



HAL
open science

Atténuer les émissions de gaz à effet de serre dans le secteur agricole

Nosra Ben Fradj, Laure Bamière

► **To cite this version:**

Nosra Ben Fradj, Laure Bamière. Atténuer les émissions de gaz à effet de serre dans le secteur agricole : Quels leviers, potentiels techniques, coûts et dispositifs d'accompagnement en région?. [Contrat] 011472, INRAE. 2021. hal-03788832

HAL Id: hal-03788832

<https://hal.inrae.fr/hal-03788832>

Submitted on 27 Sep 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



ILS L'ONT FAIT

Atténuer les émissions de gaz à effet de serre dans le secteur agricole :

Quels leviers, potentiels
techniques, coûts et dispositifs
d'accompagnement en région

1. Introduction

Le secteur agricole français peut contribuer à la réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES) et au stockage de carbone dans les sols via certaines pratiques agricoles. Ces pratiques ont été identifiées et analysées dans le cadre de deux études nationales et d'un projet de recherche, afin de promouvoir les pratiques « atténuantes » et/ou « stockantes ».

Il s'agit d'une part de l'étude « GES » « Quelle contribution de l'agriculture française à la réduction des émissions de gaz à effet de serre ? » et du projet BANCO « Analyse des freins et des mesures de déploiement des actions d'atténuation "à coût négatif" dans le secteur agricole », qui ont quantifié le potentiel et le coût d'atténuation de dix grandes pratiques au niveau national, puis régional ; et d'autre part de l'étude « 4pour1000 France », qui a estimé le potentiel et le coût du stockage additionnel de carbone dans le sol de 10 pratiques aux échelles nationale et régionale.

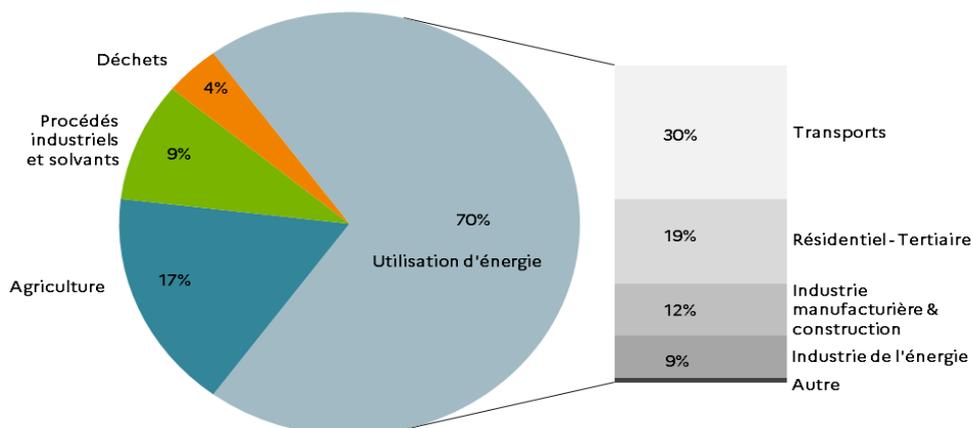
2. Le contexte national

L'accord de Paris de 2015, adopté par 196 parties dont la France, a pour objectif de limiter l'augmentation de la température moyenne à un niveau inférieur à 2°C par rapport à la période préindustrielle. Pour répondre à cet objectif, la Stratégie Nationale Bas Carbone (SNBC) de la France vise l'atteinte de la neutralité de carbone à l'horizon de 2050 par la mise en œuvre d'actions d'atténuation dans tous les secteurs.

Afin d'aider les acteurs régionaux dans la priorisation de leurs efforts en matière d'action d'atténuation en agriculture, l'ADEME a souhaité élaborer avec l'appui d'INRAE, 13 fiches régionales valorisant les résultats du projet « BANCO » et de l'étude « 4pour1000 ». Chacune des fiches souligne les enjeux régionaux en matière d'atténuation du changement climatique par le secteur agricole, en prenant soin d'identifier les actions permettant, à moindre coût, d'atténuer les émissions GES et de stocker du carbone dans les sols et la biomasse ligneuse. Les dispositifs d'accompagnement des actions clés y sont aussi indiqués.

Cette fiche présente l'ensemble des fiches régionales, leur contenu ainsi que les précautions d'usage des résultats présentés dans les fiches, notamment en indiquant les différences méthodologiques entre les deux sources d'information « BANCO » et « 4pour1000 France ».

Étant donné son poids dans les émissions nationales (17 % des émissions de GES nationales en 2018 (Figure ci-après), soit 75 Mt CO₂eq.) et compte tenu de ses différents leviers d'action pour lutter contre le changement climatique, l'agriculture française a un rôle primordial à jouer en matière d'atténuation. En effet, trois leviers d'atténuation des émissions agricoles ont été identifiés pour le secteur, à savoir : 1- la diminution



Note : Répartition des GES par sources d'émissions hors Utcatf
Champ : France métropolitaine et outre-mer de l'UE.
Source de données : Citepa, Inventaire format CCNUCC KP, 2020 ; SDES 2021.
Source de l'infographie : Portail public de l'information environnementale www.notre-environnement.gouv.fr, juin 2021.

Figure – Répartition des sources d'émissions de gaz à effet de serre en France en 2018

des émissions de GES (N₂O, CH₄ et CO₂) de l'activité, 2- l'accroissement des stocks de carbone dans les sols et dans la biomasse ligneuse, et 3- la production d'énergies renouvelables et de matériaux biosourcés.

