

Partie III

Analyse comparée et conclusion

Auteurs

Sylvain Pellerin (INRA-EA)

Laure Bamière (INRA-SAE2)

Appui scientifique interne

Denis Angers (Agriculture et Agroalimentaire Canada)

Stéphane De Cara (INRA-SAE2)

Pierre Dupraz (INRA-SAE2)

Extraction et traitement de données

Lénaïc Pardon (INRA-DEPE)

Elisabeth Samson (INRA-SAE2)

Relecteur interne

Isabelle Savini (INRA-DEPE)

Relecteur scientifique externe

Frédéric Roy-Vigneault (Agriculture et Agroalimentaire Canada)

4. Analyse comparée des dix actions proposées

4.1. 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 CO_{2e} 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 UTCF), qui se sont élevées à 105 Mt CO_{2e} (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"¹ 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 CO_{2e} 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

¹ 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).

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 les fiches concernées dans la partie II du rapport. Au final, en tenant compte des interactions intra-actions, le potentiel d'atténuation total diminue de 32,3 Mt CO_{2e} par an à 31,5 Mt CO_{2e} 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 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.

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. Enfouir 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 et 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)

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 MtCO₂e 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 MtCO₂e. Les détails des calculs sont fournis en annexe 1.

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.

4.2. 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, 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.

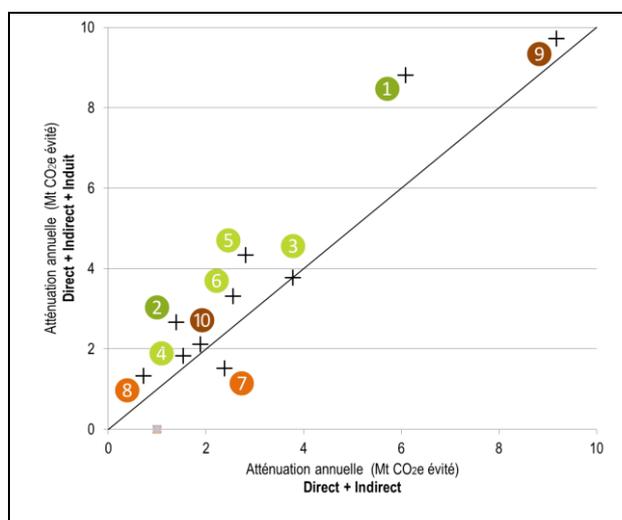


Figure 1. Atténuation annuelle totale par action incluant les émissions induites en fonction de l'atténuation hors émissions induites (en Mt CO₂e par an, calcul pour l'année 2030, mode de calcul proposé par les experts)

- | | |
|----------------------------|------------------------------|
| ① Fertilisation | ⑥ Gestion des prairies |
| ② Légumineuses | ⑦ Lipides et additifs |
| ③ Labour 1 an sur 5 | ⑧ Alimentation protéique |
| ④ Implantation de couverts | ⑨ Méthanisation et torchères |
| ⑤ Agroforesterie et haies | ⑩ Economies d'énergie |

4.3. 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 "facultatifs", 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.

4.4. Prise en compte des coûts de transaction privés

Les coûts de transaction privés (CTP) correspondent, par exemple, 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 unité d'assiette pour les sous-actions adossées à des mesures agro-environnementales existantes, pour lesquelles le modèle de calcul utilisé (cf. section 3.3.2) a été validé². Ces valeurs estimées 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. D'autre part, nous avons indiqué les CTP moyens pour l'ensemble des exploitations concernées, mais ils peuvent varier fortement selon les caractéristiques des exploitations³.

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. En effet, la formule très simplifiée de calcul ne rend compte que de deux dimensions génériques de la variabilité des coûts de transaction : la formation de l'agriculteur et la taille de l'activité de production concernée par l'action. La littérature empirique a mis en évidence bien d'autres déterminants comme la complexité technique de l'action considérée et le dispositif d'accompagnement des agriculteurs s'engageant dans de telles actions.

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)

² Les CTP des autres actions sont fournis en annexe 2 mais ne sont pas exploitables, la formule étant utilisée en dehors de son domaine de validité.

³ Les valeurs min et max des CTP sont fournies en annexe 2.

4.5. 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.

