

## Quels leviers techniques pour l'atténuation des émissions de gaz à effet de serre d'origine agricole ?

Pellerin S.<sup>1</sup>, Bamière L.<sup>2</sup>, Angers D.<sup>3</sup>, Béline F.<sup>4</sup>, Benoît M.<sup>5</sup>, Butault J.-P.<sup>6</sup>, Chenu C.<sup>7</sup>, Colnenne-David C.<sup>8</sup>, De Cara S.<sup>2</sup>, Delame N.<sup>2</sup>, Doreau M.<sup>5</sup>, Dupraz P.<sup>9</sup>, Faverdin P.<sup>10</sup>, Garcia-Launay F.<sup>10</sup>, Hassouna M.<sup>11</sup>, Hénault C.<sup>12</sup>, Jeuffroy M.-H.<sup>8</sup>, Klumpp K.<sup>13</sup>, Metay A.<sup>14</sup>, Moran D.<sup>15</sup>, Recous S.<sup>16</sup>, Samson E.<sup>9</sup>, Savini I.<sup>17</sup>, Pardon L.<sup>17</sup>

<sup>1</sup> INRA, UMR ISPA, 33882 Villenave d'Ornon, France

<sup>2</sup> INRA, UMR Eco-Pub, 78850 Thiverval-Grignon, France

<sup>3</sup> Agriculture et Agroalimentaire Canada, Québec (Québec), G1V2J3, Canada

<sup>4</sup> IRSTEA, UR GERE, 35044 Rennes, France

<sup>5</sup> INRA, UMR Herbivores, 63122 Saint-Genes-Champanelle, France

<sup>6</sup> INRA, UMR LEF, 54042 Nancy, France

<sup>7</sup> AGROPARISTECH, UMR IEES, 75005 Paris, France

<sup>8</sup> INRA, UMR Agronomie, 78850 Thiverval-Grignon, France

<sup>9</sup> INRA, UMR SMART, 35011 Rennes, France

<sup>10</sup> INRA, UMR PEGASE, 35590 Saint Gilles, France

<sup>11</sup> INRA, UMR SAS, 35042 Rennes, France

<sup>12</sup> INRA, UR USS, 45075 Orléans, France

<sup>13</sup> INRA, UR Ecosystème Prairial, 63039 Clermont-Ferrand, France

<sup>14</sup> SUPAGRO, UMR SYSTEM, 34060 Montpellier, France

<sup>15</sup> SRUC, Land Economy and Environment Research, EH9 3JG, Edinburgh, UK

<sup>16</sup> INRA, UMR FARE, 51686 Reims, France

<sup>17</sup> INRA, DEPE, 75338 Paris, France

Correspondance: pellerin@bordeaux.inra.fr

### Résumé

Environ 20% des émissions françaises de gaz à effet de serre (GES) proviennent du secteur agricole. Dix actions portant sur des pratiques agricoles, décomposées en 26 sous-actions, ont été identifiées pour réduire les émissions de l'agriculture en France métropolitaine à l'horizon 2030. Leur potentiel d'atténuation et leur coût pour l'agriculteur ont été chiffrés et comparés. Ces actions portent sur la gestion de l'azote, les pratiques permettant d'accroître le stockage de carbone dans les sols et la biomasse, l'alimentation animale et la production et la consommation d'énergie sur l'exploitation. Un tiers du potentiel global d'atténuation est à coût négatif, c'est-à-dire avec un gain pour l'agriculteur. Il s'agit d'actions portant sur l'optimisation des intrants (engrais azotés, aliments animaux, énergie). Un deuxième tiers est à coût modéré (<25€ par tonne de CO<sub>2</sub>e évité). Ces actions nécessitent des investissements ou modifient les systèmes de culture, mais les coûts sont partiellement compensés par des baisses de charge ou produits supplémentaires. Le troisième tiers est à coût plus élevé (>25€ par tonne de CO<sub>2</sub>e évité). Il s'agit d'actions nécessitant des investissements ou achats d'intrants spécifiques sans retour financier, du temps de travail dédié ou entraînant des pertes de production plus importantes.

**Mots-clés** : gaz à effet de serre, agriculture, atténuation, pratiques agricoles, coût, efficacité

**Abstract:** Which technical mitigation options to reduce greenhouse gas emissions from the agricultural sector in France?

About 20% of French emissions of greenhouse gases (GHG) originate from the agricultural sector. Ten technical measures, split into 26 sub-measures, were proposed to reduce GHG emissions from French

agriculture over the period 2010-2030. Their abatement potential and cost for the farmer were compared. The proposed measures were linked to nitrogen management, management practices which increase carbon storage in soils and biomass, livestock diets and energy production and consumption on farms. The overall abatement potential can be broken down into three parts. One third of the cumulated abatement potential corresponds to sub-measures with a negative technical cost. These sub-measures are based on an improved efficiency of inputs like N fertilizers, animal feed and energy. The second part corresponds to sub-measures with a moderate cost (<€25 per metric ton of CO<sub>2</sub>e avoided). These sub-measures require specific investments or modifying the cropping system slightly more, but additional costs or lower incomes are partially compensated for by a reduction in other costs or additional marketable products. The third part corresponds to sub-measures with a high cost (>€25 per metric ton of CO<sub>2</sub>e avoided). These sub-measures require investment with no direct financial return, the purchase of specific inputs, dedicated labour time or involve greater production losses.