L'amélioration du bilan du secteur agricole repose ainsi en particulier sur le déploiement à grande échelle de bonnes pratiques permettant de réduire les émissions de GES, préserver et accroître le stockage de carbone dans les sols et la biomasse. Pour accompagner la mise en place de ces pratiques à l'échelle des territoires, plusieurs dispositifs de soutien ont été instaurés. Par exemple, certaines pratiques respectant les bonnes conditions agricoles et environnementales (BCAE) font l'objet des aides du premier pilier de la Politique Agricole Commune (PAC). D'autres pratiques sont inscrites dans les mesures agroenvironnementales et climatiques (MAEC) et les plans pour la compétitivité et l'adaptation des exploitations agricoles (PCEA) proposées par le plan de Développement Rural Régional (PDRR) en tant que second pilier de la PAC.

3. Les études de référence

Plusieurs options d'atténuation ont ainsi été identifiées dans le projet BANCO et l'étude « 4pour1000 France », et leurs potentiels et coûts d'atténuation ont été quantifiés. L'évaluation a porté sur 10 grandes actions en lien avec :

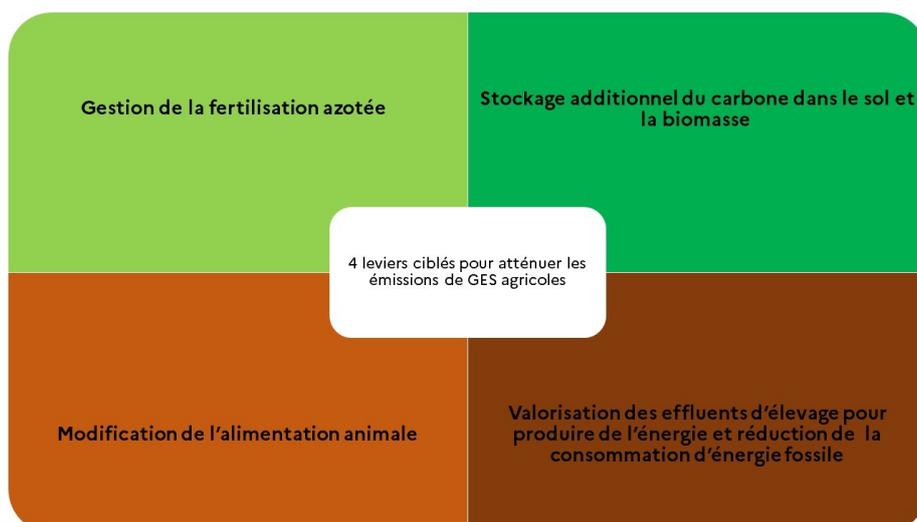
- la diminution des apports de fertilisants azotés minéraux en mettant en place des techniques culturales qui améliorent l'efficacité des apports minéraux et organiques;
- Le stockage additionnel du carbone dans le sol et la biomasse par le biais des techniques culturales sans

Pour contribuer à l'atteinte des objectifs climatiques de la France, le dispositif du Label bas-carbone, piloté par le Ministère de la Transition Ecologique, permet d'accompagner le déploiement des actions de réduction des émissions de gaz à effet de serre et/ou de stockage de carbone dans divers secteurs d'activité, dont l'agriculture. Dans ce cadre, divers acteurs, dont les entreprises et les collectivités, peuvent ainsi apporter une valorisation économique à des agriculteurs qui mettent en place des actions de ce type.

Dans le cadre du projet BANCO et de l'étude « 4pour1000 », un large éventail de pratiques agricoles a été sélectionné afin d'identifier les leviers d'actions permettant de réduire les émissions de GES et/ou d'augmenter le stock de carbone dans le sol et la biomasse. En présentant les principaux résultats de ces travaux, les fiches régionales promeuvent les pratiques les plus atténuantes et donc accompagnent le choix des acteurs régionaux en matière d'action d'atténuation en agriculture.

labour, l'introduction de couverts végétaux intermédiaires et intercalaires, le développement de l'agroforesterie intra-parcellaire, l'implantation de haies et enfin par une meilleure gestion des prairies;

- la modification de l'alimentation animale, notamment en substituant les glucides par des lipides insaturés, en utilisant des additifs qui réduisent la production du CH₄ entérique, ou encore en réduisant les apports protéiques dans les rations pour limiter la teneur en azote des effluents et les émissions de N₂O;



- la valorisation des effluents d'élevage pour produire de l'énergie et la réduction de la consommation d'énergie fossile sur les exploitations.

Si l'étude « 4 pour 1000 France » cible les pratiques

permettant de stocker du carbone dans le sol, le projet BANCO se rapporte aux différents aspects de l'atténuation allant de la réduction des émissions de GES d'origine agricole à l'augmentation du stockage de carbone dans le sol et la biomasse.

3.1. Projet BANCO « Analyse des freins et des mesures de déploiement des actions d'atténuation "à coût négatif" dans le secteur agricole »

Mises en évidence dans le cadre de l'étude «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» (Pellerin, Bamière et al., 2013, 2015), les actions à « coût négatif » sont « gagnant-gagnant », c'est-à-dire qu'elles permettent de réduire les émissions de GES du secteur agricole tout en améliorant la rentabilité économique des exploitations. Elles devraient donc être spontanément mises en place par les agriculteurs. Cependant, en pratique, ceci est loin d'être le cas. Les objectifs du projet de recherche BANCO (pour « Barriers for actions at negative cost and opportunities ») étaient donc d'identifier les actions réellement à coût négatif et de contribuer à leur déploiement dans le secteur agricole (Bamière et al., 2017). La première phase du projet consistait à affiner l'évaluation des coûts d'atténuation réalisée dans l'étude GES (Pellerin, Bamière et al., 2013), en s'attaquant aux deux principaux biais méthodologiques identifiés, à savoir 1- l'agrégation spatiale des résultats à l'échelle nationale et 2- la concurrence potentielle entre les actions d'atténuation.