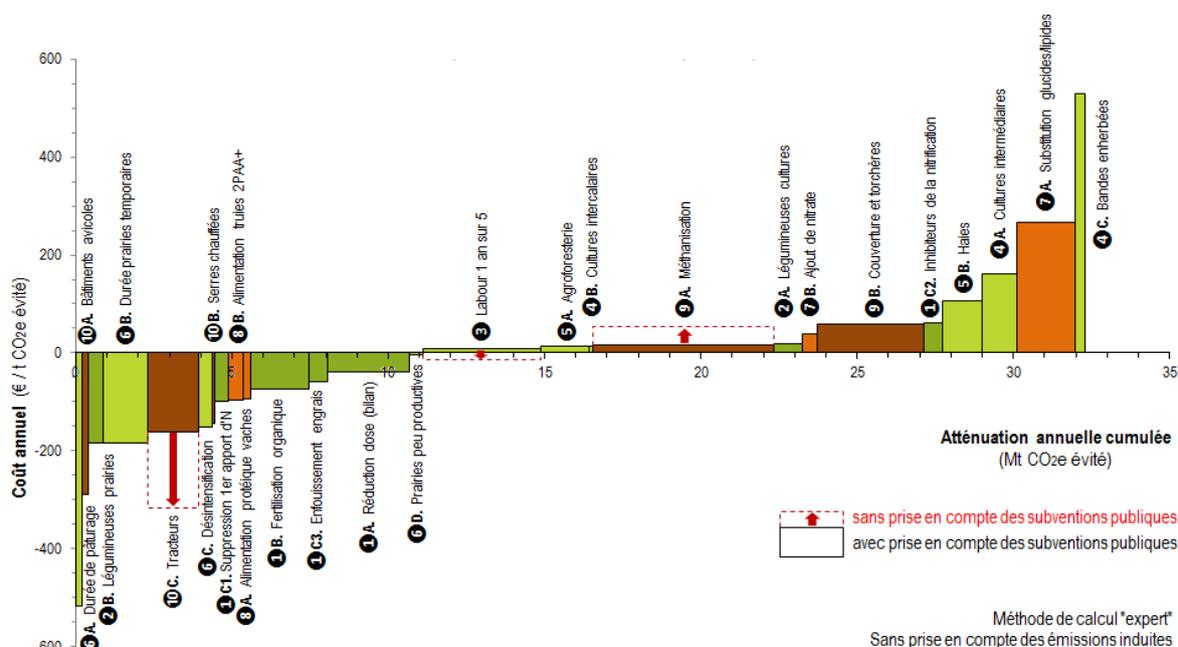


Figure 2. Coût (en euros par tonne de CO₂e évité) et potentiel d'atténuation annuelle en 2030 à l'échelle du territoire métropolitain (en Mt de CO₂e évité par an) des sous-actions instruites

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 et sous-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 CO₂e par an, comme indiqué précédemment. La gamme des coûts par sous-action varie de -500 à + 500 € par tonne de CO₂e 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 4.2). En plus de la maîtrise de l'azote, l'autre levier de réduction des émissions de GES à coût négatif 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 CO_{2e} par an pour un coût variant entre 8 et 56 € par tonne de CO_{2e} 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 4.3).

- 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 CO_{2e} par an en 2030, avec un coût de 220 € par tonne de CO_{2e} 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 CO_{2e} évité) et potentiel d'atténuation annuel en 2030 à l'échelle du territoire métropolitain (en Mt de CO_{2e} 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.

4.6. 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 Partie I) 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 sont dans ce cas très majoritairement 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 tCO_{2e}) 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). 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 anti-méthanogènes, 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 relativement "prudente", 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 mieux 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.

4.7. 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 chiffrages 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 épandue...). 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.).

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 physicochimiques 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.

• 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.

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)

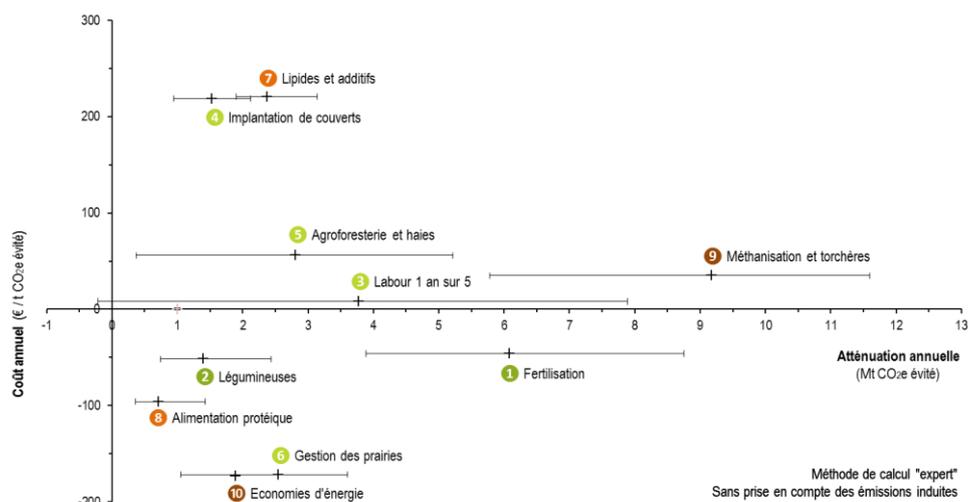


Figure 4. Marges d'incertitudes sur les potentiels d'atténuation annuels des actions en 2030 (valeurs basses, moyennes, hautes)

5. 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 GAS2⁴...).