**Keywords:** greenhouse gas, agriculture, abatement, agricultural management practices, cost, efficiency

## 1. Contexte et objectifs

L'inventaire national 2010 des émissions françaises de gaz à effet de serre (GES) attribue à l'agriculture 17,8% de ces émissions, soit 94,4 MtCO<sub>2</sub>e<sup>1</sup> en 2010 (CITEPA, 2012). Cette contribution s'élève à environ 20% (105 MtCO<sub>2</sub>e) si l'on tient compte des émissions qui sont liées à la consommation d'énergie directe par l'agriculture et qui sont comptabilisées dans le secteur "Energie" de l'inventaire national.

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<sub>2</sub>O), produit lors des réactions biochimiques de nitrification et de dénitrification, et 8,0% sont liés au méthane (CH<sub>4</sub>) produit lors de fermentations en conditions anaérobies, notamment par les ruminants. L'agriculture est à l'origine de 86,6% des émissions françaises de N<sub>2</sub>O hors UTCF (Utilisation des Terres, leur Changement, et la Forêt) : 35% sont liés aux émissions directes par les sols agricoles, 28% aux émissions indirectes après lixiviation de nitrate ou volatilisation ammoniacale, et 23,6% aux productions animales et à la gestion des déjections. De même, 68% des émissions françaises de CH<sub>4</sub> hors UTCF sont attribués à l'agriculture : 46% proviennent de la fermentation entérique et 22% de la gestion des déjections animales.

Compte tenu de son poids dans les émissions nationales, 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 (division par 4 des émissions en 2050 par rapport aux émissions en 1990). L'agriculture peut participer à l'amélioration du bilan net des émissions de GES via trois leviers : la réduction des émissions de N<sub>2</sub>O et de CH<sub>4</sub> (et accessoirement de CO<sub>2</sub>), le stockage de carbone dans les sols et dans la biomasse, et la production d'énergie (agroc carburants, biogaz) réduisant les émissions par 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.

---

<sup>1</sup> L'expression des émissions de GES en CO<sub>2</sub>e (équivalent CO<sub>2</sub>) permet de tenir compte du potentiel de réchauffement global (PRG) à 100 ans des différents gaz. Les PRG du CO<sub>2</sub>, du CH<sub>4</sub> et du N<sub>2</sub>O sont de 1, 25 et 298, respectivement (d'après GIEC 2006)

L'objectif d'une étude confiée en 2011 à l'INRA<sup>2</sup> par l'ADEME<sup>3</sup> et les ministères en charge de l'agriculture et de l'écologie était d'identifier 10 actions permettant de réduire les émissions de GES en agriculture à l'horizon 2030 en France métropolitaine et d'en chiffrer le potentiel d'atténuation et le coût pour l'agriculteur. Le secteur de la forêt et celui des agro-carburants étaient exclus du périmètre de l'étude car ayant donné lieu à des études spécifiques par ailleurs. Les méthodes et calculs mis en œuvre ainsi que les résultats sont présentés dans un rapport disponible en ligne (<http://www6.paris.inra.fr/depe/Projets/Agriculture-et-GES>) et une synthèse (Pellerin *et al.*, 2013). Cet article résume les points clés de la démarche et les principaux résultats obtenus au niveau de l'ensemble de l'étude. Des informations plus détaillées sur les leviers techniques étudiés sont données dans les articles suivants.

## 2. Critères de sélection des actions

A partir d'une revue de la littérature nationale et internationale, la sélection des 10 actions à instruire a été réalisée en tenant compte de cinq critères:

**L'éligibilité de l'action au regard du cahier des charges de l'étude.** L'action doit porter sur une pratique agricole, relevant d'une décision de l'agriculteur, avec une atténuation escomptée se situant au moins en partie sur l'exploitation agricole, sans remise en cause majeure du système de production ni baisse des niveaux de production supérieure à 10%. Ont été considérées comme étant en dehors du périmètre de l'étude des actions visant prioritairement l'amont ou l'aval de l'agriculture, ou ayant un impact trop négatif sur les volumes produits.

