



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

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



Membre fondateur de



Maintenant reconnue comme un des enjeux décisifs de l'évolution du climat, la réduction des émissions nettes de gaz à effet de serre (GES) est devenue un objectif d'importance majeure. L'agriculture est appelée à y contribuer, comme les autres secteurs économiques. Les spécificités des émissions de GES d'origine agricole rendent cependant leur quantification et leur limitation difficiles.

L'ADEME (Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie), le MAAF (Ministère de l'agriculture, de l'agroalimentaire et de la forêt) et le MEDDE (Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie) ont demandé à l'INRA de réaliser une étude sur l'atténuation des émissions de GES du secteur agricole français métropolitain. Il s'agissait de déterminer et d'analyser une dizaine d'actions portant sur des pratiques agricoles susceptibles de contribuer à la réduction des émissions de GES et/ou à l'accroissement du stockage de carbone dans les sols et la biomasse. L'analyse a consisté à estimer le potentiel d'atténuation de chacune de ces actions et les coûts et gains économiques associés. Cette étude devrait contribuer à faciliter la conception et/ou la réorientation de politiques publiques destinées à réduire les émissions de GES dans le secteur agricole.

Les émissions de GES et le stockage de carbone de l'agriculture

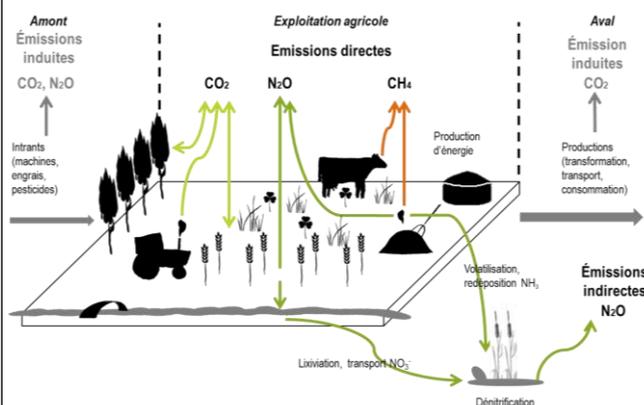
L'inventaire national 2010 des émissions françaises de GES attribue à l'agriculture 17,8% de ces émissions, soit 94,4 MtCO₂e en 2010. Cette contribution s'élève à environ 20% (105 MtCO₂e) si l'on tient compte des émissions qui sont liées à la consommation d'énergie de l'agriculture et qui sont comptabilisées 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 (N₂O), produit lors des réactions biochimiques de nitrification et de dénitrification, et 8,0% sont liés au méthane (CH₄) produit lors de fermentations en conditions anaérobies (voir Encadré). L'agriculture est à l'origine de 86,6% des émissions françaises de N₂O 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 CH₄ 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 N₂O et de CH₄ (et accessoirement de CO₂), le stockage de carbone dans les sols et dans la biomasse, et la production d'énergie (agocarburants, 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.

Principaux mécanismes d'émission de GES et de stockage de carbone dans le secteur agricole



Les émissions de dioxyde de carbone (CO₂) proviennent de la combustion des molécules organiques ou de leur dégradation par des êtres vivants en conditions aérobies (avec oxygène). Les émissions de CO₂ sont comptabilisées lorsque la molécule carbonée est d'origine fossile. Lorsqu'elle est d'origine renouvelable, on considère que le CO₂ émis ne contribue pas à l'accroissement de la teneur en CO₂ atmosphérique (cycle court du carbone).

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 microorganismes. Toutefois, cette décomposition étant lente et partielle, du carbone se trouve transitoirement stocké dans le sol, sous différentes formes (litières, humus, biomasse microbienne). La biomasse végétale et le sol peuvent ainsi constituer des puits de carbone et contribuer à réduire la concentration en CO₂ dans l'atmosphère. Les choix réalisés

sur l'exploitation agricole (usage des sols, techniques culturales mises en œuvre) peuvent modifier les stocks de carbone sur l'exploitation soit dans le sens d'un stockage accru (puits de carbone), soit dans le sens d'une réduction du stock (source de CO₂ pour l'atmosphère).