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 production⁵. 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 liée 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 exemple) 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 exemple) 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 exemple). 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-

⁴ Projet visant à mettre au point une méthode "tier 2" pour le calcul des émissions de N₂O par les sols agricoles

⁵ La perte de production, en valeur, a été estimée à 2% pour les grandes cultures à l'échelle métropolitaine. Les détails sont fournis en annexe 3.

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 exemple). 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 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 exemple).

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 exemple). 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 exemple), 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.

Références bibliographiques citées

- Bellarby, J., Tirado R., Adrian Leip, Franz Weiss, Jan Peter Lesschen, Pete Smith (2012) Livestock greenhouse gas emissions and mitigation potential in Europe , *Global Change Biology* DOI: 10.1111/j.1365-2486.2012.02786.x
- CITEPA, édition de mars 2012, 'Inventaire des émissions de gaz à effet de serre en France au titre de la Convention Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques', CITEPA - Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable, Paris, France. 1364 p.
- 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
- Mc Kinsey & Co (2009), 'Pathways to a low-carbon economy.', Technical report, McKinsey & Co., 192 pp.
- Moran et al (2008) UK marginal cost curves for the agriculture, forestry, land-use and land-use change sector out to 2022 and to provide scenario analysis for possible abatement options out to 2050 – RMP4950 Report to The Committee on Climate Change & Defra
- Dominic M., Michael MacLeod., Eileen W., · Vera E., · Alistair McVittie, · Andrew B., · R. M. Rees, · Cairistiona F. E. Topp, · Guillaume Pajot, · Robin Matthews, · Pete Smith, · Andrew Moxey. (2010) Developing carbon budgets for UK agriculture, land-use, land-use change and forestry out to 2022. *Climatic Change*
- Schulte, R. and Donnellan T. (2012) A marginal abatement cost curve for Irish agriculture, Teagasc submission to the National Climate Policy Development Consultation, Teagasc, Oakpark, Carlow, Ireland, march 2012

Annexe 1. Calcul des interactions entre les actions

Méthode de calcul "intégrée"

Nous calculons un nouvel assolement de référence pour la France métropolitaine en procédant en 2 étapes :

- Etape 1 : Nous introduisons les légumineuses dans la sole en grande culture selon le scénario central retenu dans la fiche, et nous calculons l'assolement national intermédiaire (Bilan 1).
- Etape 2 : Nous introduisons en même temps les bandes enherbées, l'agroforesterie et les haies, en appliquant les pourcentages retenus par les experts pour le calcul des assiettes à notre assolement intermédiaire (Bilan 1) :
 - Bandes enherbées : environ 0,73% et 1,53% des surfaces des cultures et prairies concernées, respectivement.
 - Agroforesterie : 5% d'arbres sur les 7% des surfaces en cultures concernées, le tout sur les 28% et 20% des sols compatibles en cultures et prairies respectivement.
 - Haies : 1,2% et 2% de haies sur les 15% de cultures et prairies concernées respectivement, le tout sur environ 55% de sols compatibles.
- Bilan 2 : en ôtant ces surfaces en herbe, arbres et haies de l'assolement bilan 1, nous obtenons le nouvel assolement de référence pour la France (cf. Tableau A1).

Ensuite nous recalculons l'assiette des différentes actions à partir de ce nouvel assolement de référence (cf. Tableau A2), puis nous appliquons les potentiels d'atténuation unitaires des différentes actions, en faisant certaines hypothèses :

