûts de transaction privés CTP, des douze sous-actions pour lesquelles il a été possible de les calculer (un coût positif représente un coût pour l'agriculteur, un coût négatif un gain)

5.5. Coût et atténuation comparés des actions et sous-actions

La Figure 2 présente le coût hors CTP de chaque sous-action exprimé en euros par tonne de CO₂e évité (axe des ordonnées) en fonction de l'atténuation cumulée exprimée en Mt de CO₂e évité (axe des abscisses) ; les sous-actions sont classées par

ordre de coût croissant. Pour chaque sous-action, la hauteur du rectangle indique le coût par tonne de CO₂e évité et la largeur du rectangle l'atténuation des émissions (en Mt de CO₂e évité par an) calculée sur l'assiette atteinte en 2030.

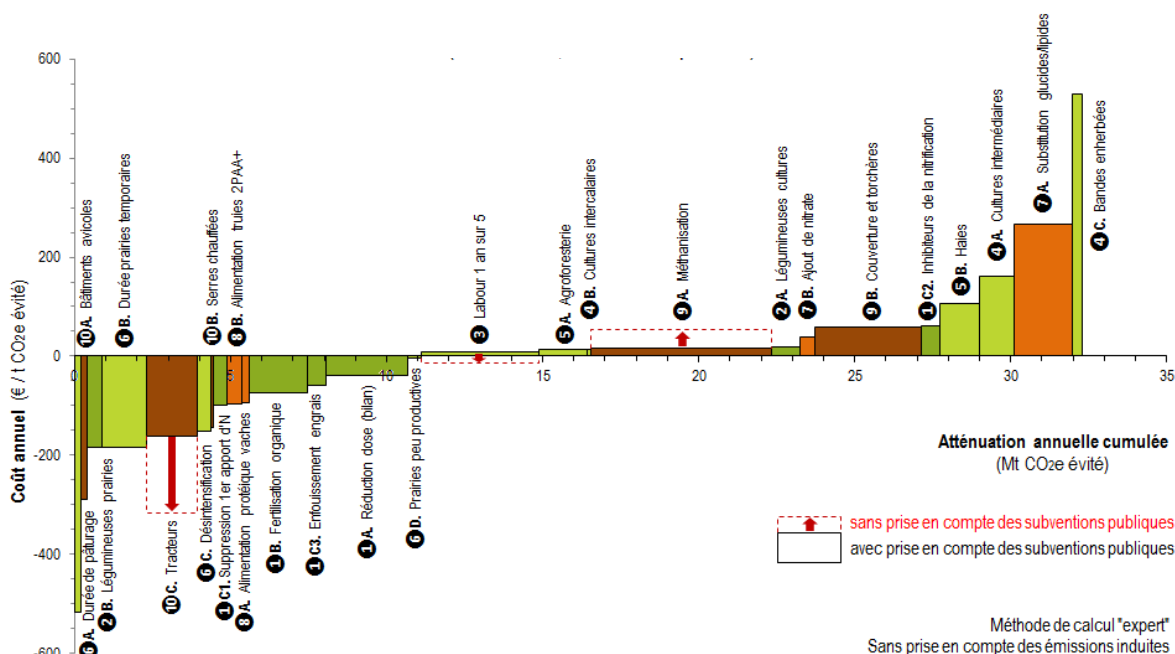


Figure 2. Coût (en euros par tonne de CO₂e évité) et potentiel d'atténuation annuel en 2030 à l'échelle du territoire métropolitain (en Mt de CO₂e évité par an) des sous-actions instruites

Coût calculé en incluant, ou non, les subventions indissociables du prix payé ou reçu par l'agriculteur, mais hors coûts de transaction privés. Atténuation calculée hors émissions induites, avec le mode de calcul proposé par les experts, sans prise en compte des interactions entre actions

Le coût représenté est le gain (coût négatif) ou le manque à gagner (coût positif) pour les agriculteurs (non compris les coûts de transaction privés), calculé en incluant les subventions publiques indissociables des prix. Dans le cas des sous-actions pour lesquelles le calcul avec versus sans subvention donnait un résultat sensiblement différent, le coût calculé hors subvention est représenté en pointillé. L'atténuation est calculée hors émissions induites, avec les équations de calcul proposées par les experts, sous hypothèse d'additivité et sans prise en compte des interactions entre actions et sous-actions.

Le cumul sur l'axe des abscisses, qui correspond à la mise en œuvre de l'ensemble des sous-actions, est de 32,3 Mt CO_{2e} par an, comme indiqué précédemment. La gamme des coûts par sous-action varie de -500 à + 500 € par tonne de CO_{2e} évité.

Cette représentation graphique permet de décomposer le potentiel d'atténuation global escompté en trois tiers :

● **Un premier tiers de l'atténuation globale escomptée correspond à des sous-actions à coût négatif**, c'est-à-dire donnant lieu à un gain financier pour l'agriculteur (sous les hypothèses adoptées ici). Il s'agit principalement de sous-actions relevant d'ajustements techniques avec économies d'intrants sans pertes de production. On trouve dans cette catégorie des sous-actions relatives à la conduite des prairies (allongement de la durée de pâturage, accroissement de la part des légumineuses en prairie, allongement de la durée des prairies temporaires, désintensification des prairies les plus intensives), des sous-actions visant des économies d'énergie fossile (réglage des tracteurs et éco-conduite, isolation et amélioration des systèmes de chauffage des serres et des bâtiments d'élevage), l'ajustement de la fertilisation azotée par application de la méthode du bilan, la modulation des dates et la localisation des apports, une meilleure prise en compte des apports d'azote par les produits organiques, l'ajustement de l'alimentation protéique des animaux (ruminants et monogastriques). La gestion de l'azote, en production végétale (via la fertilisation des cultures et des prairies, le développement des légumineuses en prairie) et en production animale (via l'alimentation) représente la plus grande part du potentiel d'atténuation associé à ce premier tiers. Viennent ensuite la gestion des prairies et les économies d'énergie fossile.