Les émissions de protoxyde d'azote (N₂O) résultent de réactions biochimiques de nitrification (transformant l'ammonium, NH₄⁺, en nitrate, NO₃⁻, et produisant du N₂O) favorisée en conditions aérobies, et de dénitrification (transformant le NO₃⁻ en N₂ et, pour partie, en N₂O) favorisée en conditions anaérobies. Les principales sources de N₂O sont les engrais azotés minéraux de synthèse, l'urée et les matières organiques non digérées contenues dans les déjections des animaux (la production de N₂O est favorisée lorsque certaines parties sont aérobies et d'autres anaérobies — cas du fumier solide aéré). Les émissions de N₂O sur l'exploitation agricole sont dites "directes" ; les émissions ayant lieu sur les espaces proches, après lixiviation du nitrate par percolation de l'eau dans le sol ou après volatilisation puis redépôtion d'ammoniac, sont dites "indirectes".

Les émissions de méthane (CH₄) proviennent de la dégradation, par des microorganismes, des molécules organiques en conditions anaérobies, par fermentation. Les principales sources sont les ruminants, qui éructent le CH₄ produit par fermentation entérique dans leur système digestif (rumen) et les déjections des animaux stockées en conditions anaérobies (cas du lisier).

Sur les 20% d'émissions totales de l'agriculture (énergie comprise, mais hors puits de carbone liés à l'UTCF), le N₂O, le CH₄ et le CO₂ représentent respectivement 51%, 41% et 8% des émissions du secteur agricole exprimées en équivalent CO₂ (CO₂e). Les poids élevés du N₂O et du CH₄ s'expliquent par leur pouvoir de réchauffement global (PRG) à l'horizon de 100 ans nettement supérieur à celui du CO₂ (25 fois plus élevé pour le CH₄, 298 fois pour le N₂O).

La sélection de dix actions techniques

● Les critères de sélection des actions

La sélection des actions à instruire a été réalisée en fonction de critères inscrits dans le cahier des charges de l'étude, et des performances attendues *a priori*, sur la base de la littérature ou à dire d'experts, des actions en termes d'atténuation des émissions de GES.

● **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 des niveaux de production supérieure à 10%. Ont donc été considérées comme étant en dehors du périmètre de l'étude des actions qui soit visent un secteur en amont ou en aval de la production agricole (par exemple, action portant sur la consommation alimentaire), soit ciblent le secteur agricole mais ont leur principal effet en amont ou en aval (par exemple, action portant sur la consommation d'électricité des exploitations), ou auraient un impact trop négatif sur les volumes produits.

● **Potentiel d'atténuation des émissions de GES.** 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 modeste et/ou parce que l'assiette sur laquelle l'action peut s'appliquer est faible (action concernant les rizières). Le potentiel peut aussi être jugé trop incertain par manque de références 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 pas été retenues des actions encore au stade de la recherche, impliquant des techniques encore mal maîtrisées (incorporation de charbon d'origine végétale dans le sol pour y stocker du carbone) ou dont les applications ne sont pas disponibles actuellement (amélioration génétique des cultures ou des animaux sur des critères nouveaux).

● **Applicabilité de l'action.** Elle peut être problématique du fait d'une faisabilité technique faible à large échelle (modification des conditions physico-chimiques des sols), 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).

● **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 (impliquant une "intensification" des systèmes de production, par exemple).

La sélection initiale des actions s'est effectuée sur des critères "techniques" d'atténuation des émissions ; les calculs réalisés visent à objectiver le calcul du potentiel d'atténuation, et à le compléter sur le plan économique.

● Les dix actions instruites

Ces actions (notées ① à ⑩) relèvent de 4 leviers techniques. Chacune comporte plusieurs sous-actions dont les potentiels d'atténuation sont cumulables (sauf l'action Non-labour, déclinée en trois options techniques alternatives, non cumulables). L'ordre de présentation des actions ci-dessous n'est pas un ordre de priorité ou d'importance.

I. **Diminuer les apports de fertilisants minéraux azotés**, qui sont à l'origine de la plus grande partie des émissions de N₂O.