L'évaluation a porté sur 36 pratiques agricoles regroupées en 10 actions d'atténuation, en lien avec l'optimisation de la fertilisation azotée, l'introduction de légumineuses dans les rotations, l'implantation de couverts végétaux, le développement de l'agroforesterie (intra-parcellaire et haies), la gestion des prairies, la modification de l'alimentation animale, le recours à la méthanisation et aux torchères et la réduction des consommations d'énergie des bâtiments et des tracteurs.

Le projet BANCO a donc contribué à :

- une désagrégation du coût et du potentiel d'atténuation de toutes les pratiques au niveau régional ;
- une meilleure identification des actions d'atténuation à coût négatif en agriculture ;
- une meilleure compréhension de la relative faible mise en œuvre des actions d'atténuation, notamment celles à coût négatif ;
- une analyse approfondie des politiques publiques et privées existantes en vue de proposer des recommandations pour faciliter le déploiement des actions à coût négatif en agriculture.

3.2. Etude 4pour1000 France « Stocker du carbone dans les sols français : quel potentiel au regard de l'objectif 4 pour 1000 et à quel coût ? »

Inscrite dans la démarche de transition bas-carbone, l'étude « 4pour1000 » a été conduite afin d'identifier les pratiques agricoles « stockantes » permettant d'accroître le stockage de carbone dans le sol (Pellerin, Bamière et al., 2019). Ces pratiques contribuent non seulement à atténuer le changement climatique, mais aussi à préserver les sols et à assurer la sécurité alimentaire du fait des effets positifs du carbone des sols sur leurs propriétés et sur les rendements agricoles.

Cette étude a donc permis :

- d'identifier les pratiques agricoles plus "stockantes" que les pratiques actuellement mises en œuvre ;
- d'évaluer le potentiel de stockage additionnel, et le bilan GES complet, liés à l'adoption des pratiques stockantes ;
- de calculer le coût technique, pour l'agriculteur, de mise en œuvre de ces pratiques ;
- de proposer une stratégie coût-efficace de stockage de carbone dans le sol.

L'évaluation a porté sur 10 pratiques agricoles en lien

avec la réduction du travail du sol, l'implantation de couverts végétaux, la mobilisation de nouvelles sources de carbone exogènes, le développement de

l'agroforesterie (intra-parcellaire et haies) et la gestion des prairies (INRAE 2021).

3.3. Mise en commun des résultats des deux études

Pour les besoins des fiches régionales, et pour couvrir tous les leviers d'atténuation, nous avons combiné les résultats des deux études.

Quand une pratique était présente dans les deux études, nous avons retenu les résultats de l'étude «4pour1000 France», qui sont les plus à jour et les plus précis concernant le stockage additionnel de carbone dans le sol. Les pratiques concernées sont celles liées à l'augmentation de stockage de carbone dans le sol par le biais de la mobilisation des sources de carbone exogènes, la réduction du travail au sol, l'introduction des couverts végétaux intermédiaires et intercalaires, le développement de l'agroforesterie, l'implantation de haies, l'extension des prairies temporaires dans les successions de grandes cultures et la gestion des

prairies permanentes (intensification modérée des prairies permanentes par la fertilisation minérale et la substitution d'une ou deux fauches par du pâturage).

Les résultats du projet BANCO sont retenus pour les pratiques liées à la gestion de la fertilisation azotée, le développement des légumineuses, l'implantation des bandes enherbées, l'allongement de la durée de pâturage, la réduction de la fertilisation des prairies intensives, l'intensification des prairies peu productives par augmentation du chargement animal, la modification de la composition de l'alimentation animale et la maîtrise et économie d'énergie.

La source d'information retenue pour chaque pratique est récapitulée dans le tableau ci-après.

Tableau — Récapitulatif des actions d'atténuation et pratiques agricoles sélectionnées, source de données et unités des ressources déployées

	Actions	Libellés des	Pratiques	Libellés des pratiques	Étude source	Unités d'assiettes maximales techniques
Gestion de la fertilisation	Réduire le recours aux engrais minéraux de synthèse en les utilisant mieux et en valorisant plus les ressources organiques, pour réduire les émissions de N ₂ O associées	A1	Réduction de la dose d'azote minéral apportée grâce à une évaluation plus juste des besoins des cultures : fixation d'objectifs de rendement plus réalistes et utilisation d'outils de pilotage de la fertilisation azotée	A1A	BANCO	Hectares
			Amélioration de la prise en compte de l'azote organique apporté dans le calcul du bilan azoté	A1B1	BANCO	Hectares
			Amélioration de l'efficacité des apports organiques en réduisant les pertes par volatilisation d'ammoniac lors de l'épandage, grâce à l'enfouissement systématique des effluents	A1B2	BANCO	Hectares
			Mobilisation de nouvelles ressources organiques exogènes : composts de déchets verts, de déchets alimentaires ou de boues de stations d'épuration, digestats issus de la méthanisation de déchets alimentaires	A1B3	4 pour 1000	Hectares
			Ajustement des dates d'apport aux besoins des cultures en tenant mieux compte des reliquats d'azote minéral en sortie d'hiver : retarder la date du 1 ^{er} apport d'azote au printemps	A1C1	BANCO	Hectares
			Adaptation des formes d'azote minéral apportées en utilisant des inhibiteurs de nitrification, et en modifiant les formes d'engrais pour minimiser les pertes par volatilisation	A1C2	BANCO	Hectares
			Enfouissement dans le sol et localisation des engrais en minimisant les pertes notamment par volatilisation	A1C3	BANCO	Hectares