● **Un deuxième tiers de l'atténuation globale escomptée correspond à des sous-actions à coût modéré (inférieur à 25 euros par tonne de CO_{2e} évité)**. Il s'agit de sous-actions nécessitant des investissements spécifiques (méthanisation, par ex.) et/ou modifiant un peu plus fortement le système de culture (réduction du labour, agroforesterie, légumineuses) pouvant occasionner des baisses modérées du niveau de production (-2,1% en labour occasionnel, par ex.), partiellement compensées par des baisses de charges (carburants) ou la valorisation de produits complémentaires (électricité, bois). Le potentiel d'atténuation de ces sous-actions est important, mais son estimation est très sensible aux hypothèses relatives aux assiettes (Agroforesterie, Méthanisation, par ex.) et/ou aux options techniques retenues. Ainsi, l'atténuation calculée pour le non-labour varie entre 0,9 Mt CO_{2e} par an pour l'option travail superficiel et 5,8 Mt CO_{2e} par an pour l'option semis direct continu (données non représentées). Le coût relativement modeste de la sous-action Méthanisation est lié à la prise en compte de la subvention publique dans le tarif de rachat de l'électricité produite ; hors subvention, ce coût passe de 17,3 à 54,9 € par tonne de CO_{2e} évité. Inversement, un calcul sans la subvention que constitue la défiscalisation des carburants agricoles accroît l'intérêt du labour occasionnel ; le coût de cette sous-action devient même négatif, passant de +7,9 à -12,9 € par tonne de CO_{2e} évité.

● **Un troisième tiers de l'atténuation globale escomptée correspond à des sous-actions à coût plus élevé (supérieur à 25 euros par tonne de CO_{2e} évité)**. Il s'agit de sous-actions nécessitant un investissement sans retour financier direct (Torchères, par ex.), des achats d'intrants spécifiques (Inhibiteur de nitrification, Lipides insaturés ou additifs incorporés dans les rations des ruminants, par ex.), du temps de travail dédié (Cultures intermédiaires, Haies...) et/ou impliquant des pertes de production plus importantes (ex. bandes enherbées réduisant la surface cultivée), avec peu ou pas de baisses de charges et/ou de valorisation de produits supplémentaires. Le calcul a été réalisé en supposant que la production des cultures intermédiaires ou des bandes enherbées n'est pas valorisée, ce qui conduit à surestimer le coût des deux sous-actions.

La Figure 3, qui est une simplification de la figure précédente, présente le coût par tonne de CO_{2e} évité en fonction du potentiel d'atténuation de chacune des actions, chaque action regroupant les sous-actions se rapportant à un même levier technique sous hypothèse d'additivité. Cette représentation met en évidence les éléments suivants :

● Les leviers d'action portant sur les économies d'énergie fossile, la gestion des prairies, l'alimentation azotée des animaux, le développement des légumineuses et la gestion de la fertilisation azotée représentent globalement un potentiel d'atténuation de l'ordre de 12,6 Mt CO_{2e} par an à coût négatif (de -175 € par tonne de CO_{2e} évité pour l'action Prairie à -59 € par tonne de CO_{2e} évité pour l'action Fertilisation). Au sein de cet ensemble, le levier "fertilisation azotée" représente près de la moitié du potentiel d'atténuation (6,1 Mt CO_{2e}). On peut y ajouter l'action Légumineuses, et une partie de l'action Prairie (sous-action Désintensification des prairies les plus intensives), dont l'atténuation escomptée provient également d'une réduction de l'usage des engrais azotés. La maîtrise de l'alimentation azotée des animaux d'élevage représente le plus faible potentiel d'atténuation (0,7 Mt CO_{2e}), ce que l'on peut expliquer par le fait que des progrès importants ont déjà été réalisés dans ce domaine (alimentation biphase en élevage porcin), et qu'une réduction des teneurs en azote des effluents n'a qu'un effet indirect sur les émissions de GES, après transformation de l'azote ammoniacal en N₂O. La limitation des émissions de NH₃ par volatilisation contribue cependant à réduire globalement les pertes d'azote, et est d'importance majeure en termes de qualité de l'air. L'action Légumineuses représente un potentiel d'atténuation de 1,4 Mt CO_{2e}, ce qui est plus faible que certains chiffres parfois avancés, mais qui s'explique par le fait que l'étude n'a pas envisagé toutes les possibilités de choix d'espèces. Elle n'a pas non plus envisagé un accroissement des surfaces en légumineuses fourragères (trèfle, luzerne...) qui nécessite une modification conjointe importante des systèmes d'élevage, hypothèse hors du cadre de l'étude. Dans un cadre envisageant des modifications plus importantes des systèmes de production et des modes d'alimentation des animaux, le levier des légumineuses pourrait être significativement plus important. Au total, la gestion de l'azote en grande culture, en prairie et en alimentation animale contribue à près de 70% du potentiel d'atténuation à coût négatif. Ce pourcentage élevé s'explique par l'importance des assiettes concernées par plusieurs de ces sous-actions et par le poids du N₂O dans les émissions agricoles, lié à son PRG. En outre, la prise en compte des émissions induites en amont de l'exploitation (liées à l'énergie nécessaire à la fabrication et au transport des engrais azotés de synthèse) renforce encore l'intérêt des actions ou sous-actions portant sur la gestion de l'azote (cf. section 5.2). En plus de la maîtrise de l'azote, l'autre levier de réduction des émissions de GES à coût

négalif est la maîtrise de la consommation d'énergie fossile sur l'exploitation.

- Les actions Labour occasionnel, Méthanisation et torchères, Agroforesterie et haies représentent un potentiel d'atténuation de 15,8 Mt CO₂e par an pour un coût variant entre 8 et 56 € par tonne de CO₂e évité. Comme cela a déjà été signalé, le potentiel d'atténuation calculé est très contingent des hypothèses faites sur l'atténuation unitaire (Labour occasionnel, Agroforesterie et haies) et sur l'assiette atteinte en 2030 (Méthanisation et torchères, Agroforesterie et haies). De plus, le coût dépend fortement de la prise en compte ou non des subventions publiques pour les actions Méthanisation et Labour occasionnel (voir Section 5.3).

- Les actions Cultures intermédiaires, cultures intercalaires et bandes enherbées et Lipides et additifs en alimentation des

ruminants représentent un potentiel d'atténuation de 3,9 Mt CO₂e par an en 2030, avec un coût de 220 € par tonne de CO₂e évité. Pour l'action Cultures intermédiaires, intercalaires et bandes enherbées, le coût est lié aux opérations culturales dédiées et/ou aux pertes de production ; dans le cadre de cette étude, la totalité du coût a été rapportée à l'atténuation des émissions de GES alors que les objectifs associés à ces pratiques sont plus larges que la seule réduction des émissions de GES : réduction des concentrations en nitrate dans les eaux, protection contre l'érosion, maintien de la biodiversité. Pour l'action Lipides/additif en alimentation des bovins, le coût est lié aux matières premières ajoutées à la ration, en particulier pour la sous-action Lipides. Dans ce deuxième cas, l'action ne présente pas d'autres intérêts que la réduction des émissions de méthane entérique, hormis une amélioration de la qualité nutritionnelle des produits (enrichissement en oméga 3).