① Diminuer le recours aux engrais minéraux de synthèse pour réduire les émissions de N₂O associées. Cette diminution des apports peut être obtenue : en les ajustant mieux aux besoins de la culture, avec des objectifs de rendement réalistes ; en valorisant mieux les fertilisants organiques ; en améliorant l'efficacité de l'azote fourni à la culture par les conditions d'apport (retard du premier apport au printemps, ajout d'un inhibiteur de nitrification, enfouissement localisé de l'engrais).

② Accroître la part des cultures de légumineuses qui, grâce à la fixation symbiotique d'azote atmosphérique, ne nécessitent pas de fertilisants azotés externes, et laissent dans le sol des résidus riches en azote permettant de réduire la fertilisation minérale de la culture suivante. Deux sous-actions sont examinées : accroître la part des légumineuses à graines en grande culture ; introduire et maintenir une plus forte proportion de légumineuses dans les prairies temporaires.

II. **Stocker du carbone dans le sol et la biomasse** par l'accumulation de matière organique, soit en augmentant la production de biomasse pérenne (arbres) ou les restitutions de matière organique dans les sols, soit en ralentissant sa minéralisation.

③ Développer les techniques culturales sans labour susceptibles de stocker du carbone dans les sols. L'abandon du labour, en évitant la perturbation des agrégats du sol qui protègent la matière organique, ralentit sa décomposition et sa minéralisation, et accroît donc le stockage de C. Cette suppression d'une opération culturale forte consommatrice de carburant fossile permet en outre une baisse des émissions de CO₂. Trois options techniques sont étudiées : le passage au semis direct continu, au semis direct avec labour occasionnel 1 an sur 5, à un travail superficiel du sol en continu.

④ Implanter davantage de couverts dans les systèmes de culture pour stocker du carbone dans les sols (et limiter les émissions de N₂O). Il s'agit d'étendre ou de généraliser : les cultures intermédiaires (semées entre deux cultures de vente) en grande culture ; les cultures intercalaires en verger et vignoble (enherbement permanent ou temporaire du sol) ; les bandes enherbées en périphérie de parcelles.

⑤ Développer l'agroforesterie (lignes d'arbres implantées dans des parcelles cultivées ou les prairies) et les haies (en périphérie des parcelles) pour favoriser le stockage de carbone dans le sol et la biomasse végétale.

⑥ Optimiser la gestion des prairies pour favoriser le stockage de carbone mais aussi réduire les émissions de N₂O et de CH₄ liées à la fertilisation minérale et aux déjections des animaux. Les voies envisagées sont : allonger la saison de pâturage pour réduire la part des déjections émises en bâtiment et donc les émissions de N₂O et CH₄ associées ; accroître la durée de vie des prairies temporaires, pour différer leur retournement qui accélère le déstockage du carbone par dégradation des matières organiques du sol ; réduire la fertilisation des prairies les plus intensives ; intensifier modérément les prairies permanentes les plus extensives (landes...) en augmentant le chargement animal pour accroître la production végétale et donc le stockage de carbone.

III. **Modifier la ration des animaux**, pour réduire leurs émissions directes de CH₄ (par éructation) ou les quantités de matières azotées (urée notamment) excrétées, à l'origine d'émissions de N₂O.

⑦ Réduire la production de méthane des bovins en orientant le fonctionnement du rumen vers des voies métaboliques moins

productrices de CH₄, par des modifications limitées de la composition de la ration des animaux. Deux techniques sont envisagées : enrichir la ration en lipides insaturés (sous forme de graines d'oléagineux) en substitution à des glucides ; ajouter un additif (du nitrate) dans les rations pauvres en azote fermentescible (à base d'ensilage de maïs).

⑧ Réduire les apports protéiques de la ration pour limiter les rejets d'azote dans les déjections, qui correspondent à la fraction des protéines ingérées que les animaux ne fixent pas parce qu'elle excède leurs besoins. Il s'agit de réduire la teneur en protéines des aliments concentrés distribués aux vaches laitières, et de mieux ajuster les rations des porcs à l'engrais et des truies en fonction de leur stade de développement, en adaptant l'aliment composé à chaque stade et en ajustant sa composition grâce à l'utilisation d'acides aminés de synthèse.

IV. Valoriser les effluents pour produire de l'énergie et réduire la consommation d'énergie fossile sur l'exploitation pour réduire

les émissions de méthane produit par la fermentation des effluents d'élevage et les émissions de CO₂.