- Agroforesterie, Haies, Bandes enherbées et Cultures intercalaires : nous reprenons les surfaces et atténuations d'origine, car toutes ces sous-actions peuvent être mises en œuvre simultanément sans concurrence sur l'assolement, leurs assiettes étant faibles ou indépendantes.
- Durée du pâturage et Durée des prairies temporaires (PT) : on applique les ratios de prairies concernées aux surfaces du nouvel assolement, puis l'atténuation unitaire. L'augmentation du pâturage jouant sur la ration des vaches au printemps, elle n'interagit pas avec l'alimentation protéique des bovins qui touche la ration hivernale. Quant à l'augmentation de la durée de vie des PT, elle ne modifie pas à priori la composition des prairies, donc des rations de référence des bovins.
- Désintensification des prairies : nous supprimons cette sous-action car elle a le même type d'effet que l'introduction des légumineuses dans les prairies (diminution de la fertilisation azotée minérale), qui est, elle, plus efficace en termes d'atténuation.
- Intensification des prairies peu productives : nous conservons l'assiette et l'atténuation d'origine.
- Méthanisation et torchères : nous faisons l'hypothèse que l'allongement du pâturage diminue d'environ 5% la quantité d'effluents disponibles et donc d'autant le potentiel d'atténuation de l'action.
- Non-labour : l'action est mise en œuvre sur 75% des surfaces des cultures concernées (-50% en plus pour le maïs), mais pas sur le pois. Puis nous appliquons l'atténuation unitaire du scénario 2.
- Cultures intermédiaires : nous enlevons les surfaces en arbres et haies des cultures concernées et l'atténuation correspondante. Il n'est pas possible de recalculer les successions de cultures permettant l'implantation des CI et l'un dans l'autre le pois et l'orge se compensent. D'autre part l'agroforesterie et les CI sont compatibles car l'effet azote n'a pas été pris en compte dans la sous-action AF. Enfin, la majeure partie des CI étant labourées, nous faisons l'hypothèse que le non-labour et les CI peuvent être mises en œuvres simultanément en détruisant les CI par voie chimique.
- Légumineuses sur prairies : l'atténuation unitaire est appliquée aux surfaces en prairies temporaires concernées (environ 90% des PT) restant après avoir enlevé arbres, haies et BE.
- Légumineuses sur cultures : atténuation unitaire appliquée aux surfaces en protéagineux introduites restant après avoir enlevé arbres, haies et BE.
- Alimentation protéique, Lipides et additifs : telles que les actions ont été conçues, il n'y a pas d'interactions avec d'autres actions, notamment sur les rations. On a fait l'hypothèse que les lipides supplémentaires étaient achetés sur les marchés extérieurs si nécessaire, et donc ne modifiaient pas l'assolement français. Par conséquent on reporte le potentiel d'atténuation tel que calculé dans la fiche.
- Economies d'énergie : nous faisons l'hypothèse (forte) que le Non-labour ne diminuera pas le nombre de tracteurs, et nous reportons le potentiel d'atténuation tenant compte des interactions intra-action, tel que calculé dans la fiche.
- Fertilisation : nous appliquons les atténuations unitaires, tenant compte des interactions entre les sous-actions, de chaque sous-action aux surfaces fertilisées concernées.

Les nouveaux potentiels d'atténuation pour l'année 2030 sont regroupés dans le Tableau A3, dans la colonne Méthode "intégrée".

	Nouvel assolement de référence	Prairie "Durée pâturage"	Prairie "Durée PT"	Prairie "Intensification"	Non-Labour	Légumineuses sur prairie	Légumineuses sur cultures	Fertilisation Réduction de la dose	Fertilisation organique	Fertilisation Date apport	Fertilisation Inhibiteur	Fertilisation Localisation
Productions végétales	ha	ha	ha	ha	ha	ha	ha	ha	ha	ha	ha	ha
Céréales	8 445 620											
Total blé tendre	4 732 547							4 637 896	4 637 896		927 579	
Blé tendre d'hiver	4 691 483				3 518 612					1 471 249		
Blé tendre de printemps	41 064				30 798							40 243
Total blé dur	498 236							488 271	488 271		97 654	
Blé dur d'hiver	485 614				364 211					152 289		
Blé dur de printemps	12 621				9 466							12 369
Maïs grain	1 583 641				593 866			1 520 296	1 520 296		304 059	1 520 296
Total orge et escourgeon	978 447							958 878	958 878			
Orge de printemps	261 955				196 466							256 716
Orge d'hiver et escourgeon	716 492				537 369					63 195		
Riz	22 521											
Autres céréales non mélangées	630 228											
<i>Pommes de terre</i>	153 210							151 678	151 678		30 336	151 678
Betteraves industrielles	379 241								360 279		72 056	360 279
Protéagineux	1 263 337						869 837					
Féveroles et fèves	481 392											
Pois protéagineux	761 802											
Lupin doux	20 143											
Oléagineux	2 070 464				1 552 848							
Colza et navette	1 305 337							1 279 230	1 279 230		255 846	
Colza d'hiver (et navette)	1 301 029									12 750		
Colza de printemps (et navette)	4 308											
Tournesol	688 633							482 043	482 043			
Soja	49 730											
Autres oléagineux	26 764											
Plantes textiles	56 403				42 302							
Autres cultures industrielles	19 520				14 640							
Légumes secs	13 521											
Choux fourragers	11 187				8 390							
Maïs fourrage et ensilage (plante entière)	1 390 204				1 042 653			1 237 282	1 237 282		247 456	1 237 282
Autres fourrages annuels	233 373				175 030							
Prairies temporaires dont luzerne pour déshydratation	3 088 387 84 586	1 001 564	2 312 798			2 773 371						
Prairies naturelles ou semées depuis + de 6 ans STH peu productives (parcours, landes, alpages)	6 545 768 2 392 093	2 122 792		478 419								
Surfaces toujours en herbe	8 937 861											
Jachères	643 497				466 688							
Cultures fruitières	173 040											
Vignes	804 060											
Autres cultures permanentes	25 387											
TOTAL	26 062 327											
ha de BE, arbres, haies	297 617											
Atténuation unitaire (MgCO₂/unité)		0,050	0,612	0,942	0,400	0,170	1,041	0,221	0,127	0,164	0,174	0,136
Atténuation 2030 (millions MgCO_{2e})		0,155	1,414	0,450	3,421	0,471	0,905	2,381	1,409	0,279	0,337	0,485