**Le potentiel d'atténuation a priori de l'action, dans le contexte agricole français.** Les actions présentant un potentiel d'atténuation jugé faible ou incertain ont été écartées. Le potentiel peut être considéré comme faible du fait d'une atténuation unitaire (par hectare, par tête de bétail...) modeste et/ou parce que l'assiette (SAU, effectif animaux,...) sur laquelle l'action peut s'appliquer est faible dans le contexte français (actions concernant la riziculture par exemple). Le potentiel peut aussi être jugé trop incertain par manque de références dans l'état actuel des connaissances (par exemple agir sur l'évolution des communautés microbiennes des sols pour favoriser la réduction du N<sub>2</sub>O en N<sub>2</sub>, ou incorporer du carbone inerte "biochar" dans les sols pour favoriser le stockage de carbone). Ces leviers à l'état de recherche n'ont pas été retenus faute de références suffisantes mais pourraient constituer à terme des leviers supplémentaires.

**La disponibilité des techniques nécessaires à la mise en œuvre de l'action et des connaissances scientifiques validées établissant son efficacité.** N'ont ainsi pas été retenues des actions encore au stade de la recherche (amélioration génétique des cultures ou des animaux sur des critères nouveaux) ou mobilisant des techniques encore mal maîtrisées.

**L'applicabilité de l'action.** Elle peut être problématique du fait d'une faisabilité technique faible à large échelle, de risques (avérés ou suspectés) pour la santé ou l'environnement, d'une incompatibilité avec une réglementation en vigueur (sur l'usage des antibiotiques en élevage par exemple) ou d'une acceptabilité sociale faible (technique utilisant la transgénèse).

**L'existence de 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 répondant déjà aux autres critères (et contribuant de plus à la réduction de pollutions, par exemple), ou au contraire la non-sélection d'autres actions.

<sup>2</sup> Institut National de la Recherche Agronomique

<sup>3</sup> Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie

Les dix actions sélectionnées sur la base de ces cinq critères sont listées dans le tableau 1. Elles concernent quatre grands leviers portant sur la fertilisation azotée (actions 1 et 2), le stockage de carbone dans les sols et la biomasse (actions 3 à 6), l'alimentation animale (actions 7 et 8) et la production et la consommation d'énergie sur l'exploitation agricole (actions 9 et 10). La plupart des actions ont été décomposées en sous-actions (26 sous-actions au total), dont les potentiels d'atténuation sont, en première approximation, additifs. Pour l'action "non labour" trois options techniques, non additives, ont été explorées (semis direct continu, labour occasionnel 1 an sur 5, travail superficiel).

Tableau 1: Liste des actions et sous-actions

Actions et sous-actions		Gaz concerné
<b>Diminuer les apports de fertilisants minéraux azotés pour réduire les émissions de N<sub>2</sub>O associées</b>		
①	Réduire le recours aux engrais minéraux de synthèse, en les utilisant mieux et en valorisant plus les ressources organiques : 1A. Ajuster la dose d'engrais à des objectifs de rendement plus réalistes - 1B. Améliorer la valorisation des apports organiques - 1C. Ajuster les dates d'apport aux besoins des cultures - 1D. Ajouter un inhibiteur de nitrification - 1E. Enfouir l'engrais	N <sub>2</sub> O
②	Augmenter la part des légumineuses pour réduire le recours aux engrais azotés de synthèse : 2A. Introduire plus de légumineuses à graines dans les grandes cultures - 2B. Augmenter les légumineuses dans les prairies temporaires	N <sub>2</sub> O
<b>Stocker du carbone dans le sol et la biomasse</b>		
③	Développer les techniques culturales sans labour pour stocker du C dans les sols : 3 options techniques : semis direct continu, labour occasionnel 1 an sur 5, travail superficiel	CO <sub>2</sub>
④	Introduire davantage de cultures intermédiaires, de cultures intercalaires et de bandes enherbées dans les systèmes de culture : 4A. Développer les cultures intermédiaires dans les systèmes de grande culture - 4B. Développer des cultures intercalaires en vignes et en vergers - 4C. Introduire des bandes enherbées en bordure des cours d'eau	CO <sub>2</sub> N <sub>2</sub> O
⑤	Développer l'agroforesterie pour favoriser le stockage de carbone dans le sol et la biomasse végétale : 5A. Développer l'agroforesterie à faible densité d'arbres - 5B. Développer les haies en périphérie des parcelles agricoles	CO <sub>2</sub>
⑥	Optimiser la gestion des prairies pour favoriser le stockage de carbone : 6A. Allonger la durée de pâturage - 6B. Accroître la durée des prairies temporaires - 6C. Désintensifier les prairies permanentes et temporaires les plus intensives en ajustant mieux la fertilisation azotée - 6D. Intensifier modérément les prairies permanentes peu productives par augmentation du chargement	CO <sub>2</sub> N <sub>2</sub> O
<b>Modifier la ration des animaux pour réduire les émissions de CH<sub>4</sub> entérique et les émissions de N<sub>2</sub>O liées aux effluents</b>		
⑦	Substituer des glucides par des lipides insaturés et utiliser un additif dans les rations des ruminants pour réduire les émissions de CH <sub>4</sub> entérique : 7A. Substituer des glucides par des lipides insaturés dans les rations - 7B. Ajouter un additif (nitrate) dans les rations	CH <sub>4</sub>
⑧	Réduire les apports protéiques dans les rations animales pour limiter les teneurs en azote des effluents et les émissions de N <sub>2</sub> O associées: 8A. Réduire la teneur en azote des rations des vaches laitières - 8B. Réduire la teneur en azote des rations des porcs	N <sub>2</sub> O
<b>Valoriser les effluents pour produire de l'énergie et réduire la consommation d'énergie fossile pour réduire les émissions de CH<sub>4</sub> et de CO<sub>2</sub></b>		
⑨	Développer la méthanisation et installer des torchères, pour réduire les émissions de CH <sub>4</sub> liées au stockage des effluents d'élevage : 9A. Développer la méthanisation - 9B. Couvrir les fosses de stockage et installer des torchères	CH <sub>4</sub>
⑩	Réduire, sur l'exploitation, la consommation d'énergie fossile des bâtiments et équipements agricoles pour limiter les émissions directes de CO <sub>2</sub> : 10A. Pour le chauffage des bâtiments d'élevage - 10B. Pour le chauffage des serres - 10C. Pour les engins agricoles	CO <sub>2</sub>