⑨ Capturer le CH₄ produit par la fermentation des effluents d'élevage durant leur stockage, et l'éliminer par combustion, c'est-à-dire le transformer en CO₂. Le CH₄ est brûlé, avec production d'électricité 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 est intéressante même en l'absence de valorisation énergétique (cas des torchères). Il s'agit d'accroître le volume d'effluents d'élevage méthanisés et, à défaut, de couvrir les fosses de stockage de lisier et installer des torchères.

⑩ Réduire la consommation d'énergies fossiles (gaz, fioul, gazole) sur l'exploitation, en améliorant l'isolation et les systèmes de chauffage des bâtiments d'élevage et des serres chaudes, et en optimisant la consommation de gazole des tracteurs (par le réglage des moteurs et l'application des règles d'éco-conduite) pour limiter les émissions directes de CO₂.

Potentiels d'atténuation des émissions de GES et coûts comparés des actions

• Les variables d'évaluation des actions

Le potentiel annuel d'atténuation des émissions de GES et le coût annuel de mise en œuvre de chacune des actions sont chiffrés à l'échelle de la France métropolitaine à partir des estimations unitaires du potentiel d'atténuation et du coût, de l'assiette (surface, effectif...) 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" (selon l'action : par hectare, par tête de bétail...) est calculé, à l'horizon 2030, en passant en revue tous les postes d'émissions de GES potentiellement affectés par l'action.

Une distinction est 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 CO₂ associées à la fabrication des intrants ou évitées grâce à la vente d'énergie renouvelable produite sur l'exploitation).

Deux calculs sont effectués : l'un selon la méthode employée par le CITEPA¹ pour l'inventaire national des émissions de 2010 (qui est issue des recommandations du GIEC 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, agroforesterie), ou des effets de la composition de la ration des bovins sur leurs émissions de CH₄, ce que ne permet pas le premier calcul.

• **Détermination du coût unitaire de l'action pour l'agriculteur.** Ce 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 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.

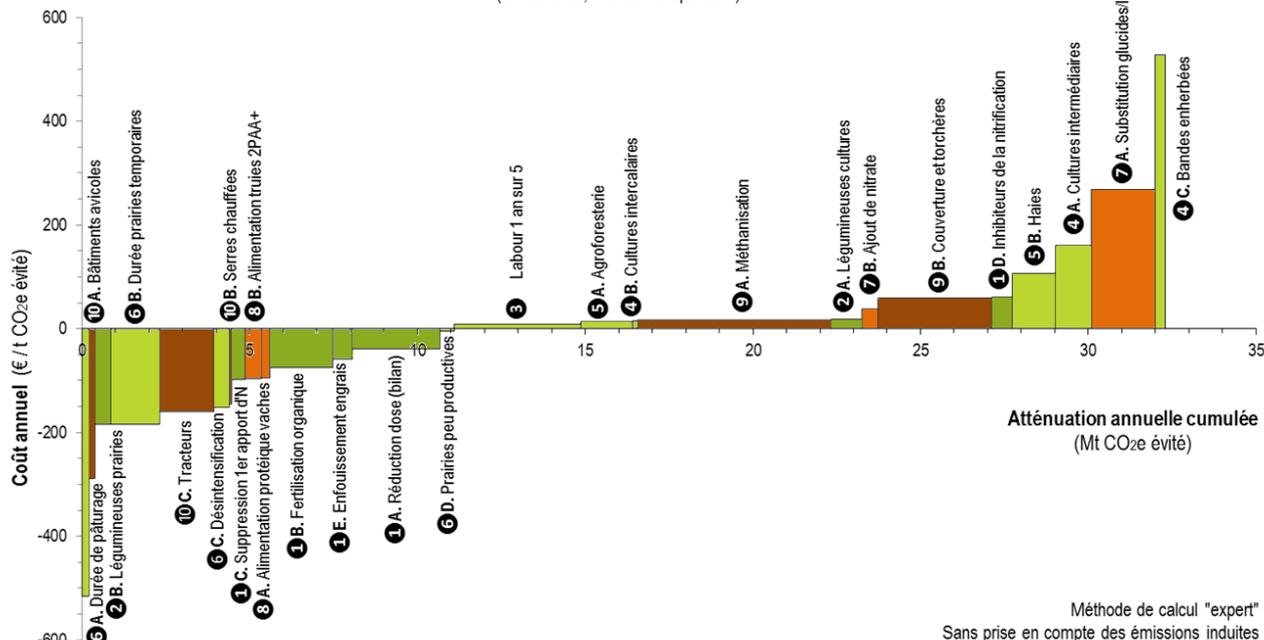
• **Choix d'un scénario de diffusion de l'action**, qui décrit la vitesse d'adoption de l'action partant de la situation de référence en 2010 (action déjà partiellement appliquée ou non) et tenant compte de divers freins (investissement, disponibilité des équipements, acceptabilité sociale limitée...)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