	Actions	Libellés des actions	Pratiques	Libellés des pratiques	Étude source	Unités d'assiettes maximales techniques
Légumineuses	Accroître la part de légumineuses en grande culture et dans les prairies temporaires pour réduire les émissions de N ₂ O	A2	Accroissement de la surface en légumineuses à graines en grande culture	A2A	BANCO	Hectares de légumineuses
			Augmentation et maintien des légumineuses dans les prairies temporaires	A2B	BANCO	Hectares de prairies
Semis direct	Développer les techniques culturales sans labour pour stocker du carbone dans les sols	A3	Passage au semis direct via l'implantation d'une culture dans les résidus de la culture précédente ou dans ceux du couvert d'interculture, sans aucune intervention mécanique sur le sol autre que l'action des pièces du semoir sur la ligne de semis	A3	4 pour 1000	Hectares
Insertion de couverts végétaux	Introduire davantage de cultures intermédiaires, cultures intercalaires et bandes enherbées dans les systèmes de culture pour stocker du carbone dans les sols et limiter les émissions de N ₂ O	A4	Développement (Insertion et allongement) de cultures intermédiaires	A4A	4 pour 1000	Hectares
			Enherbement permanent des vignobles	A4B1	4 pour 1000	Hectares
			Enherbement hivernal des vignobles	A4B2	4 pour 1000	Hectares
			Introduction des bandes enherbées en bordure de cours d'eau ou périphérie de parcelles	A4C	BANCO	Hectares de bandes enherbées
Agroforesterie et Haies	Développer l'agroforesterie et planter des haies dans les parcelles cultivées pour favoriser le stockage du carbone dans le sol et dans la biomasse végétale	A5	Développement de l'agroforesterie intra-parcellaire via l'implantation d'arbres au sein des parcelles cultivées avec une densité initiale de 75 arbres par ha pour une emprise au sol (bande enherbée comprise) de 12,5%	A5A	4 pour 1000	Hectares de culture
			Implantation de haies (en général arbustives de petite dimension) en périphéries des parcelles cultivées	A5B	4 pour 1000	Hectares de culture
Gestion des prairies	Optimiser la gestion des prairies pour favoriser le stockage du carbone et la réduction des émissions de N ₂ O	A6	Allongement de la durée de pâturage en moyenne de 20 jours dans les systèmes de plaine utilisant de l'ensilage de maïs	A6A	BANCO	Hectares
			Insertion et allongement de prairies temporaires dans les successions de grandes cultures	A6B	4 pour 1000	Hectares (de séquence de cultures)
			Réduction de la fertilisation des prairies permanentes et temporaires les plus intensives	A6C	BANCO	Hectares
			Intensification des prairies peu productives par augmentation du chargement animal	A6D	BANCO	Hectares
			Intensification modérée des prairies permanentes en augmentant la fertilisation azotée	A6E	4 pour 1000	Hectares
			Substitution d'une ou deux fauches par du pâturage (prairies permanentes)	A6F	4 pour 1000	Hectares

	Actions	Libellés des actions	Pratiques	Libellés des pratiques	Étude source	Unités d'assiettes maximales techniques
Lipides et additifs	Substituer des glucides par des lipides insaturés et utiliser un additif à base de nitrate dans les rations des ruminants pour réduire la production de CH ₄ entérique	A7	Substitution des glucides par des lipides insaturés dans les rations	A7A	BANCO	Têtes de bovins
			Ajout d'un additif à base de nitrate dans les rations	A7B	BANCO	Têtes de bovins
Alimentation protéique	Réduire les apports protéiques dans les rations animales pour limiter les teneurs en azote des effluents et les émissions de N ₂ O associées	A8	Réduction de la teneur en protéines des rations hivernales, sans variation de production laitière	A8A	BANCO	Têtes de vaches laitières
			Amélioration de l'équilibre en acides aminés des protéines à travers l'incorporation d'acides aminés de synthèse et en ajustant les apports aux besoins en acides aminés des porcs en engraissement	A8B	BANCO	Truies reproductrices, porcelets et porcs à l'engraissement
Maîtrise et économie d'énergie	Développer la méthanisation, et installer des torchères, pour réduire les émissions de CH ₄ liées au stockage des effluents d'élevage	A9	Développement de la méthanisation en envoyant les déjections récupérées, liquides ou solides (lisiers et fumiers), dans un réacteur de digestion anaérobie favorisant la production et le captage de CH ₄	A9A	BANCO	Nombre d'exploitations de taille minimale de 140 UGB
			Couverture de la fosse de stockage pour récupérer le CH ₄ produit, et installation d'une torchère pour brûler ce CH ₄ . Cette pratique ne s'applique qu'aux effluents liquides et n'est envisagée que pour les exploitations dont la production de lisier est insuffisante pour justifier un équipement de méthanisation	A9B	BANCO	Nombre d'exploitations
	Réduire, sur l'exploitation, la consommation d'énergie fossile des bâtiments et équipements agricoles	A10	Modification du mode de chauffage des bâtiments avicoles par l'installation des échangeurs thermiques	A10A1	BANCO	Volailles de chair (têtes)
			Modification du mode de chauffage des bâtiments avicoles par l'installation des aérothermes ou radiants dernière génération	A10A2	BANCO	Volailles de chair (têtes)
			Amélioration de l'isolation des bâtiments avicoles	A10A3	BANCO	Volailles de chair (têtes)
			Installation d'un double écran thermique dans les serres chaudes en maraîchage et en ornemental	A10B1	BANCO	Hectares de serres
			Installation de ballon de stockage d'eau chaude, standard en serre horticole ou de type open buffer en serre maraîchère	A10B2	BANCO	Hectares de serres
			Réduction de la consommation d'énergie des engins agricoles via le passage des tracteurs au banc d'essai	A10C1	BANCO	Tracteurs
			Réduction de la consommation d'énergie des engins agricoles au travers de la formation des agriculteurs à l'éco-conduite	A10C2	BANCO	Tracteurs

4. Méthode de calcul des potentiels et coûts d'atténuation

Dans cette section, sont rappelées la définition des notions d'assiette maximale technique, de potentiel d'atténuation, de coûts techniques d'atténuation; les hypothèses retenues pour le calcul du potentiel d'atténuation et du coût de mise en œuvre des

pratiques agricoles; la méthode d'agrégation des pratiques en grandes actions ; la méthode de construction des courbes régionales de coût marginal d'atténuation et leur interprétation; ainsi que les précautions d'usage.