### 3. Modes de calculs du potentiel d'atténuation et du coût

Le potentiel annuel d'atténuation des émissions de GES et le coût annuel de mise en œuvre de chacune des actions ont été chiffrés à l'échelle de la France métropolitaine à partir des estimations unitaires du potentiel d'atténuation et du coût, de l'assiette et d'hypothèses sur la diffusion des actions sur la période 2010-2030.

- **Potentiel d'atténuation unitaire des émissions de GES.** Le potentiel d'atténuation "unitaire" a été calculé en passant en revue tous les postes d'émissions de GES potentiellement affectés par l'action.

Une distinction a été opérée entre : d'une part, les émissions directes (se produisant sur le périmètre de l'exploitation agricole) et indirectes (intervenant sur les espaces proches) ; d'autre part, les émissions induites, à l'amont ou à l'aval de l'exploitation, liées à des achats ou à la vente de biens modifiés par

l'action (par exemple, émissions de CO<sub>2</sub> associées à la fabrication des intrants ou évitées grâce à la vente d'énergie renouvelable produite sur l'exploitation) (Figure 1).

Deux calculs ont été effectués : l'un selon la méthode employée par le CITEPA<sup>4</sup> pour l'inventaire national des émissions de 2010 (qui est issue des recommandations du GIEC<sup>5</sup> de 1996), l'autre selon une méthode proposée par les experts, qui utilise les lignes directrices du GIEC de 2006 et/ou propose une estimation fondée sur la bibliographie scientifique, afin de prendre en compte des effets que la première méthode ne peut, par construction, comptabiliser. Ce second calcul permet, par exemple, la prise en compte du stockage de carbone dans le sol lié à des pratiques (non-labour, agro-foresterie), ou des effets de la composition de la ration des bovins sur leurs émissions de CH<sub>4</sub>, ce que ne permet pas le premier calcul.

- **Détermination du coût unitaire de l'action pour l'agriculteur.** Le coût de l'action a été évalué dans le contexte économique de 2010, donc sans prendre en compte l'évolution de ce contexte d'ici à 2030, ce qui aurait nécessité la construction de scénarios économiques très difficilement prédictibles. Le coût unitaire comprend les variations de charges (achats d'intrants, travail...), les investissements, les modifications de revenu associées à celles des productions (pertes éventuelles de rendement, vente de bois ou d'électricité...). Les coûts des sous-actions ont été calculés en intégrant les subventions publiques lorsqu'elles sont indissociables des prix pratiqués (subvention au rachat de l'électricité produite par méthanisation, défiscalisation des carburants agricoles), à l'exclusion des subventions "facultatives" (aides couplées, DPU, subventions régionales, par exemple). Un coût positif représente un manque à gagner pour l'agriculteur. Un coût négatif représente un gain, généralement lié à une économie d'intrant.

- **Détermination de l'assiette sur laquelle l'action peut être appliquée :** surfaces (terres assolées ou en prairie par exemple) ou effectifs animaux (cheptel bovin ou porcin par exemple), en tenant compte d'éventuels obstacles techniques pouvant s'y opposer : l'assiette peut ainsi être limitée par des contraintes techniques qui font que certaines surfaces (culture ou type de sol...) ou certains cheptels (par leur mode d'alimentation...) ne sont pas adaptés, ou ne permettent pas une mise en œuvre de l'action dans des conditions techniquement acceptables pour l'agriculteur.