La détermination de ces variables permet de calculer le **potentiel d'atténuation annuel** et le **coût annuel** de l'action (obtenus en multipliant les valeurs unitaires annuelles par l'assiette nationale pour l'année considérée), ainsi que le **coût par tonne de CO_{2e} 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).

Les deux variables classiquement retenues pour comparer les actions sont le potentiel d'atténuation annuel et le coût de la tonne de CO_{2e} évité. Le graphe représentant, pour chaque action, le potentiel technique d'atténuation (en abscisses) et le coût de la tonne de CO_{2e} évité (en ordonnées) permet de comparer les actions selon ces deux critères. La figure ci-contre présente ces deux variables (estimées, pour 2030, avec le mode de calcul proposé par les experts) pour l'ensemble des sous-actions. 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).

¹ Centre Interprofessionnel Technique d'Etudes de la Pollution Atmosphérique, organisme réalisant l'inventaire des émissions françaises de GES pour le compte du MEDDE.

Coûts de la tonne de CO₂e évité pour l'agriculteur et potentiels d'atténuation
(année 2030, France métropolitaine)



Lecture de la figure. Cette "courbe de coût d'abattement (ou d'atténuation)", dite "MACC" (*Marginal abatment cost curve*), représente :

- horizontalement : le **potentiel d'atténuation** des émissions annuelles de GES à l'horizon 2030 et à l'échelle nationale ; l'atténuation est calculée hors émissions induites, avec le mode de calcul "expert", sans prise en compte des interactions entre actions ;
- verticalement, le **coût** pour l'agriculteur de la tonne d'équivalent CO₂ évité ; ce coût technique, hors coûts de transaction privés, est calculé en incluant les subventions publiques indissociables du prix payé ou reçu par l'agriculteur. Un coût "négatif" correspond à un gain pour l'agriculteur, un coût "positif" à un manque à gagner.

Pour chaque sous-action, la hauteur du rectangle indique donc 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.

Les sous-actions sont ordonnées par coût croissant. A gauche, sous l'axe horizontal, figurent les sous-actions qui génèrent un gain pour l'agriculteur ; au centre, celles dont le coût (négatif ou positif) est faible ; à droite, celles qui sont les plus coûteuses.

Cette représentation facilite les comparaisons entre actions, et permet de lire directement les réductions d'émissions cumulées atteignables pour un coût unitaire inférieur à un montant donné.

Actions et sous-actions		Effet(s)
Diminuer les apports de fertilisants minéraux azotés pour réduire les émissions de N₂O associées		
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 ₂ 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 ₂ O
Stocker du carbone dans le sol et la biomasse		
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 ₂
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 ₂ ↘ N ₂ 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 ₂
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 ₂ ↘ N ₂ O
Modifier la ration des animaux pour réduire les émissions de CH₄ entérique et les émissions de N₂O liées aux effluents		
7	Substituer des glucides par des lipides insaturés et utiliser un additif dans les rations des ruminants pour réduire les émissions de CH ₄ entérique : 7A. Substituer des glucides par des lipides insaturés dans les rations - 7B. Ajouter un additif (nitrate) dans les rations	↘ CH ₄
8	Réduire les apports protéiques dans les rations animales pour limiter les teneurs en azote des effluents et les émissions de N ₂ O associées: 8A. Réduire la teneur en azote des rations des vaches laitières - 8B. Réduire la teneur en azote des rations des porcs	↘ N ₂ O
Valoriser les effluents pour produire de l'énergie et réduire la consommation d'énergie fossile pour réduire les émissions de CH₄ et de CO₂		
9	Développer la méthanisation et installer des torchères, pour réduire les émissions de CH ₄ liées au stockage des effluents d'élevage : 9A. Développer la méthanisation - 9B. Couvrir les fosses de stockage et installer des torchères	↘ CH ₄
10	Réduire, sur l'exploitation, la consommation d'énergie fossile des bâtiments et équipements agricoles pour limiter les émissions directes de CO ₂ : 10A. Pour le chauffage des bâtiments d'élevage - 10B. Pour le chauffage des serres - 10C. Pour les engins agricoles	↘ CO ₂