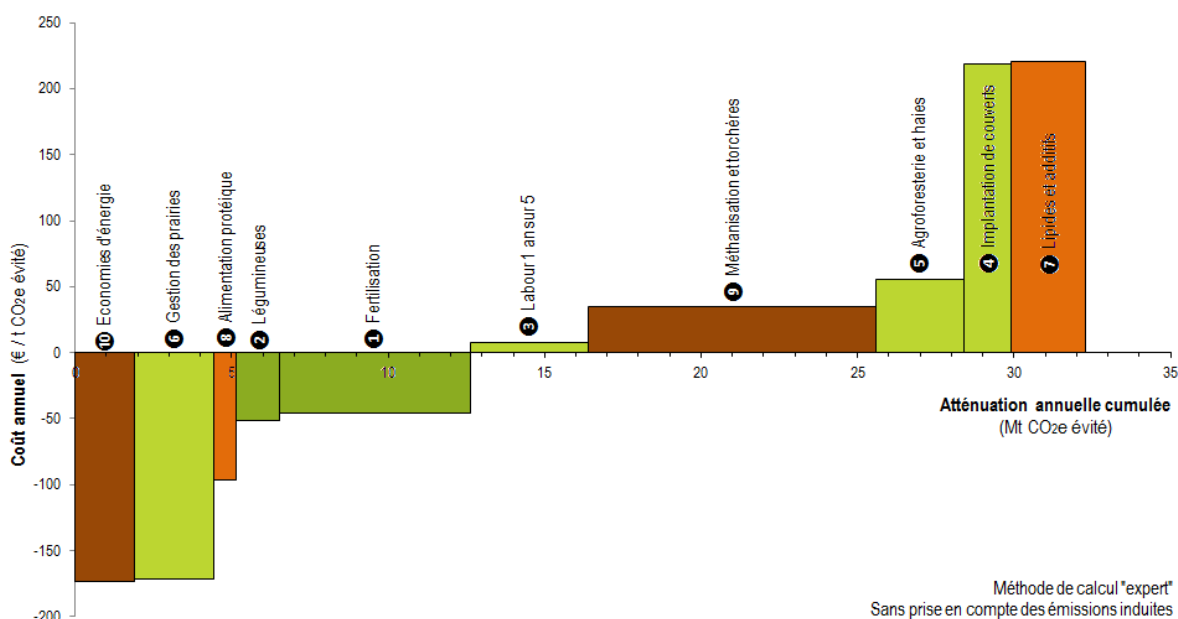


Figure 3 : Coût (en euros par tonne de CO₂e évité) et potentiel d'atténuation annuel en 2030 à l'échelle du territoire métropolitain (en Mt de CO₂e évité) des actions instruites.

Coût calculé en incluant les subventions indissociables du prix payé ou reçu par l'agriculteur, mais hors coûts de transaction privés. Atténuation calculée hors émissions induites, avec le mode de calcul proposé par les experts, sans prise en compte des interactions entre actions.

5.6. Comparaison avec d'autres études conduites à l'international

La confrontation des résultats de cette étude avec ceux d'études similaires conduites dans d'autres pays (voir bibliographie de la Section 1) est délicate car les critères utilisés pour sélectionner les actions, les périmètres de calcul de l'atténuation et du coût et enfin le contexte agricole différent (Eagle et al., 2012 pour les USA ; Moran et al., 2008, 2011 pour le Royaume Uni ; Schulte & Donnellan, 2012 pour l'Irlande ; Bellarby et al., 2012 pour l'Europe ; McKinsey & Company, 2009 pour le monde). Des convergences apparaissent cependant.

L'évaluation du potentiel total d'atténuation relativement aux émissions de référence est comparable à celles obtenues dans d'autres pays à partir d'une approche similaire. Les potentiels d'atténuation représentent ainsi de 2 à 11% des émissions de référence dans l'étude canadienne, de 13 à 17% dans l'étude

irlandaise, de 25% à 54% dans l'étude anglaise, de 58% dans l'étude à l'échelle mondiale de McKinsey & Company. Ce type de comparaison appelle néanmoins des précautions compte tenu des différences de périmètre, de contexte, de scénarios de référence, de modes de calcul des émissions, et de la sensibilité de ces résultats au nombre et à la nature des actions examinées.

Un point commun aux études ayant évalué les coûts unitaires d'atténuation (McKinsey & Company, 2009 ; Moran et al., 2011 ; Schulte et al., 2012) est de faire apparaître une série d'actions à coûts négatifs ou modérés. Les résultats de la présente étude confirment ainsi qu'une part importante du potentiel d'atténuation en agriculture peut être obtenue sans remettre en cause la rentabilité des activités agricoles, voire en la renforçant, la réduction des émissions de GES et les économies réalisées étant

dans ce cas liées à des économies d'intrants permises par des ajustements techniques (fertilisation, par ex.). Plusieurs actions ou sous-actions entrant dans cette catégorie apparaissent dans la totalité des études. C'est le cas de la fertilisation azotée, du travail du sol simplifié, de la gestion des prairies. Les chiffres réalisés corroborent les conclusions de la présente étude quant à l'intérêt de ces leviers. La part du potentiel obtenu à coût négatif (37% dans cette étude) varie de 20 à 74% dans les études similaires. La gamme de coûts unitaires obtenue dans l'étude française (de -515 à 529 € par tCO₂e) est comparable à celle obtenue dans les études irlandaise et canadienne. Elle est beaucoup moins large que celle obtenue dans l'étude anglaise qui a considéré des actions de nature plus "prospective" (utilisation d'ionophores, par ex.).

Le classement des actions instruites dans l'étude de MacKinsey & Company est cohérent avec celui obtenu dans la présente étude sur plusieurs aspects (positionnement relatif des actions concernant la fertilisation et les additifs alimentaires, par ex.), même si les valeurs absolues ne sont pas comparables du fait des différences de périmètre de calcul. Certaines des actions instruites apparaissent dans d'autres études mais pas dans toutes. C'est le cas des actions Légumineuses (Irlande, UK, Europe), Cultures intermédiaires (USA, Europe), Agroforesterie (Europe), Alimentation azotée des animaux et Lipides/additifs (UK), Méthanisation (Irlande, Europe). Seule l'action portant sur les économies d'énergie fossile sur l'exploitation n'a été abordée que dans l'étude française.