4.1. Définitions

Assiette maximale technique

L'assiette maximale technique (AMT) est la quantité maximale de ressource utilisable pour une pratique agricole, c'est-à-dire la surface ou l'effectif animal pour lesquels la pratique peut effectivement se déployer dans des conditions techniquement acceptables, et sans effet secondaire défavorable. L'application de ces restrictions techniques conduit notamment à l'exclusion de certaines cultures ou certains types de sol de l'assiette d'une pratique . Par exemple, le calcul de l'AMT se fait :

- en tenant compte de la durée de l'interculture et du type de sol pour les cultures intermédiaires ;
- en fonction de la présence d'un élevage de ruminants pour l'insertion de prairies temporaires dans les successions de grandes cultures ;
- en excluant les sols hydromorphes (dont les émissions de N_2O augmentent en non-labour) et les cultures sarclées nécessitant un travail du sol (betterave à sucre, maïs grain lorsqu'il est en monoculture, tournesol et pommes de terre) pour le semis direct ;
- en se limitant aux parcelles d'une taille définie (par exemple, supérieure à 1 hectare en agroforesterie), aux sols d'une profondeur supérieure à un mètre et non hydromorphes pour l'agroforesterie ; aux sols d'une profondeur supérieure à 50 cm pour les haies ;
- en ne retenant que certaines catégories d'animaux (vaches laitières, truies, porcs et porcelets à l'engrais) pour l'action portant sur l'alimentation protéique.

Dans certains cas, le calcul de l'assiette et les modalités de mise en œuvre des pratiques tiennent aussi compte d'autres objectifs environnementaux comme la réduction de l'usage du glyphosate, en interaction avec

le développement du semis direct et la généralisation des cultures intermédiaires.

Potentiel d'atténuation

Le potentiel d'atténuation d'une nouvelle pratique est évalué par rapport à une situation de référence correspondant aux pratiques actuelles. Le calcul du potentiel d'atténuation tient compte des variations des émissions de GES directes (ex. émissions N_2O liées à la fertilisation des parcelles, émissions de CH_4 liées à la fermentation entérique, émissions de CO_2 liées à la combustion d'énergie fossile, stockage de carbone additionnel dans le sol et la biomasse) et indirectes (lessivage NO_3^- , volatilisation et redéposition du NH_3 , dénitrification). Il exclut les émissions induites, en amont ou en aval de l'exploitation, liées à: la fabrication et au transport d'engrais azotés minéraux, la fabrication des carburants, et l'effet de substitution issu de l'utilisation du bois d'éclaircie (énergie) et de la récolte finale de bois (énergie et matériau).

Le stockage additionnel de carbone dans le sol est calculé par différence entre le stock simulé sous hypothèse d'adoption de la pratique stockante et le stock simulé sous hypothèse de maintien de la pratique actuelle. Dans le cas des pratiques relevant de l'étude « 4 pour 1000 », les simulations sont réalisées sur 30 ans et le stockage extrapolé sur toute la profondeur du sol. Un résultat positif correspond à un stockage additionnel de carbone alors qu'un résultat négatif correspond à un déstockage.

Potentiel d'atténuation unitaire

Le potentiel d'atténuation unitaire d'une pratique est calculé à la résolution d'une unité de production (hectare, animal, tracteur, etc.) dans une région. Il est exprimé en tonne de CO_2 équivalent par unité de production par an ($t CO_2eq/unité\ de\ production/an$).

Potentiel d'atténuation total régional (ou bilan GES complet régional)

Exprimé en millions de tonnes de CO₂ équivalent par an (Mt CO₂eq/an), le potentiel d'atténuation total intègre les variations des différents postes d'émissions en plus du stockage additionnel de carbone dans le sol et la biomasse. Pour l'agrégation à l'échelle régionale, le potentiel d'atténuation total d'une pratique est estimé en multipliant son potentiel d'atténuation unitaire par son AMT, dans la région concernée. Un résultat positif correspond à une réduction des émissions nettes ou à une augmentation du stockage, par rapport aux pratiques actuelles, alors qu'un résultat négatif correspond à des émissions vers l'atmosphère ou à un déstockage.

Coût technique

Le coût technique est le coût additionnel, pour l'agriculteur, lié à la mise en œuvre d'une pratique d'atténuation. Il est estimé selon les variations de dépenses et de recettes associées aux modifications induites par la pratique par rapport aux pratiques actuelles. S'agissant ainsi d'un coût additionnel par rapport au coût des pratiques actuelles, le coût technique peut représenter une perte (coût positif) ou un gain (coût négatif) pour l'agriculteur.

Le calcul du coût technique intègre :

- la variation (augmentation ou diminution) des charges variables (ex : engrais, semences, pesticides, aliments du bétail) ;
- la variation des opérations culturales (ex. main d'œuvre, amortissement du matériel, carburant) ;
- la variation des rendements (cultures, prairies) et des revenus associés ;
- les pertes de revenu dues au changement d'activité (ex. substitution de cultures, surfaces en cultures substituées par des rangées d'arbres) ;
- la création éventuelle d'un nouveau revenu (ex. vente de bois produit en agroforesterie) ;
- les investissements clairement identifiés (implantation d'une haie...);
- les subventions lorsqu'elles sont indissociables du prix payé ou perçu par l'agriculteur (ex. défiscalisation du prix des carburants agricoles, les

aides et redevances pour le traitement des déchets).