● Coût et atténuation comparés des sous-actions

Cette représentation graphique permet de décomposer le potentiel d'atténuation global escompté 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 CO₂e 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'effluent 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 privilégiée (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 CO₂e 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 en regard des seuls effets bénéfiques sur l'atténuation des émissions de GES est insuffisante.

● Potentiel d'atténuation global des dix actions

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 dix actions (décomposées en 26 sous-actions) serait de 32,3 Mt CO₂e en 2030, hors émissions induites. Cette estimation ne peut pas être directement comparée aux émissions agricoles françaises de l'inventaire national, qui sont calculées selon d'autres règles. La prise en compte, ou non, des interactions entre actions, ou des émissions induites a également un impact sur les résultats.

● L'incidence du mode de calcul

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 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 *via* des techniques culturales mises en œuvre sans changement d'usage des terres, comme le non-labour ou l'agroforesterie. C'est aussi le cas pour les postes d'émission calculés à partir de valeurs forfaitaires, comme l'émission de méthane entérique par les bovins, ce qui ne permet pas de rendre compte des modifications proposées de leurs rations.

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 (toujours sous hypothèse d'additivité) atteint 10,0 Mt CO₂e par an en 2030, soit moins du tiers de la valeur obtenue avec les modes de calcul proposés par les experts.

● La prise en compte des interactions entre actions

La mise en œuvre d'une (sous-)action est susceptible de modifier le potentiel d'atténuation d'une autre, en raison d'inter-actions. 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 les intrants (les déjections émises sur les prairies lors de l'allongement du pâturage ne sont plus disponibles pour la méthanisation...). L'effet sur le potentiel global d'atténuation de la prise en compte de ces interactions dépend des règles de calcul adoptées, notamment 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 MtCO₂e par an, selon le mode de calcul. Cette réduction assez faible s'explique par le fait que les actions proposées portent sur différentes productions agricoles.

● La prise en compte des émissions induites

La prise en compte des émissions induites en amont ou en aval de l'exploitation, liées à des achats ou à des ventes de produits modifiés par l'action, 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 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.

● Incertitudes et sensibilité des résultats

● 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 N₂O 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.

• Sensibilité des résultats aux hypothèses économiques adoptées

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_{2e}

Conclusion

• Un potentiel d'atténuation important... malgré une estimation prudente

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. Quelques actions sont néanmoins susceptibles d'entraîner des baisses modérées de rendement (non-labour, par exemple). 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 (l'usage d'antibiotiques, par exemple). Parmi les 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 même s'il subsiste des incertitudes importantes sur le potentiel unitaire et/ou l'assiette de la plupart des actions.

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...). Notre approche a privilégié des leviers techniques bien renseignés, socialement acceptables et d'ores et déjà disponibles, au détriment de leviers plus exploratoires.

• La sensibilité au changement climatique et les autres enjeux environnementaux

La plupart des actions et sous-actions proposées ne seraient pas remises en cause par le changement climatique. Le développement des légumineuses, espèces assez sensibles au déficit hydrique et aux épisodes de température élevée, pourrait cependant être freiné. Une réduction de la pluviométrie pourrait aussi limiter l'assiette des actions pouvant engendrer une compétition pour l'eau au détriment de la culture principale ; c'est notamment le cas des cultures intermédiaires et intercalaires, ou de l'agroforesterie.