A l'inverse, certaines actions instruites dans d'autres études ne l'ont pas été dans le cadre de l'étude française. C'est la conséquence soit d'un contexte agricole différent (riziculture, par ex.), soit d'une méthode de sélection des actions ayant privilégié

d'autres critères. Les actions faisant appel à des technologies interdites ou difficilement acceptables socialement ont été exclues de l'étude française, alors qu'elles ont été renseignées dans d'autres travaux (utilisation d'ionophores ou de vaccins antiméthanogènes, par ex.). De même, des leviers prometteurs à long terme mais encore à l'état de recherche n'ont pas été instruits (par ex. sélection animale visant à réduire les émissions de méthane, par ex.).

Au total, au regard d'autres travaux du même type conduits à l'international, la présente étude apparaît plus "prudente" que d'autres, en ce sens que seuls des leviers techniques "classiques", disponibles et faciles à mettre en œuvre ont été explorés (par ex. fertilisation, travail du sol, légumineuses...). L'intérêt du choix qui a été fait est que les calculs d'atténuation et de coût réalisés sont probablement plus robustes que dans d'autres études car portant sur des pratiques bien renseignées. Cependant, cette spécificité milite en faveur d'une actualisation de l'étude, lorsque des connaissances complémentaires auront été acquises sur certains leviers non instruits (Encadré 1).

Enfin, un apport important de l'étude française réside dans la mise en perspective de la sensibilité des résultats au mode de comptabilisation des émissions et des coûts (calcul "CITEPA" ou "expert", prise en compte ou non des émissions induites, prise en compte ou non des subventions publiques...) sur l'évaluation des potentiels et des coûts d'atténuation. Cet aspect, largement absent des études existantes, permet d'ouvrir des pistes d'amélioration des inventaires d'émissions et met en exergue l'importance de disposer d'un dispositif statistique permettant de rendre compte des effets environnementaux des pratiques agricoles.

5.7. Incertitudes, sensibilité et robustesse des résultats de l'étude

Toutes les données scientifiques et techniques utilisables ont été mobilisées pour réaliser le plus justement possible les chiffres d'atténuation et de coût demandés pour cette étude. Ceux-ci sont cependant souvent assortis d'une incertitude forte.

- D'abord, les valeurs d'atténuation et de coût unitaires utilisées (par hectare, par animal, par unité d'azote épanchée...). Pour l'atténuation calculée avec le mode de calcul proposé par les experts, les équations et valeurs utilisées s'appuient sur les recommandations les plus récentes du GIEC ou sont issues de la littérature scientifique internationale, en privilégiant, lorsqu'elles existaient, des méta-analyses proposant des valeurs robustes basées sur de nombreux essais (Non-labour, par ex.), en veillant à retenir les valeurs adaptées aux conditions françaises. Les processus en jeu (émissions de N₂O par les sols, stockage/déstockage de carbone dans les sols et la biomasse, émissions de CH₄ par les animaux) sont cependant caractérisés par une forte dépendance aux conditions locales (types de sol, climat, systèmes d'élevage...) et par une variabilité spatiale et temporelle importante entachant les valeurs retenues d'une forte incertitude. Pour les coûts unitaires, les données économiques utilisées sont celles de l'année 2010, faute de disposer de scénarios suffisamment détaillés d'évolution du contexte socio-économique renseignant l'ensemble des variables nécessaires aux calculs sur la période 2010-2030. Là aussi, certains prix utilisés (prix de l'énergie, des engrais, des matières premières pour l'alimentation animale, des produits agricoles) sont susceptibles de varier considérablement dans le temps et dans l'espace. Pour certaines actions (Fertilisation, Non-labour,

Agroforesterie, Gestion des prairies, Alimentation protéique des animaux), des hypothèses chiffrées ont été faites relativement à l'effet (ou à l'absence d'effet) sur les rendements, auxquelles les calculs de coût sont très sensibles.

- La détermination de l'assiette maximale technique (AMT). Des critères principalement techniques (espèces cultivées, profondeur de sol, niveau de réserve utile, charge en cailloux, degré d'hydromorphie, taille des parcelles, catégories d'animaux, volumes d'effluents...) ont été mobilisés pour estimer l'assiette sur laquelle l'action ou la sous-action pouvait être mise en œuvre sans obstacle technique majeur. Cette estimation est entachée d'incertitude car les obstacles techniques identifiés et leurs poids relatifs ne sont pas indépendants du contexte économique et des choix technologiques et organisationnels privilégiés (méthanisation individuelle ou collective, par ex.).

- La détermination d'une cinétique d'adoption sur la période 2010-2030, et d'un pourcentage de l'AMT atteint en 2030. Pour des actions ou sous-actions relevant d'ajustements techniques, la cinétique de diffusion peut être relativement rapide et on a considéré que 100% de l'AMT pouvaient être atteints en 2030. A l'inverse, pour des actions supposant une évolution plus importante des modes de production et des conditions de travail (Agroforesterie, Méthanisation, par ex.), on a considéré une cinétique d'adoption plus lente. Pour l'agroforesterie, on a ainsi considéré qu'entre 4 et 10% de l'AMT pouvaient être atteints en 2030. Pour la méthanisation, on a retenu 33% de l'AMT en 2030. Le potentiel d'atténuation calculé en 2030 de ces actions est très sensible à ces hypothèses.

Encadré 1. Retour sur les actions non instruites

Plusieurs actions permettant de réduire les émissions de GES du secteur agricole français n'ont pas été instruites dans le cadre de cette étude. Les actions non instruites, et les raisons ayant conduit à ne pas les instruire, sont indiquées dans le rapport complet. Celles-ci ont été réparties en quatre catégories.

- Actions présentant des risques, dont l'acceptabilité sociale est jugée faible, voire non autorisées dans l'Union européenne

Le potentiel d'atténuation associé à ces actions (utilisation d'antibiotiques pour réguler les populations méthanogènes du rumen, par ex.) a été évalué dans le cadre d'études conduites dans d'autres pays. Le choix fait dans le cadre de la présente étude a été d'écarter d'emblée ce type de solution. La question s'est posée pour la sous-action visant à réduire la production de méthane par ajout de nitrate dans les rations, dont l'acceptabilité sociale pourrait être faible du fait de la connotation négative du mot nitrate, et qui pourrait induire un risque pour l'animal si elle était mal encadrée. L'instruction de cette sous-action a néanmoins été réalisée.