Sont exclus de l'estimation du coût de mise en œuvre des pratiques, les aides PAC, les subventions optionnelles (souvent d'origine locale), les coûts de transaction publics et privés (coûts d'information et de contrôle, coût de négociation, etc.). Les services environnementaux (ex. la biodiversité et la régulation des flux d'eau et de matières dans le sol) rendus par les pratiques ne sont pas valorisés.

Coût technique unitaire

Le coût technique unitaire est le coût additionnel de mise en œuvre d'une pratique, par rapport à la situation de référence, calculé à la résolution d'une unité de production (hectare, animal, tracteur, etc.) dans une région. Il est exprimé en euros par unité de production par an (€/unité de production/an). Pour l'action portant sur la méthanisation et les torchères, le coût technique unitaire correspond au coût de l'installation d'un méthaniseur ou d'une torchère à l'échelle de l'exploitation. Il est donc exprimé en euros par exploitation par an (€/exploitation/an).

Coût technique régional

Le coût technique régional d'une pratique ou d'une action est calculé en multipliant son coût technique unitaire régional par son AMT régionale. Il est exprimé en millions d'euros par an (M€/an).

Coût d'atténuation

Le coût d'atténuation d'une pratique agricole est le ratio entre son coût technique régional et son potentiel d'atténuation régional. Il est interprété comme le prix minimal de la tonne de CO₂eq évitée ou stockée pour qu'une pratique d'atténuation devienne rentable économiquement pour l'exploitant. Si le ratio est négatif, la pratique/l'action est dite « à coût négatif ». La mise en œuvre des pratiques/actions « à coût négatif » permet une diminution des émissions de GES et/ou un accroissement du stock de carbone dans les sols et la biomasse tout en fournissant à l'exploitant des économies de coûts et/ou un revenu additionnel.

4.2. Méthode d'agrégation des pratiques pour la construction de la courbe de coûts d'atténuation régionaux

Les pratiques correspondant à un même levier technique sont agrégées en dix grandes actions d'atténuation qui sont : la gestion de la fertilisation azotée, le développement des légumineuses, la réduction du travail du sol, l'implantation des couverts végétaux, l'agroforesterie et haies, la gestion des prairies, l'ajout des lipides et additifs dans les rations de bovins, l'alimentation animale protéique, la méthanisation et les torchères, et les économies d'énergie.

pratique, puis agrégés à l'échelle de l'action, sous hypothèse d'additivité et sans prise en compte des interactions entre les pratiques appartenant à une même action. Cette additivité est une hypothèse raisonnable dans la mesure où les potentiels concernent des assiettes différentes (cheptel bovin pour l'une, porcine pour l'autre...), ou sont applicables simultanément à une même assiette (modifications compatibles de la ration des ruminants ou des pratiques de fertilisation sur une même parcelle, etc.).

Les potentiels d'atténuation sont d'abord calculés par

Le calcul des agrégats se fait comme suit :

	Unité	Pour une pratique <i>i</i>	Pour une action <i>a</i>
Coût technique régional	M€/an	$C_{i,j} = AMT_{i,j} \cdot c_{i,j}$	$C_{a,j} = \sum_{i=1}^n AMT_{i,j} \cdot c_{i,j}$
Potentiel régional de stockage additionnel de carbone dans le sol	M tC/an	$POTC_{i,j} = AMT_{i,j} \cdot potC_{i,j}$	$POTC_{a,j} = \sum_{i=1}^n AMT_{i,j} \cdot potC_{i,j}$
Potentiel régional d'atténuation de GES hors stockage additionnel de carbone dans le sol	M tCO ₂ eq/an	$POTGES_{i,j} = AMT_{i,j} \cdot potGES_{i,j}$	$POTGES_{a,j} = \sum_{i=1}^n AMT_{i,j} \cdot potGES_{i,j}$
Potentiel d'atténuation total régional	M tCO ₂ eq/an	$A_{i,j} = POTC_{i,j} \cdot \frac{44}{12} + POTGES_{i,j}$	$A_{a,j} = POTC_{a,j} \cdot \frac{44}{12} + POTGES_{a,j}$
Coût d'atténuation régional	€/t CO ₂ eq	$CA_{i,j} = \frac{C_{i,j}}{A_{i,j}}$	$CA_{a,j} = \frac{C_{a,j}}{A_{a,j}}$

Avec :

- une action *a* est constituée d'un ensemble de pratiques *i* ;
- $AMT_{i,j}$ est l'assiette maximale technique de la pratique *i* dans la région *j* ;
- $c_{i,j}$ est le coût technique unitaire de la pratique *i* dans la région *j* ;
- $potC_{i,j}$ est le potentiel unitaire de stockage additionnel de carbone dans le sol de la pratique *i* dans la région *j* ;
- $potGES_{i,j}$ est le potentiel unitaire d'atténuation de GES et stockage de carbone dans la biomasse (donc hors stockage de carbone dans le sol) de la pratique *i* dans la région *j* ;

Construction et interprétation de la courbe des coûts d'atténuation régionaux

La courbe des coûts d'atténuation régionaux est générée à partir des coûts d'atténuation moyens des actions. Pour chaque action, le coût moyen régional est calculé comme le rapport entre son coût technique total et son potentiel total d'atténuation. Cela explique la forme en escalier de la courbe (voir graphique ci-dessous).

Les actions ayant un potentiel d'atténuation positif (actions non émettrices) sont classées de gauche à droite par coût d'atténuation croissant. Le potentiel d'atténuation cumulée est représenté sur l'axe des abscisses et les coûts par unité de CO₂eq sur l'axe des

ordonnées. Chaque action est représentée par une barre. Plus la barre est large, plus le potentiel d'atténuation est important.

Les actions appartenant au même levier d'atténuation affichent la même couleur. Les couleurs correspondent aux quatre leviers d'atténuation : la réduction des apports de fertilisants minéraux azotés (vert), le stockage du carbone dans le sol et la biomasse (vert clair), la modification de la ration des animaux (orange) et la valorisation des effluents pour produire de l'énergie et réduire la consommation d'énergie fossile (marron).