Tableau A1. Assiettes et atténuations recalculées pour certaines sous-actions, dans le cadre du calcul des interactions entre actions avec la méthode "intégrée"

		Etape 1	Bilan 1	Etape 2			Bilan 2
		Introduction des légumineuses sur cultures		Introduction des bandes enherbées	Introduction de l'agroforesterie	Introduction des haies	Nouvel assolement de référence
Productions végétales SAA	Superficie en hectares	ha	ha	ha d'herbe	ha d'arbres	ha de haies	ha
Céréales	9 255 630	-731 512	8 524 118	-61 673	-8 415	-8 410	8 445 620
Total blé tendre	4 922 954	-146 302	4 776 652	-34 651	-4 728	-4 725	4 732 547
Blé tendre d'hiver	4 880 238	-145 033	4 735 205	-34 351	-4 687	-4 684	4 691 483
Blé tendre de printemps	42 716	-1 269	41 447	-301	-41	-41	41 064
Total blé dur	502 879		502 879	-3 648	-498	-497	498 236
Blé dur d'hiver	490 140		490 140	-3 556	-485	-485	485 614
Blé dur de printemps	12 739		12 739	-92	-13	-13	12 621
Maïs grain	1 598 400		1 598 400	-11 595	-1 582	-1 581	1 583 641
Total orge et escourgeon	1 572 775	-585 209	987 566	-7 164	-978	-977	978 447
Orge de printemps	421 072	-156 675	264 397	-1 918	-262	-262	261 955
Orge d'hiver et escourgeon	1 151 703	-428 534	723 169	-5 246	-716	-715	716 492
Riz	22 521		22 521				22 521
Autres céréales non mélangées	636 101		636 101	-4 614	-630	-629	630 228
<i>Pommes de terre</i>	<i>154 638</i>		<i>154 638</i>	-1 122	-153	-153	<i>153 210</i>
Betteraves industrielles	382 775		382 775	-2 777	-379	-379	379 241
Protéagineux	397 109	877 814	1 274 923	-9 103	-1 242	-1 241	1 263 337
Féveroles et fèves	151 340	334 539	485 879	-3 525	-481	-481	481 392
Pois protéagineux	239 495	529 406	768 901	-5 578	-761	-761	761 802
Lupin doux	6 274	13 869	20 143				20 143
Oléagineux	2 235 598	-146 302	2 089 296	-14 796	-2 019	-2 018	2 070 464
Colza et navette	1 463 804	-146 302	1 317 502	-9 558	-1 304	-1 303	1 305 337
Colza d'hiver (et navette)	1 458 973	-145 819	1 313 154	-9 526	-1 300	-1 299	1 301 029
Colza de printemps (et navette)	4 831	-483	4 348	-32	-4	-4	4 308
Tournesol	695 051		695 051	-5 042	-688	-688	688 633
Soja	49 730		49 730				49 730
Autres oléagineux	27 013		27 013	-196	-27	-27	26 764
Plantes textiles	56 403		56 403				56 403
Autres cultures industrielles	19 520		19 520				19 520
Légumes secs	13 521		13 521				13 521
Choux fourragers	11 187		11 187				11 187
Maïs fourrage et ensilage (plante entière)	1 403 160		1 403 160	-10 179	-1 389	-1 388	1 390 204
Autres fourrages annuels	233 373		233 373				233 373
Prairies temporaires dont luzerne pour déshydratation	3 143 134 84 586		3 143 134 84 586	-48 165	-2 218	-4 364	3 088 387 84 586
Prairies naturelles ou semées depuis plus de 6 ans	6 661 803		6 661 803	-102 085	-4 701	-9 250	6 545 768
STH peu productives (parcours, landes, alpages)	2 392 093		2 392 093				2 392 093
Surfaces toujours en herbe	9 053 896		9 053 896	-102 085	-4 701	-9 250	8 937 861
Jachères	643 497		643 497				643 497
Cultures fruitières	173 040		173 040				173 040
Pommes de table			0				-
Autre fruits			0				-
Vignes	804 060		804 060				804 060
Autres cultures permanentes	25 387		25 387				25 387
TOTAL	26 359 944		26 359 944				26 062 327
ha de BE, arbres, haies				-249 899	-20 515	-27 203	26 359 944

Tableau A2. Calcul du nouvel assolement de référence dans le cadre du calcul "intégré" des interactions entre actions.