- Actions présentant un potentiel d'atténuation limité du fait de la faible importance de la filière dans l'agriculture française

Plusieurs actions, souvent citées dans des études similaires menées dans d'autres pays, n'ont pas été instruites dans le cadre de cette étude car les surfaces ou effectifs animaux concernés sont faibles dans le contexte agricole français en comparaison d'autres filières. C'est le cas, par exemple, d'actions visant à réduire les émissions de CH₄ en riziculture, à protéger les sols organiques ou à restaurer la production de biomasse sur des sols dégradés pour favoriser le stockage de C. De même, à l'intérieur de certaines actions, afin de concentrer l'effort de quantification sur les filières majoritaires, le chiffrage de l'atténuation et du coût n'a pas été effectué pour certaines filières minoritaires (les bovins viande et les volailles pour l'action portant sur l'alimentation azotée des animaux, les ovins et les caprins pour l'action Lipides/additifs, les consommations d'énergie fossile dans les bâtiments porcins et bovins pour l'action "Economie d'énergie..."). Le choix de cibler l'effort de chiffrage sur des actions présentant un potentiel d'atténuation a priori élevé dans le contexte agricole français et, à l'intérieur des actions instruites, de concentrer cet effort sur les filières majoritaires, ne doit en aucun cas disqualifier les efforts déjà faits ou à venir pour réduire les émissions de GES dans les autres filières. La lisibilité par la société des actions mises en œuvre pour réduire les émissions de GES du secteur agricole suppose un effort coordonné de l'ensemble des filières.

- Actions nécessitant des compléments de connaissances et/ou de références techniques pour en évaluer la faisabilité et l'intérêt

Plusieurs actions n'ont pas été instruites, bien que certaines soient présentées comme prometteuses dans la littérature, parce qu'elles nécessitent encore des compléments de connaissances pour pouvoir évaluer leur intérêt et chiffrer leur potentiel d'atténuation. Il s'agit en général d'actions faisant l'objet d'un

effort de recherche actif. On peut citer l'incorporation de carbone stable dans les sols (biochars) dont l'intérêt environnemental global doit être évalué, la modification des conditions physico-chimiques et/ou des communautés microbiennes des sols pour réduire les émissions de N₂O, l'utilisation de souches microbiennes associées aux légumineuses possédant la capacité de réduire le N₂O en N₂, l'amélioration génétique des plantes ciblée sur leur capacité à prélever l'azote du sol ou l'amélioration génétique des animaux d'élevage pour réduire les émissions de méthane par animal et/ou unité de produit, la production de biohydrogène par voie fermentaire à partir des effluents d'élevage.

Dans le domaine de l'élevage, des programmes de recherche très actifs portent sur la possibilité de sélectionner, directement ou indirectement, les bovins sur les émissions de CH₄ entérique. De nombreuses équipes, en Europe et en Océanie, explorent actuellement la variabilité génétique des émissions de CH₄ et les premiers résultats sont prometteurs. Les premières estimations d'héritabilité donnent des valeurs moyennes ($h^2 = 0,20$) et une bonne variabilité qui permettraient de sélectionner et d'espérer une baisse de -25% d'émission de CH₄ en 10 ans sur le troupeau bovin laitier. Les progrès scientifiques sont rapides et les méthodologies de mesure progressent : on peut actuellement avoir accès à des dispositifs de mesure directe du CH₄, encore expérimentaux, utilisables en salle de traite et/ou au pâturage, à des coûts acceptables. Mais il reste encore beaucoup de points à valider avant d'envisager d'intégrer ce caractère dans des schémas de sélection. L'intérêt de ces pistes est que l'assiette potentielle est importante. Néanmoins, les recherches en cours n'aboutiront à des résultats opérationnels qu'à échéance d'une ou de plusieurs décennies.

- Actions de nature plus structurelle, portant sur la nature et la localisation des systèmes de production agricole, l'organisation de la chaîne alimentaire et la consommation

Le cahier des charges de l'étude prévoyait que les actions proposées devaient porter sur les pratiques agricoles, sans remise en cause majeure des systèmes de production, de leur localisation et des niveaux de production. La limite entre ces deux types d'actions (actions portant sur les techniques d'une part, sur les systèmes de production d'autre part) est discutable car la plupart des actions techniques ont des conséquences sur l'organisation des exploitations. C'est particulièrement le cas pour des actions portant sur des choix d'assolements (Légumineuses, par ex.), la gestion des prairies ou l'agroforesterie, en limite du cahier des charges de l'étude. D'autres actions, basées sur des évolutions plus radicales des manières de produire (agriculture biologique, par ex.), de la localisation des productions (ré-association cultures-élevages), ou des modes d'approvisionnement et d'alimentation (circuits de proximité, réduction de la consommation de produits animaux) n'ont pas été instruites car hors du périmètre de cette étude. Ces pistes de nature plus structurelles restent à explorer.

Selon les actions ou sous-actions étudiées, les sources d'incertitude peuvent provenir surtout de l'une de ces origines ou de plusieurs d'entre elles (Tableau 3). Pour des actions ou sous-actions portant sur des ajustements techniques (dose et modalités d'apport de fertilisants, ajustement des rations alimentaires, consommation d'énergie fossile...), les atténuations unitaires sont généralement bien renseignées mais elles sont

extrêmement variables dans le temps et dans l'espace (émissions N₂O, par ex.). L'estimation des assiettes n'est pas trop imprécise puisqu'il s'agit de surfaces cultivées, d'effectifs animaux, de nombres d'engins agricoles..., pour lesquels on dispose de données statistiques. Il s'agit en général de sous-actions pour lesquelles on a considéré que 100% de l'AMT étaient atteints en 2030. Pour les actions supposant une

modification un peu plus forte de l'organisation de l'exploitation (Non-labour, Agroforesterie, Méthanisation), l'incertitude sur l'assiette et sur la cinétique d'adoption est plus forte. Le Tableau 3 récapitule de façon qualitative les niveaux d'incertitude sur le potentiel d'atténuation unitaire, le coût unitaire, l'assiette et la cinétique de diffusion. La Figure 4 montre le coût par tonne de

CO₂e évité en 2030 et le potentiel d'atténuation annuel pour l'ensemble des actions, celui-ci étant assorti d'une fourchette (valeurs basse, moyenne et haute). L'amplitude des fourchettes sur le potentiel d'atténuation est particulièrement élevée pour les actions Non-labour, Méthanisation et torchère, Fertilisation et Agroforesterie et haies.