La plupart des sous-actions proposées, répondant souvent à une logique de sobriété, ont par ailleurs d'autres impacts environnementaux positifs : la réduction de la fertilisation azotée minérale diminue les risques de pollution des eaux, l'implantation d'arbres ou de

évités. 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_{2e} 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, suggère l'existence de freins à l'adoption d'une autre nature (aversion au risque...). Les coûts de transaction privés*, liés à la technicité et à la complexité de mise en œuvre des actions et aux démarches administratives parfois nécessaires pourraient expliquer en partie la non-adoption spontanée.

* 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.

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 labour occasionnel.

• Les principaux leviers

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). Une difficulté est qu'une partie importante de ce potentiel d'atténuation met en jeu des leviers techniques pour lesquels un système de suivi et de vérification est difficile à mettre en œuvre (calcul du bilan azoté avec un objectif de rendement bien ajusté, dates et modalités des apports d'engrais azotés, ajustement des rations azotées en alimentation animale...) rendant difficile la mise en œuvre de mécanismes de soutien financier. 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).

• Les conditions de prise en compte des actions dans l'inventaire national

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 (non-labour, prairies, agroforesterie, cultures intermédiaires...). Avec les méthodes actuelles de calcul, l'inventaire national ne rendrait compte que de 30% environ de l'atténuation globale estimée par les experts. Ce résultat milite pour un effort particulier d'amélioration de l'inventaire français des émissions de GES, effort déjà appuyé par des projets en cours.

La comptabilisation dans l'inventaire national des effets des actions proposées implique de plus que leur mise en œuvre puisse être établie et contrôlable, ou estimable par sondage, ou encore que leur

mise en œuvre soit d'ampleur suffisante pour être détectée indirectement. Les statistiques agricoles annuelles portent principalement sur des effectifs (surfaces par espèce cultivée, cheptels...), avec peu d'informations sur les modes de gestion (pratiques culturales, types d'alimentation...). La mise en place d'un système de suivi et de vérification des actions étudiées est envisageable, mais elle requiert un appareil statistique permettant de rendre compte des effets environnementaux des pratiques agricoles.

• Les suites de l'étude

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 ;
- 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 gaz à effet de serre des produits agricoles par des méthodes d'analyse du cycle de vie (ACV) ;
- L'identification des instruments de politique publique et des mesures incitatives susceptibles de favoriser l'adoption des actions présentant les meilleures propriétés.

Ce travail a mis 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 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. 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

(réassociation 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.

Organisation et principes de l'étude

La maîtrise d'œuvre de cette étude, commanditée par l'ADEME et les ministères chargés de l'agriculture et de l'environnement, a été assurée par la **Délégation à l'expertise scientifique, à la prospective et aux études (DEPE)**, chargée à l'INRA de la conduite des études en appui à la décision publique. Ces exercices sont régis par la charte de l'expertise à l'INRA et un ensemble de principes et procédures, dont la réalisation du travail par un collectif ad hoc d'experts scientifiques, responsable du contenu de l'étude.

Le groupe constitué pour cette étude comportait **22 experts scientifiques**, de l'INRA ou d'autres organismes de recherche ou d'enseignement supérieur, dont deux chercheurs étrangers. Ces experts étaient chargés, dans leur domaine de compétence, de l'analyse de la bibliographie scientifique internationale sur les mécanismes en jeu et les atténuations d'émissions obtenues, ainsi que de la réalisation des estimations quantitatives. Des phases de travail collectif ont été consacrées à la définition d'une méthodologie commune, au choix initial des actions à instruire et à leur analyse comparée finale.

Le **comité de suivi** de l'étude, regroupant ses commanditaires, a été réuni pour l'élaboration du cahier des charges de l'étude, puis périodiquement informé de l'avancement des travaux et consulté sur leur adéquation à la commande.

Par ailleurs, un **comité technique** composé d'une dizaine d'experts de terrain (ADEME, instituts techniques, APCA, InVivo) a été constitué : il a été consulté sur le choix d'actions proposé par le groupe d'experts scientifiques, et sollicité pour fournir des données techniques concernant ces actions, en discuter la pertinence et la faisabilité.

Pour en savoir plus :

Pellerin S., Bamière L., Angers D., Béline F., Benoît M., Butaut 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.

Le rapport complet de l'étude, le document de synthèse et le présent résumé sont disponibles sur le site de l'INRA.



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