Méthode de calcul "coûts croissants"

Dans ce cas nous avons d'abord trié les actions par coût d'atténuation croissant. Nous avons fait l'hypothèse qu'elles étaient appliquées successivement. Pour chaque nouvelle action mise en œuvre, nous regardons s'il existe des interactions avec les précédentes (par ex. au niveau des assiettes). Si oui, nous faisons l'hypothèse simpliste qu'elle ne peut pas être mise en œuvre :

- Les actions Economies d'énergie, Gestion des prairies et Alimentation Protéiques sont les 3 premières mises en œuvre et n'interagissent pas, on reporte donc leur potentiel d'atténuation d'origine.
- Légumineuses : la sous-action Légumineuses sur cultures a la même assiette que l'action Fertilisation déjà mise en œuvre, la sous-action Légumineuses sur prairies a une partie de son assiette commune avec la sous-action Prairies-Désintensification. Nous ne retenons que l'atténuation supplémentaire par rapport à "désintensifier les prairies".
- Le Labour 1 an sur 5 est compatible avec les actions précédemment retenues.
- Méthanisation et Torchères : on diminue le potentiel d'atténuation de 5% à cause de l'allongement de la durée du pâturage qui diminue la quantité d'effluents disponibles.
- Agroforesterie et Haies : toutes les cultures de l'assiette sont concernées par certaines des actions précédentes, donc on ne met pas en œuvre cette action.
- Implantation de couverts : Les bandes enherbées ont une assiette commune avec les actions précédentes, donc on les élimine. Les cultures intermédiaires ne sont pas toutes compatibles avec le Non-labour car elles sont majoritairement retournées, mais on les conserve en les broyant à la place. Enfin les cultures intercalaires n'interagissent pas avec les autres actions, donc on les conserve.
- Lipides et additifs : pas d'interaction, on reporte leur potentiel d'origine.

Les potentiels d'atténuation pour l'année 2030, recalculés en tenant compte de ces interactions, sont reportés dans le Tableau A3.

Méthode de calcul "potentiels décroissants"

Dans ce cas nous avons d'abord trié les actions par potentiel d'atténuation décroissant. Nous avons là encore fait l'hypothèse qu'elles étaient appliquées successivement. Pour chaque nouvelle action mise en œuvre, nous regardons s'il existe des interactions avec les précédentes (ex au niveau des assiettes). Si oui, nous faisons l'hypothèse simpliste qu'elle ne peut pas être mise en œuvre :

- Les actions Méthanisation et Torchères, Fertilisation et Non-Labour sont les 3 premières mises en œuvre et n'interagissent pas, on reporte donc leur potentiel d'atténuation d'origine.
- Agroforesterie et Haies : on conserve l'atténuation des cultures non concernées par le Non-Labour.
- Gestion des Prairies : l'action Agroforesterie et haies ne concernant que peu de surfaces en prairies, il est possible de mettre en œuvre les 2 actions sans interactions.
- Les actions Lipides et additifs et Economies d'énergie sont ensuite mises en œuvre sans interactions.
- Implantation de couverts : Les bandes enherbées ont une assiette commune avec les actions précédentes, donc on les élimine. Les cultures intermédiaires sont conservées à condition de les détruire en les broyant et d'enlever les surfaces en arbres et haies. Enfin les cultures intercalaires n'interagissent pas avec les autres actions, donc on les conserve.
- Légumineuses : la sous-action Légumineuses sur cultures a la même assiette que l'action Fertilisation déjà mise en œuvre, la sous-action Légumineuses sur prairies a une partie de son assiette commune avec la sous-action Prairies-Désintensification. Nous ne retenons que l'atténuation supplémentaire par rapport à "désintensifier les prairies".
- Alimentation protéique : pas d'interactions, on reporte le potentiel d'origine.

Les potentiels d'atténuation pour l'année 2030, recalculés en tenant compte de ces interactions, sont reportés dans le Tableau A3.

	Atténuation 2030 en tenant compte des interactions (millions MgCO ₂ e)		
	Méthode "Intégrée"	Méthode "Coûts croissants"	Méthode "Potentiels décroissants"
Fertilisation	4,891	5,303	5,303
Légumineuses	1,377	0,019	0,019
Labour 1 an sur 5	3,421	3,833	3,833
Implantation de couverts	1,542	1,256	1,253
Agroforesterie et haies	2,782	0,000	1,358
Gestion des prairies	2,020	2,548	2,548
Lipides et additifs	2,374	2,374	2,374
Alimentation protéique	0,719	0,719	0,719
Méthanisation et torchères	8,721	8,721	9,180
Economies d'énergie	1,794	1,794	1,794
Total	29,642	26,568	28,383

Tableau A3. Potentiel d'atténuation de l'ensemble des actions pour l'année 2030 quand les interactions au sein de et entre les actions sont prises en compte, selon 3 méthodes différentes.