	Incertitude sur l'atténuation unitaire (hors émissions induites)	Incertitude sur le coût unitaire	Incertitude sur l'AMT et l'adoption
① Fertilisation	***	**	**
② Légumineuses	***	**	**
③ Non-labour	****	**	**
④ Implantation de couverts	**	*	*
⑤ Agroforesterie et haies	****	**	****
⑥ Gestion des prairies	***	**	***
⑦ Lipides et additifs	*	**	*
⑧ Alimentation protéique	**	***	*
⑨ Méthanisation et torchères	*	**	****
⑩ Economies d'énergie	*	**	**

Tableau 3 : Evaluation de l'incertitude sur l'atténuation et le coût unitaire
 (****: incertitude très élevée, ***: incertitude élevée, **: incertitude moyenne, *: incertitude faible)

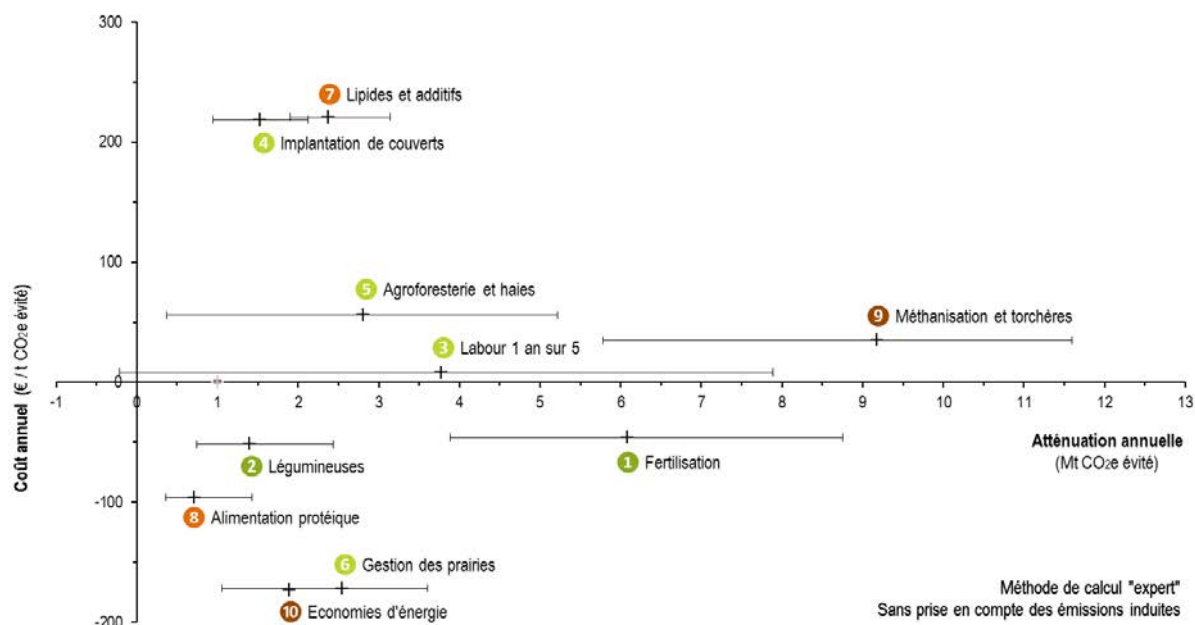


Figure 4. Marges d'incertitudes sur les potentiels d'atténuation annuels des actions (en 2030)
 (valeurs basses, moyennes, hautes)

6. Synthèse et conclusion

Sous hypothèse d'additivité, le potentiel global d'atténuation annuel des émissions de GES du secteur agricole lié à la mise en place de l'ensemble des actions proposées dans cette étude serait de 32,3 Mt CO₂e par an en 2030, hors émissions induites. Ce potentiel global d'atténuation est réduit de 8 à 18%, selon le mode de calcul, si l'on tient compte des interactions entre actions, et se situe alors entre 26,5 et 29,7 Mt CO₂e par an.

En cas de mise en œuvre de ces actions, une comptabilisation complète de l'atténuation par l'inventaire national supposerait une évolution importante des méthodes d'inventaire, en particulier pour rendre compte de l'effet d'actions permettant un stockage accru de carbone dans les sols et dans la biomasse (Non-labour, Prairies, Agroforesterie, Cultures intermédiaires...). Avec les méthodes de calcul actuelles, l'inventaire national ne rendrait compte que de 30% environ de l'atténuation globale estimée. Ce résultat milite pour un effort renforcé d'amélioration de l'inventaire français des émissions de GES, déjà appuyé par des projets en cours (projets Mondferent, NO GAS2¹⁵...).

Conformément au cahier des charges de l'étude, les actions et sous-actions proposées portent sur des pratiques agricoles relevant d'un choix de l'agriculteur, sans remise en cause majeure des systèmes et des niveaux de production. Pour quelques actions susceptibles d'entraîner des baisses de rendement modérées (Non-labour, par ex.), celles-ci ont été estimées et le coût correspondant a été chiffré. Les actions et sous-actions envisagées sont donc compatibles avec le maintien d'une agriculture performante sur le plan productif. Elles portent sur une diversité d'étapes et de filières de production agricole (fertilisation azotée, travail du sol, alimentation animale, gestion des effluents...). Les actions dont l'acceptabilité sociale risquait d'être faible ont été écartées (usage d'antibiotiques, par ex.). Parmi les actions et sous-actions proposées, seul l'usage de nitrate en alimentation animale pour réduire les émissions de CH₄ pourrait donner lieu à controverse de ce point de vue. De même, les actions nécessitant encore un effort de recherche ou d'acquisition de références, ou bien portant sur des filières dont l'assiette est limitée, n'ont pas été instruites. L'atténuation globale calculée peut donc être considérée comme une estimation prudente du potentiel d'atténuation du secteur agricole.