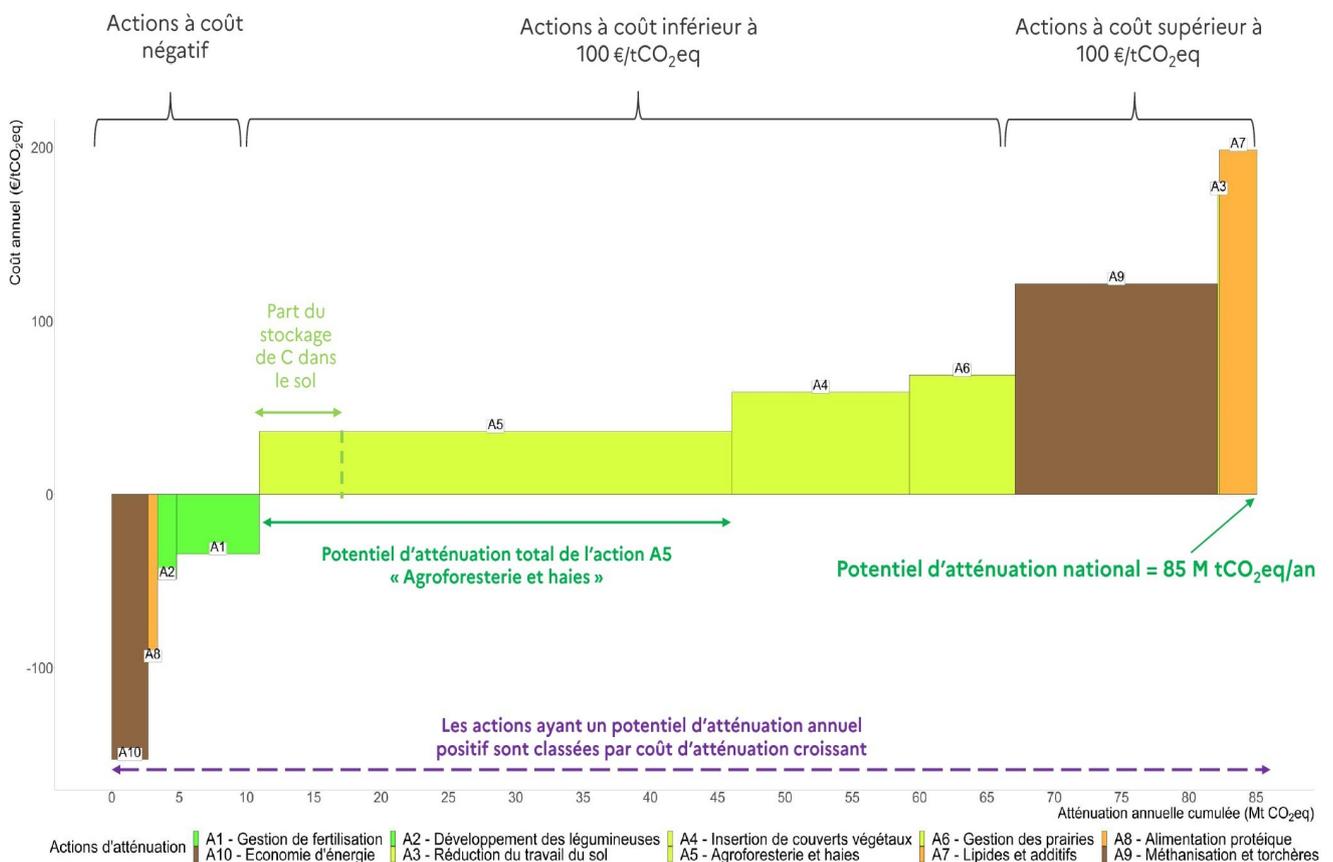


Figure – Coûts et potentiels d'atténuation des émissions de GES des principaux leviers d'action en France métropolitaine

4.3. Hypothèses générales

Les potentiels et coûts d'atténuation/stockage des pratiques ont été calculés avec des données de référence et des hypothèses qui peuvent différer entre

les deux études. Les grandes hypothèses et différences sont rappelées ci-après.

Tableau — Récapitulatif des grandes hypothèses prises en compte dans les études BANCO et « 4pour1000 France »