Annexe 2. Prise en compte des CTP

Action	Sous-action	Unité	Coût de la sous-action hors CTP	CTP moyen	Coût de la sous-action avec CTP	CTP min	CTP max
Fertilisation	Réduction de la dose par ajustement de l'objectif de rendement	€/ha/an	-8,7	17,8	9,1	0,2	133,9
	Fertilisation organique	€/ha/an	-11,6	17,7	6,1	0,2	133,9
	Date d'apport de l'azote	€/ha/an	-22,7	18,6	-4,1	0,2	30,1
	<i>Inhibiteurs de la nitrification</i>	€/ha/an	15,8	18,2	34	0,2	133,9
	Localisation des apports d'engrais	€/ha/an	-9,1	18,6	9,5	0,2	133,9
Légumineuses	Légumineuses en grandes cultures	€/ha/an	19,4	25,3	44,6	0,2	36,2
	Légumineuses en prairies	€/ha/an	-31,4	38,9	7,5	0,4	152,0
Non-labour		€/ha/an	3	17,3	20,3	0,2	133,9
Implantation de couverts	Cultures intermédiaires (en zone non vulnérable)	€/ha/an	40,9	15,8	56,7	0,2	133,9
	Cultures intercalaires	€/ha/an	9,6	72,3	81,9	0,2	627,3
	Bandes enherbées	€/ha/an	633,4	négligeable	633,4		
Agroforesterie et haies	<i>Agroforesterie 7%</i>	€/ha/an	51	151,6	202,6	2,6	3038,1
	<i>Haies 15%</i>	€/ha/an	75,0	6,9	81,9	0,1	137,6
Gestion des prairies	Durée de pâturage	€/ha/an	-25,5	8,5	-17	0,4	137,6
	<i>Durée prairies temporaires</i>	€/ha/an	-112,4	34,9	-77,5	0,4	136,3
	<i>Désintensification</i>	€/ha/an	-7,8	64,2	56,4	2,2	344,0
	Intensification	€/ha/an	-4	18,5	14,5	3,9	74,7
Lipides et additifs	<i>Substitution glucides /lipides</i>	€/tête/an	27	4,8	31,8	0,1	131,1
	<i>Ajout de nitrates</i>	€/tête/an	10,5	6,0	16,5	0,2	127,5
Alimentation protéique	<i>Alimentation des vaches laitières</i>	€/tête/an	-49,2	6,5	-42,6	0,3	10,6
	<i>Alimentation des truies 2PAA+</i>	€/tête/an	-11,6	3,8	-7,8	0,1	129,7
Méthanisation et torchères	<i>Méthanisation</i>	€/UGB/an	0,0	1,1	0,0	0,1	2,0
	<i>Couverture et torchères</i>	€/UGB/an	0,0	1,1	0,0	0,1	2,0
Economies d'énergie	<i>Tracteurs</i>	€/tracteur/an	-410	76,8	-333,2	27,2	95,2
	<i>Bâtiments avicoles</i>	€/kg poids vif/an	-0,032	0,002	-0,030		
	<i>Serres chauffées</i>	€/ha/an	-229,1	67,8	-161,3	1,1	104,5

Tableau A4. Coûts (en €/unité/an), avec ou sans prise en compte des coûts de transaction privés CTP, de l'ensemble des sous-actions (un coût positif représente un coût pour l'agriculteur, un coût négatif un gain).

Les sous-actions pour lesquelles la formule est utilisée hors de son domaine de validation sont représentées en italique.

Annexe 3. Estimation des pertes de production liées à la mise en œuvre de l'ensemble des actions

Un des critères de sélection des actions était qu'elles ne devaient pas remettre en cause les systèmes ni générer une variation de production supérieure à 10%. Nous avons donc estimé cette variation de production, suite à la mise en œuvre de l'ensemble des 10 actions instruites.

Pour ce faire, nous avons comparé les niveaux production initiaux et finaux en euros, pour tout ramener à unité commune, pour les céréales, oléagineux, protéagineux, betteraves et pommes de terres. Nous nous sommes limités à ces groupes de cultures car ce sont les seuls pour lesquels nous avons un rendement et un prix dans le RICA 2010, qui est notre référence pour ces paramètres.

Pour calculer la production initiale, nous avons multiplié les surfaces de la SAA 2010 par les rendements et les prix du RICA 2010, puis sommé les productions obtenues.

Pour calculer la production finale, nous sommes repartis du nouvel assolement de référence estimé avec la méthode "intégrée" de calcul des interactions entre actions. Nous avons ensuite tenu compte i) de l'augmentation du rendement moyen du blé engendrée par l'introduction des légumineuses ; ii) de la baisse de production générée par le labour 1 an sur 5 (-0.8% de rendement sur les sols et cultures concernées en moyenne) ; iii) de la baisse de production générée par l'implantation des arbres sur les parcelles en agroforesterie (-20% de rendement sur les surfaces concernées). Nous avons ensuite multiplié le nouvel assolement par les rendements corrigés puis par les prix du RICA, et nous avons sommé les productions obtenues.