Un tiers du potentiel d'atténuation est à coût négatif. Ce résultat est cohérent avec celui d'études similaires conduites dans d'autres pays. Ce potentiel d'atténuation à double dividende, environnemental et économique, relève d'ajustements techniques permettant de réduire à la fois les émissions de GES et les coûts de production par une meilleure gestion des intrants (fertilisants azotés, énergie...). L'existence de ce potentiel d'atténuation à coût négatif interroge sur les freins à l'adoption (aversion au risque, barrière à l'adoption induisant des coûts non mesurables...). Le montant des coûts de transaction privés, calculés pour certaines actions et liés à la technicité et à la complexité de leur mise en œuvre, pourrait expliquer en partie leur non-adoption spontanée. La majeure partie de ce potentiel d'atténuation à coût négatif est lié à la gestion de l'azote (fertilisation azotée des cultures et des prairies, légumineuses, alimentation azotée des animaux). L'intérêt des actions portant sur la gestion de l'azote est encore renforcé si l'on considère les émissions induites, liées à la fabrication des engrais azotés de

synthèse notamment, et si l'on considère les autres enjeux environnementaux et de santé publique liés à la gestion de l'azote (nitrate, potabilité de l'eau et qualité des écosystèmes aquatiques, ammoniac et qualité de l'air). Une difficulté est qu'une partie importante de ce potentiel d'atténuation met en jeu des leviers techniques pour lesquels un système de suivi/vérification est difficile à mettre en œuvre (calcul du bilan azoté avec un objectif de rendement crédible, dates et modalités d'apport de l'engrais azoté, ajustement des rations azotées en alimentation animale...).

Un deuxième tiers de l'atténuation globale escomptée correspond à des sous-actions à coût modéré (inférieur à 25 € par tonne de CO₂e évité). Il s'agit de sous-actions nécessitant des investissements dédiés (Méthanisation, par ex.) et/ou modifiant un peu plus fortement le système de culture (réduction du labour, agroforesterie) pouvant occasionner des baisses modérées des niveaux de production, ce qui explique en partie le coût calculé positif, mais avec des économies d'intrants (carburant par ex.) ou une valorisation de produits supplémentaires (électricité, bois). L'estimation du potentiel d'atténuation est ici très sensible aux hypothèses relatives à l'assiette de ces actions (surface ou volume d'effluent concerné), et le coût dépend très fortement des prix utilisés dans les calculs. Une évaluation hors subventions publiques accroît l'intérêt du non-labour, et réduit l'intérêt de la méthanisation. Ces actions contribuent par ailleurs à d'autres objectifs agri-environnementaux: production d'énergie renouvelable (Méthanisation), réduction du risque érosif (Non-labour), qualité des paysages et biodiversité (Agroforesterie). La réduction du labour pourrait avoir pour effet d'augmenter l'usage des herbicides, mais l'option technique privilégiée (labour un an sur cinq) minimise ce risque. La mise en place d'un système de suivi/vérification de ces actions est possible.

Un troisième tiers de l'atténuation globale escomptée est à coût plus élevé (supérieur à 25 € par tonne de CO₂e évité). Ce coût est lié à des investissements spécifiques (torchères), à des achats d'intrants (inhibiteur de nitrification, lipides insaturés ou additifs incorporés dans les rations des ruminants) ou à du temps de travail (cultures intermédiaires, haies) dédiés, sans valorisation de produits supplémentaires, et/ou à des pertes de production plus importantes (bandes enherbées réduisant la surface cultivée, par ex.). On trouve dans ce groupe une action ayant déjà fait l'objet d'une labellisation de type "projet domestique" (sous-action Lipides). Certaines de ces actions ont cependant un effet positif sur d'autres objectifs agri-environnementaux (effets, par exemple, des cultures intermédiaires, des bandes enherbées et des haies sur la biodiversité, l'esthétique des paysages, la lutte contre l'érosion, la réduction des transferts de polluants vers les eaux). Ces actions contribuent à des objectifs multiples et l'évaluation de leur intérêt et de leur coût en regard de leurs seuls effets sur l'atténuation des émissions de GES est insuffisante. Pour certaines d'entre elles, le bilan économique pourrait être amélioré par une valorisation de produits non comptabilisés pour l'instant (production des bandes enherbées par ex.). La plupart de ces actions sont traçables et vérifiables.

L'estimation du potentiel d'atténuation et du coût des actions et sous-actions instruites est assortie d'incertitudes dont l'origine et l'ampleur varient selon les actions concernées. Les incertitudes portant sur le potentiel d'atténuation unitaire sont généralement élevées du fait de la forte variabilité des processus et des

¹⁵ Projet visant à mettre au point une méthode "tier 2" pour le calcul des émissions de N₂O par les sols agricoles

difficultés de mesure des émissions gazeuses. L'effort d'acquisition de références doit se concentrer sur les actions dont le potentiel d'atténuation est élevé mais assorti d'incertitudes fortes, en particulier sur le potentiel d'atténuation unitaire, comme le non-labour, les prairies, ou l'agroforesterie, peu renseignée en milieu tempéré. Cet effort doit en particulier permettre d'établir un bilan GES complet tenant compte de l'ensemble des gaz (simultanément du stockage de C et des émissions de N₂O pour le non-labour, par ex.).

La plupart des actions et sous-actions proposées sont simultanément compatibles avec la nécessaire adaptation de l'agriculture au changement climatique. Le développement des légumineuses, espèces assez sensibles au déficit hydrique et aux épisodes de température élevée pourrait cependant être freiné par le changement climatique. Une réduction de la pluviométrie pourrait aussi limiter l'assiette des actions pouvant provoquer une compétition pour l'eau au détriment de la culture principale, comme les cultures intermédiaires et intercalaires ou l'agroforesterie.

Plusieurs des leviers techniques majeurs d'atténuation des émissions du secteur agricole qui apparaissent à l'issue de cette étude ont été aussi mis en exergue par des études similaires dans d'autres pays (fertilisation azotée, non-labour, gestion des prairies, par ex.). L'approche de l'étude française a privilégié des leviers techniques bien renseignés, socialement acceptables et d'ores et déjà disponibles au détriment de leviers plus exploratoires. Cet aspect milite pour une actualisation de l'étude lorsque des compléments d'information auront été acquis sur ces leviers.

A court terme, les suites à donner à cette étude sont :

- (i) l'acquisition des nécessaires références complémentaires sur des leviers techniques à fort potentiel, mais assortis d'incertitudes fortes, comme l'agroforesterie en milieu tempéré ;
- (ii) l'accompagnement de l'évolution des méthodes d'inventaire, pour qu'elles puissent rendre compte de l'effet des actions proposées ;

- (iii) l'évaluation multicritère des actions contribuant à plusieurs objectifs agri-environnementaux (Bandes enherbées, Haies, Cultures intermédiaires et intercalaires, Non-labour...) pour lesquelles une évaluation au titre de la seule atténuation des émissions de GES est réductrice ; une consolidation des calculs sur les émissions induites pour envisager les conséquences des mesures sur le bilan carbone des produits agricoles par des méthodes d'ACV ;

- (iv) l'identification des incitations susceptibles de favoriser l'adoption des actions présentant les meilleures propriétés.