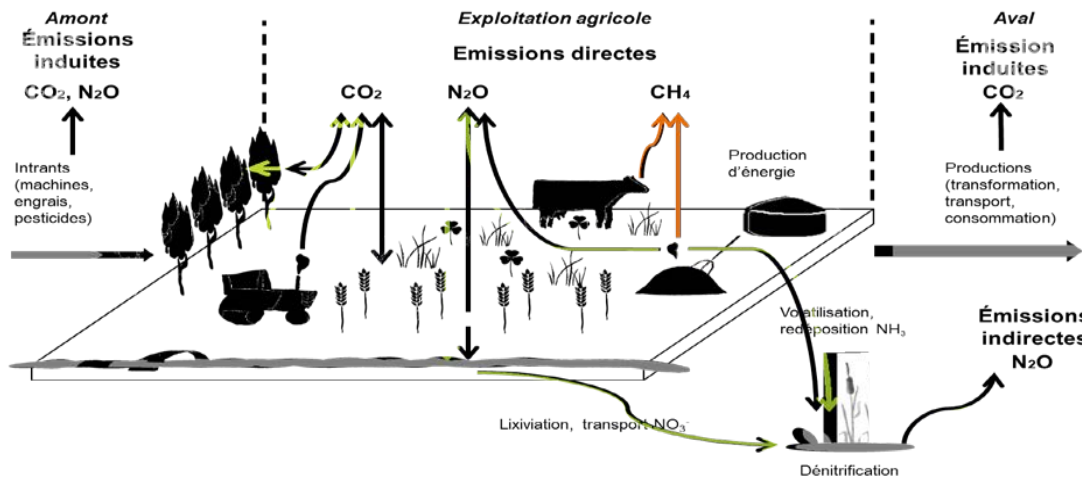
- **Choix d'un scénario de diffusion de l'action.** Il décrit la vitesse d'adoption de l'action partant de la situation de référence en 2010 (action déjà partiellement appliquée ou non) en tenant compte de divers freins (investissement, disponibilité des équipements, acceptabilité sociale limitée...) qui peuvent ralentir ou différer l'adoption de l'action.

La détermination de ces variables a permis de calculer le potentiel d'atténuation annuel et le coût annuel de l'action (obtenus en multipliant les valeurs unitaires annuelles par l'assiette pour l'année considérée), ainsi que le coût par tonne de CO<sub>2</sub>e évité par la mise en œuvre de l'action (obtenu en divisant le coût unitaire annuel de l'action par l'atténuation unitaire annuelle qu'elle permet).

---

<sup>4</sup> Centre Interprofessionnel Technique d'Etudes de la Pollution Atmosphérique, organisme réalisant l'inventaire des émissions françaises de GES pour le compte du MEDDE.

<sup>5</sup> Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (IPCC en anglais)



**Figure 1 :** Emissions directes, émissions indirectes et émissions induites à l'amont et à l'aval de l'exploitation agricole (d'après Pellerin *et al.*, 2013)

#### 4. Coût et atténuation comparés des sous-actions

Les deux variables classiquement retenues pour comparer des actions d'atténuation des émissions de GES sont le potentiel annuel d'atténuation et le coût de la tonne de  $\text{CO}_2\text{e}$  évité. La Figure 2 représente, pour les 26 sous-actions, le potentiel technique d'atténuation (en abscisses) et le coût de la tonne de  $\text{CO}_2\text{e}$  évité (en ordonnées). Les sous-actions sont classées par ordre de coût croissant. En première analyse, le potentiel global d'atténuation peut être décomposé en trois tiers:

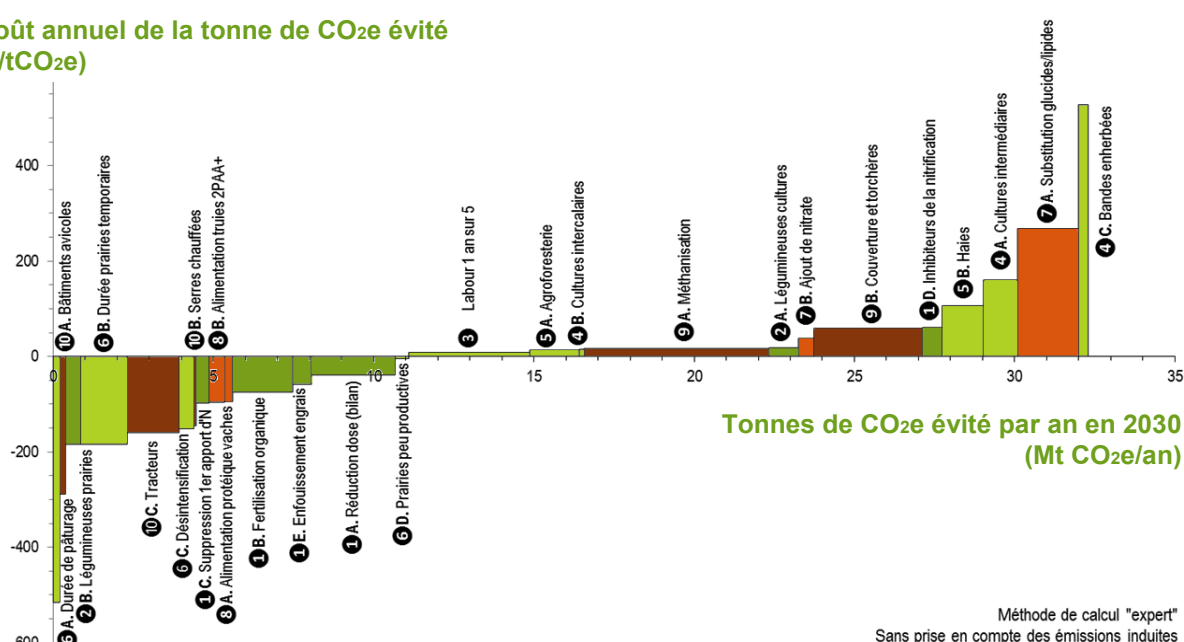
**Un premier tiers correspond à des sous-actions à coût technique négatif**, c'est-à-dire donnant lieu à un gain financier pour l'agriculteur (sous les hypothèses adoptées ici). Il s'agit principalement de sous-actions relevant **d'ajustements techniques avec économies d'intrants** sans perte de production. Figurent dans cette catégorie des sous-actions relatives à la conduite des prairies (allongement de la durée de pâturage, accroissement de la part des légumineuses dans les prairies, 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 à des objectifs de rendement réalistes, la modulation des dates et la localisation des apports, une meilleure prise en compte de l'azote apporté par les produits organiques, l'ajustement de l'alimentation protéique des bovins et des porcs. La majeure partie de ce potentiel d'atténuation à coût négatif est liée à la **gestion de l'azote** (fertilisation des cultures et des prairies, légumineuses, alimentation azotée des animaux). Viennent ensuite la **gestion des prairies** et les **économies d'énergie fossile**.

**Un deuxième tiers correspond à des sous-actions à coût modéré** (inférieur à 25 € par tonne de  $\text{CO}_2\text{e}$  évité). Il s'agit de sous-actions **nécessitant des investissements spécifiques** (par exemple, pour la méthanisation) ou **modifiant un peu plus fortement le système de culture** (réduction du labour, agroforesterie, développement des légumineuses à graine) pouvant occasionner des baisses modérées du niveau de production, partiellement compensées par des baisses de charges (carburants) ou la valorisation de produits complémentaires (électricité, bois). Dans ce deuxième groupe, l'estimation du potentiel d'atténuation est très sensible aux hypothèses relatives à l'assiette des actions (surface ou volume d'effluents concernés), et le coût dépend fortement des prix utilisés pour les calculs. Une évaluation hors subventions publiques (cf. infra) accroît l'intérêt du non-labour et réduit celui de la méthanisation. Ces actions contribuent à d'autres objectifs agri-environnementaux que la seule réduction des émissions de GES : production d'énergie renouvelable (méthanisation), réduction du risque érosif (non-labour), qualité des paysages et biodiversité (agroforesterie). La réduction du labour

pourrait induire une augmentation de l'usage des herbicides, mais l'option représentée (labour un an sur cinq) limite ce risque.

Le troisième tiers correspond à des sous-actions à coût plus élevé (supérieur à 25 € par tonne de CO<sub>2</sub>e évité). Il s'agit de sous-actions nécessitant un **investissement sans retour financier** direct (torchères, par exemple), des **achats d'intrants spécifiques** (inhibiteur de nitrification, lipides insaturés ou additif incorporés aux rations des ruminants...), du **temps de travail dédié** (cultures intermédiaires, haies...) et/ou impliquant des **pertes de production plus importantes** (bandes enherbées réduisant la surface cultivée, par exemple), sans baisse de charges et avec peu ou pas de valorisation de produits supplémentaires. Certaines de ces actions ont cependant un effet positif sur d'autres objectifs agri-environnementaux (par exemple, effets 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 gagnerait à être analysée au regard des divers services rendus.

### Coût annuel de la tonne de CO<sub>2</sub>e évité (€/tCO<sub>2</sub>e)



**Figure 2** : Coût (en euros par tonne de CO<sub>2</sub>e évité) et potentiel d'atténuation (en millions de tonnes de CO<sub>2</sub>e évité) des 26 sous-actions (d'après Pellerin *et al.*, 2013)

Pour chaque sous-action la hauteur du rectangle représente le coût par tonne de CO<sub>2</sub>e évité et la largeur du rectangle représente le potentiel d'atténuation annuel estimé en 2030, hors émissions induites, selon le mode de calcul "experts". Un coût négatif représente un gain et un coût positif un manque à gagner pour l'agriculteur. Lorsque plusieurs options techniques alternatives ont été explorées pour une action, seule l'une d'elles a été reportée (labour un an sur cinq pour l'action Non-labour).