Au final, nous obtenons une variation de produit de 327 millions d'euros, soit une baisse de la production de 2% en valeur.

Les calculs sont récapitulés dans le Tableau A5.

	Références		Avant la mise en œuvre des actions			Après la mise en œuvre "intégrée" des actions						
	Rendements	Prix	Assolement initial	Volume	Produit	Nouvel assolement	Nouveaux rendements de référence	Nouveaux volumes de référence	Baisses de volume		Volume Final	Produit Final
	RICA 2010	RICA 2010	SAA 2010	RICA 2010	RICA 2010	"Bilan 2"	Effet Légumineuses		Effet Non-Labour (-0,8% sur 75% des sols compatibles)	Effet Agroforesterie (-20% sur les 7% de surfaces en AF implantées sur les 28% de sols compatibles.)	tonnes	€
Productions végétales SAA	100 kg/ha	€/100 kg	ha	Tonnes	€	ha	100 kg/ha	tonnes			tonnes	€
Céréales			9 255 630	65 220 819	11 533 674 115	8 445 620		60 744 591	111 579	240 338	60 392 673	10 782 435 548
Total blé tendre	72,7	17,6	4 922 954	35 783 208	6 295 123 469	4 732 547	74,4	35 186 539		139 217	35 047 322	6 165 663 491
Blé tendre d'hiver			4 880 238			4 691 483		-				
Blé tendre de printemps			42 716			41 064		-				
Total blé dur	52,3	21,3	502 879	2 628 041	559 263 956	498 236	52,3	2 603 775	15 623	10 302	2 577 850	548 583 136
Blé dur d'hiver			490 140			485 614		-				
Blé dur de printemps			12 739			12 621		-				
Maïs grain	87,9	19,1	1 598 400	14 052 813	2 687 532 313	1 583 641	87,9	13 923 058	41 769	55 087	13 826 201	2 644 193 990
Total orge et escourgeon	62,2	14,8	1 572 775	9 786 344	1 451 366 048	978 447	62,2	6 088 233	36 529	24 088	6 027 616	893 926 934
Orge de printemps	59,4	16,3	421 072	2 503 216	407 275 903	261 955	59,4	1 557 289	9 344	6 161	1 541 783	250 849 811
Orge d'hiver et escourgeon	63,3	14,2	1 151 703	7 293 248	1 036 476 862	716 492	63,3	4 537 240	27 223	17 952	4 492 065	638 387 942
Riz			22 521			22 521		-	0			
Autres céréales non mélangées	46,7	18,2	636 101	2 970 413	540 388 329	630 228	46,7	2 942 986	17 658	11 644	2 913 684	530 067 996
Pommes de terre	404,3	16,9	154 638	6 252 596	1 056 425 255	153 210	404,3	6 194 863		24 510	6 170 353	1 042 529 678
Betteraves industrielles	839,2	2,7	382 775	32 120 750	867 817 583	379 241	839,2	31 824 167		125 913	31 698 253	856 402 836
Protéagineux			397 109	1 610 078	308 045 605	1 263 337		5 121 443		20 263	5 101 180	975 975 311
Féveroles et fèves	38,4	19,1	151 340	580 598	111 119 642	481 392	38,4	1 846 805		7 307	1 839 498	352 058 348
Pois protéagineux	43,0	19,1	239 495	1 029 480	196 925 964	761 802	43,0	3 274 639		12 956	3 261 682	623 916 964
Lupin doux			6 274			20 143		-				
Oléagineux			2 235 598	6 468 724	2 435 342 721	2 070 464		5 936 773	35 621	23 489	5 877 663	2 216 879 502
Colza et navette	32,6	36,8	1 463 804	4 768 783	1 753 945 334	1 305 337	32,6	4 252 528	25 515	16 825	4 210 187	1 548 495 438
Colza d'hiver (et navette)			1 458 973			1 301 029		-				
Colza de printemps (et navette)			4 831			4 308		-				
Tournesol	23,6	40,0	695 051	1 640 273	656 134 371	688 633	23,6	1 625 128	9 751	6 430	1 608 947	643 603 521
Soja			49 730			49 730		-				
Autres oléagineux	22,1	42,3	27 013	59 668	25 263 015	26 764	22,1	59 117	355	234	58 529	24 780 542
Total (CER+PROT+OLEA+BETT+PDT)			12 425 750	111 672 967	16 201 305 279	12 311 871		109 821 837			109 240 123	15 874 222 876

Tableau A5. Calcul de la baisse de production (en euros) engendrée par la mise en œuvre "intégrée" de l'ensemble des actions.

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 Favardin	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