Ce travail a mis en évidence un potentiel d'atténuation important des émissions du secteur agricole à l'horizon 2030, lié uniquement à des leviers techniques, sans remise en cause des systèmes de production, de leur localisation et des niveaux de production, limité à 10 actions majeures et avec une approche prudente conduisant probablement à une sous-estimation du potentiel d'atténuation effectif. La mise en œuvre de ces actions devrait permettre d'abaisser les émissions du secteur agricole dans les années qui viennent. Au-delà de l'horizon temporel fixé pour cette étude (2030), certaines actions proposées présentent un potentiel d'atténuation reproductible d'année en année (Fertilisation, Méthanisation, Alimentation animale, par ex.), mais pour d'autres l'atténuation annuelle escomptée atteindra un plafond, en particulier pour les actions visant un stockage accru de carbone dans les sols et la biomasse (Non-labour, Cultures intermédiaires, Agroforesterie...). L'atteinte d'objectifs d'atténuation plus ambitieux nécessitera l'exploration de leviers additionnels mais complémentaires à plus long terme, de nature technique (amélioration de l'efficacité d'acquisition de l'azote en sélection végétale, réduction de la production de méthane entérique en sélection animale...) ou systémique (réassociation des productions végétales et animales, modification des régimes alimentaires...) et la construction de scénarios. Une identification et une évaluation de ces leviers d'une autre nature complèteraient utilement cette étude.

Les participants à l'étude

• Les experts scientifiques

Pilotage scientifique :

Laure Bamière	INRA-SAE2*	
Sylvain Pellerin	INRA-EA	
Denis Angers	AAC Canada	Sols et séquestration du carbone
Fabrice Béline**	IRSTEA	Gestion et traitement des effluents, méthanisation
Marc Benoît	INRA-SAE2	Microéconomie, élevages et émission de GES
Jean-Pierre Butault	INRA-SAE2	Economie, zonage pédoclimatique de la France
Claire Chenu	AgroParisTech	Carbone du sol
Caroline Colnenne-David	INRA-EA	Systèmes de culture innovants
Stéphane de Cara	INRA-SAE2	Economie, cultures et prairies, émissions CH ₄ /N ₂ O
Nathalie Delame	INRA-SAE2	Microéconomie, revenus des agriculteurs
Michel Doreau	INRA-PHASE	Digestion des ruminants, quantification des émissions CH ₄
Pierre Dupraz	INRA-SAE2	Mesures agro-environnementales
Philippe Faverdin	INRA-PHASE	Physiologie animale, émissions de GES aux bâtiments
Florence Garcia-Launay	INRA-PHASE	Physiologie animale, porcins
Melynda Hassouna	INRA-EA	Evaluation environnementale des ateliers d'élevage
Catherine Hénault	INRA-EA	Emission de N ₂ O des sols de grande culture, légumineuses
Marie-Hélène Jeuffroy	INRA-EA	Systèmes de grande culture, fertilisation azotée
Katja Klumpp	INRA-EFPA	Cycles C et N, mesure des flux de GES, systèmes prairiaux
Aurélié Metay	Supagro Montpellier	Agroforesterie, carbone du sol
Dominic Moran	Scottish Agricultural College	Economie, coordinateur de l'étude sur l'atténuation en Ecosse
Sylvie Recous	INRA-EA	Cycle du carbone et sols, fertilisation azotée
Elisabeth Samson	INRA-SAE2	Traitement statistique, analyse de cycle de vie

Experts ayant contribué plus ponctuellement à l'étude : Jean-Baptiste Duclos (INRA-SAE2), Benoit Gabrielle (AgroParisTech), Christine Le Bas (INRA-EA), Philippe Lecomte (CIRAD), Michel Lherm (INRA-SAE2), Guy Millet (INRA-SAE2), Paul Robin (INRA-EA) et Jean-Philippe Steyer (INRA-EA).

• L'équipe projet INRA-DEPE

Philippe Chemineau	Directeur de la DEPE (jusqu'au 31 mai 2013)
Claire Sabbagh	suivi de l'avant-projet et de la phase de lancement
Lénaïc Pardon	conduite du projet, appui éditorial (rapport) et rédactionnel (document de synthèse)
Isabelle Savini	appui éditorial, rédaction des documents de synthèse
Sophie Le Perchec	appui documentaire
Marion Barbier	logistique, suivi comptable

Documentaliste ayant contribué plus ponctuellement à l'étude : Anne-Marie Bouchon (INRA, Bordeaux)

• Les membres du comité de suivi

Représentants des commanditaires ayant participé aux réunions et/ou assuré une relecture de documents : ADEME - Jérôme Mousset et Audrey Trévisiol ; MAAF – Elsa Delcombel et Ludovic Larbodière ; MEDDE – Martin Bortzmeyer, Pierre Brender, Olivier de Guibert et Antonin Vergez ; INRA-DS Environnement - Jean-François Soussana.

• Les membres du comité technique

Experts techniques ayant fourni des données de la littérature grise, participé aux réunions ou assuré une relecture de documents : Antonio Bispo, Cédric Garnier et Julien Thual (ADEME), Yves Gabory (AFAC), Afsaneh Lellahi et Jean-Pierre Cohan (Arvalis), Francis Flénet (CETIOM), Marie-Sophie Petit (CRA Bourgogne), Antoine Poupard (Groupe In Vivo), Jean-Baptiste Dollé (IDELE), Sandrine Espagnol et Christine Roguet (IFIP), Claude Aubert, Agnès Braine, Paul Ponchant (ITAVI).

* Départements de recherche de l'INRA : EA : Environnement et agronomie ; EFPA : Ecologie des Forêts, Prairies et milieux Aquatiques ; PHASE : Physiologie Animale et Systèmes d'Élevage ; SAE2 : Sciences Sociales, Agriculture & Alimentation, Espace & Environnement.

** En gras : responsable de l'instruction d'une action



INRA
SCIENCE & IMPACT

Délégation à l'Expertise Scientifique, à la Prospective et aux Etudes

147, rue de l'Université
75338 Paris Cedex 07
France

Tél. : + 33 1 42 75 95 29
www.inra.fr