## 5. Potentiel global d'atténuation

Sous hypothèse d'additivité des sous-actions, le potentiel global d'atténuation annuel des émissions de GES lié à la mise en place de l'ensemble des 26 sous-actions serait de 32,3 Mt CO<sub>2</sub>e en 2030, hors émissions induites. Cette estimation correspondant au mode de calcul "experts" ne peut pas être directement comparée aux émissions agricoles françaises de l'inventaire national, qui sont calculées selon d'autres règles. Les équations de calcul mises en œuvre par le CITEPA pour l'inventaire des émissions nationales ne permettent pas, par construction, de rendre compte de l'atténuation escomptée de certaines sous-actions proposées dans le cadre de cette étude. C'est le cas pour les actions

favorisant le stockage de carbone dans les sols via des techniques culturales mises en œuvre sans changement d'usage des terres, comme le non-labour ou l'agroforesterie. En effet le mode de calcul utilisé pour l'inventaire national ne comptabilise une variation de stock de carbone dans le sol que s'il y a changement d'usage du sol (par exemple passage d'une prairie à une culture). Par contre l'effet d'un changement de gestion (passage au non labour par exemple) n'est pas comptabilisé. De même l'utilisation de modes de calculs forfaitaires pour les émissions liées à l'élevage ne permet pas de rendre compte de l'effet des modifications des régimes alimentaires sur les émissions de CH<sub>4</sub>. De ce fait, 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 sous-actions (toujours sous hypothèse d'additivité) atteint 10,0 Mt CO<sub>2</sub>e par an en 2030, soit moins du tiers de la valeur obtenue avec les modes de calcul proposés par les experts.

L'hypothèse d'additivité utilisée pour estimer le potentiel d'atténuation global est simplificatrice car la mise en œuvre d'une sous-action peut modifier le potentiel d'atténuation d'une autre, en raison d'interactions. Celles-ci peuvent porter sur l'assiette (l'augmentation de la surface en légumineuses diminue l'assiette de l'action portant sur la fertilisation azotée) ou sur des variables de calcul (les déjections émises sur les prairies lors de l'allongement du pâturage ne sont plus disponibles pour la méthanisation...). L'effet de ces interactions sur le calcul du potentiel global d'atténuation dépend des règles de calcul adoptées, notamment de l'ordre dans lequel les actions sont mises en œuvre. Quand les interactions au sein de chaque action, puis entre actions, sont prises en compte, le potentiel d'atténuation cumulé pour l'ensemble des actions passe de 32,3 à 29,6 ou 26,6 MtCO<sub>2</sub>e par an, selon le mode de calcul. Cette réduction assez faible s'explique par le fait que les actions proposées portent sur différents secteurs de production agricole.

## 6. Incertitudes et sensibilité des résultats aux hypothèses de calcul

### 6.1 Prise en compte des émissions induites

L'analyse qui précède a été faite sans tenir compte des émissions induites en amont ou en aval de l'exploitation, liées à des achats ou à des ventes de produits, qui peuvent être modifiés par l'action. La prise en compte de ces émissions induites modifie peu l'atténuation calculée pour la majorité des sous-actions, avec cependant quelques exceptions. Elle accroît fortement le potentiel calculé pour les actions relatives à la fertilisation et aux légumineuses (du fait des émissions de GES liées à la fabrication des engrais azotés), et à l'alimentation azotée des animaux (du fait d'émissions liées à la production et au transport de tourteaux de soja). A l'inverse, la prise en compte des émissions induites diminue l'intérêt de l'ajout de lipides dans la ration des bovins, qui donne lieu à une augmentation des émissions en amont, pour la production des matières premières.

### 6.2 Sensibilité des résultats aux hypothèses économiques

Les hypothèses faites pour les calculs économiques affectent fortement les résultats obtenus. Ainsi, 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 à 55 € par tonne de CO<sub>2</sub>e évité. Inversement, un calcul sans la subvention que constitue la défiscalisation des carburants agricoles accroît l'intérêt du labour occasionnel : le coût de la tonne de CO<sub>2</sub>e évité devient même négatif, passant de +8 à -13 €.

La mise en évidence d'un potentiel d'atténuation à coût technique négatif, également observé dans le cadre d'études similaires conduites dans d'autres pays (MacLeod *et al.*, 2010; Moran *et al.*, 2008, 2011; Schulte et Donnellan, 2012), suggère l'existence de freins à l'adoption d'une autre nature (aversion au risque...). Les coûts de transaction privés, correspondant au temps passé par l'agriculteur pour rechercher des informations, se former, remplir des documents administratifs nécessaires à la mise en



œuvre de l'action pourraient expliquer en partie la non-adoption spontanée de certaines de ces actions à coût apparent négatif (Bamière *et al.*, 2014).

### 6.3 Incertitudes sur les calculs

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 impliqués dans les émissions de GES et le stockage de carbone, et des difficultés de mesure des émissions gazeuses (de N<sub>2</sub>O notamment). Pour certaines actions, l'incertitude sur l'assiette et la cinétique d'adoption est également forte (agroforesterie, méthanisation, par exemple). Globalement, les potentiels d'atténuation des actions fertilisation, légumineuses, non-labour, agroforesterie et gestion des prairies sont ceux qui présentent les incertitudes les plus élevées.

## Conclusion

Ce travail met en évidence un potentiel d'atténuation significatif des émissions du secteur agricole à l'horizon 2030 uniquement lié à des leviers techniques, sans remise en cause des systèmes de production, de leur localisation et de leurs niveaux de production. Le potentiel global d'atténuation des émissions de GES calculé est important (de l'ordre de 30 MtCO<sub>2</sub>e par an, avec le mode de calcul "expert"), malgré un mode d'estimation prudent (limitation à 10 actions, non prise en compte d'actions encore à l'état de recherche ou à l'acceptabilité sociale faible, etc...). L'écart entre le mode de calcul "expert" (30 MtCO<sub>2</sub>e par an) et le mode de calcul "CITEPA" (10MtCO<sub>2</sub>e par an) milite pour un effort d'amélioration de l'inventaire français des émissions de GES afin qu'il puisse rendre compte de l'effet de pratiques agricoles susceptibles de réduire les émissions, en particulier celles favorisant le stockage de C dans les sols.

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...). La plupart des sous-actions proposées, répondant souvent à une logique de sobriété, ont d'autres impacts environnementaux positifs : la réduction de la fertilisation azotée minérale diminue la pollution des eaux, l'implantation d'arbres ou de couverts a des effets favorables sur la biodiversité et la préservation des sols. Dans le cas du non-labour, l'antagonisme avec la réduction des produits phytosanitaires est minimisé avec l'option du labour occasionnel.

La majeure partie du potentiel d'atténuation à coût négatif est liée à la gestion de l'azote (actions portant sur la fertilisation azotée des cultures et des prairies, les légumineuses, l'alimentation azotée des animaux). L'intérêt de ces actions est encore renforcé si l'on prend en compte les émissions induites, dues 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). Les autres leviers à coût négatif concernent la gestion des prairies et les économies d'énergie fossile sur l'exploitation. Une part majeure du potentiel global d'atténuation, à coût modéré, concerne le travail du sol (labour occasionnel), la gestion des effluents d'élevage (méthanisation) et l'agroforesterie, avec cependant des incertitudes élevées. L'alimentation des bovins représente un levier significatif, mais dont le coût est plus élevé (lipides en alimentation des ruminants).

A court terme, les suites à donner à cette étude sont :

- L'acquisition de références complémentaires sur des leviers techniques à fort potentiel, mais assortis d'incertitudes importantes, comme l'agroforesterie en milieu tempéré et le labour occasionnel ;

- L'accompagnement de l'évolution des méthodes d'inventaire, pour qu'elles puissent rendre compte de l'effet des actions proposées ;
- La poursuite de l'analyse des interactions entre actions, dans le cadre d'une approche systémique des leviers d'atténuations au sein de l'exploitation agricole ;
- 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 ;
- L'identification des instruments de politique publique et des mesures incitatives susceptibles de favoriser l'adoption des actions présentant les meilleures propriétés.

Au-delà de l'horizon temporel fixé pour cette étude (2030), certaines actions proposées présentent un potentiel d'atténuation reproductible chaque année (fertilisation, méthanisation, alimentation animale, par exemple) ; 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, 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 avec construction de scénarios (couplage des productions végétales et animales, modification des régimes alimentaires...). Une identification et une évaluation de ces leviers d'une autre nature complèteraient utilement cette étude.

### Références bibliographiques

- Bamière L., De Cara S., Pardon L., Pellerin S., Samson E., Dupraz P., 2014. Les coûts de transaction privés sont-ils un obstacle à l'adoption de mesures techniques d'atténuation des émissions de gaz à effet de serre dans le secteur agricole? Notes et études socio-économiques 38, 7-25.
- CITEPA, 2012. Rapport national d'inventaire pour la France au titre de la convention cadre des Nations Unies sur les changements climatiques et du protocole de Kyoto. 1364 p.
- MacLeod M., Moran D., Eory V., Rees R.M., Barnes A., Topp C.F.E., Ball B., Hoad S., Wall E., McVittie A., Pajot G., Matthews R., Smith P., Moxey A. 2010. Developing greenhouse gas marginal abatement cost curves for agricultural emissions from crops and soils in the UK. *Agricultural Systems* 103 (4), 198-209.
- Moran D., MacLeod M., Wall E., Eory V., Pajot G., Matthews R., McVittie A., Barnes A., Rees B., Moxey A., Williams A., Smith P., 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.
- Moran D., MacLeod M., Wall E., Eory V., McVittie A., Barnes A., Rees R., Topp C.F.E., Moxey A. 2011. Marginal Abatement Cost Curves for UK Agricultural Greenhouse Gas Emissions. *Journal of Agricultural Economics* 62 (1), 93-118.
- 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.
- 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.