	Étude « BANCO »	Étude « 4pour1000 France »
Contexte technique et économique	Contexte constant correspondant à l'année de référence 2010	Contexte constant correspondant aux années 2009 à 2013 (moyenne quinquennale des prix, surfaces et rendements)
	Le changement des grands usages des sols et des régimes alimentaires ne sont pas pris en compte et les effectifs d'animaux sont constants.	
Horizon temporel	20 ans : 2010-2030	30 ans
Taux d'actualisation	4 %	4,5 %
Taux de diffusion des pratiques à la fin de l'horizon temporel	Assiette effective de mise en œuvre des pratiques déterminée par un modèle d'allocation coût efficace de l'effort d'atténuation (BANCO)	Assiette effective de mise en œuvre des pratiques déterminée par un modèle d'allocation coût efficace de l'effort de stockage (BANCO)
	Les fiches considèrent que les pratiques sont mises en œuvre sur 100% de l'AMT	
Climat	Climat actuel (2010)	Climat actuel (1983-2013)
Calcul de l'AMT	<p>Le calcul de l'AMT se base sur :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Statistique Agricole Annuelle (SAA 2010); • Réseau d'Information Comptable Agricole (RICA 2010); • Enquêtes sur les Pratiques Culturelles (EPC 2006); • Base de données géographiques des sols de France au 1/1 000 000 (BDGSF); • Cartographie européenne d'occupation biophysique des terres (Corine Land Cover) 	<p>Le calcul de l'AMT se base sur :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Séquences de cultures et modes de gestion des prairies permanentes dans les unités pédoclimatiques (exploitation du Registre Parcellaire Graphique, EPC 2006 et 2011, enquête du SSP pour les prairies permanentes); • SAA 2009-2013; • Réseau d'Information Comptable Agricole (RICA 2009-2013); • BDGSF (INRA Infosol)
Mode de calcul des potentiels d'atténuation unitaires	<p>Les émissions directes et indirectes calculées selon 2 méthodes (cf. Pellerin, Bamière et al., 2013):</p> <ul style="list-style-type: none"> • Méthode inventaire national 2010 (CITEPA selon IPCC96) • Méthode « expert » avec les données et coefficient d'émission et de stockage les plus à jour (minimum IPCC2006), incluant le stockage de carbone dans le sol, les impacts de la modification des rations animales etc. 	<p>Les émissions directes et indirectes ont été simulées par le modèle STICS pour les cultures et les prairies temporaires, par le modèle PaSim pour les prairies permanentes, ou sont issues de la littérature pour les pratiques agroforesterie, haies et enherbement des vignes.</p>
	Pour chaque pratique, on retient la source de données la plus à jour (BANCO méthode expert ou 4pour1000 France) et on exclut les émissions induites.	
Les facteurs d'émissions	<ul style="list-style-type: none"> • Méthode inventaire : équations et facteurs d'émission utilisés par le CITEPA dans l'inventaire national 2010 (IPCC96) • Méthode « expert » : équations et facteurs IPCC 2006 au minimum ou/et selon les experts par modélisation. <p>Les émissions induites sont calculées en appliquant des facteurs standards provenant de la Base Carbone® (ADEME) et des référentiels Dia'terre®-Ges'tim (Instituts techniques).</p>	<p>Simulations STICS et PaSim pour le stockage de carbone et les émissions de N₂O et CH₄, Base Carbone® (ADEME ; gazole B7 – données 2015) pour les émissions de CO₂. Les émissions induites en amont/aval sont calculées à partir des facteurs standards provenant de Base Carbone® (ADEME) : PRG AR4 pour engrais azoté moyen et données 2015 pour gazole B7.</p>
Nombre de pratiques agricoles	35 pratiques regroupées en 10 actions ciblant les trois leviers d'atténuation : la réduction des émissions de CH ₄ et N ₂ O, l'accroissement des stocks de carbone dans les sols et la biomasse ligneuse et la production de l'énergie réduisant les émissions par substitution à des énergies fossiles.	10 pratiques regroupées en 8 actions ciblant un seul levier d'atténuation : l'accroissement des stocks de carbone dans les sols.
	En croisant les pratiques des deux études, 36 pratiques agricoles sont retenues et regroupées en 10 grandes actions.	
Interactions entre les pratiques agricoles	Interactions d'assiette prises en compte par le modèle (BANCO)	
	Pour les fiches, les pratiques agricoles sont agrégées sous hypothèse d'additivité.	

4.4. Précautions d'usage

Les résultats présentés dans les fiches relèvent des choix méthodologiques effectués dans BANCO et « 4pour1000 France » pour l'évaluation des potentiels et coûts d'atténuation des pratiques agricoles. Ils dépendent ainsi du contexte de référence, des méthodes de calcul du coût technique et des émissions de GES ainsi que de la prise en compte (ou non) des émissions induites et des interactions entre les pratiques.

Les calculs des potentiels et des coûts se basent sur une référence statique qui n'intègre pas l'évolution potentielle de la demande alimentaire et son impact sur les prix, les assolements et les productions animales. Les grands changements d'usage des sols (reforestation, urbanisation, artificialisation des sols) et les évolutions technologiques et/ou génétiques ne sont pas non plus pris en compte. Il en est de même pour les effets du changement climatique sur les systèmes de culture et les rendements, le climat de référence utilisé pour les simulations des modèles STICS et PaSim correspondant au climat actuel récent.

L'évaluation du coût technique des pratiques repose donc sur l'hypothèse d'un contexte technique et économique constant, correspondant à la période de référence. Il s'agit de l'année 2010 pour l'étude BANCO et de la moyenne quinquennale sur la période 2009 - 2013 pour l'étude « 4pour1000 France ». Ainsi, les surfaces des cultures, la taille du cheptel, les rendements, les prix des cultures et des intrants sont ceux de ces périodes de référence. Le choix d'une référence statique implique de ne pas tenir compte de la variabilité interannuelle selon les surfaces de cultures, le cheptel, les prix des facteurs de production et des produits.

Les calculs du coût technique des pratiques n'intègrent pas non plus les coûts supplémentaires pour la société (coûts des effets indirects sur l'environnement) et les coûts de transaction publics et privés (coûts d'information et de contrôle, coût de négociation, etc) pour lesquels les informations disponibles au moment de la réalisation des études étaient incomplètes.

Les actions caractérisées par un « coût négatif » permettent non seulement une réduction nette des émissions, mais également une augmentation du

revenu des agriculteurs. Si elles ne sont pas déjà mises en œuvre, c'est notamment qu'il existe d'autres coûts non pris en compte les études sources, tels que les coûts de transaction et les coûts liés aux risques associés à certaines pratiques. Une prise en compte de ces coûts réduirait le potentiel économique de ces actions. De plus, certains postes de coût sont très sensibles aux variations interannuelles de prix ou hypothèses faites sur les matériels agricoles utilisés.

Les méthodes et les sources de données pour le calcul des émissions de GES diffèrent entre les études. Dans « 4pour1000 », les émissions ont été calculées par les modèles STICS (systèmes de grandes cultures) et PaSim (prairies permanentes) en général, ou sur la base de coefficients d'émission issus d'une revue de la littérature quand il n'y avait pas de modèle disponible, avec une méthode inventaire pour compléter les émissions de CO₂ des engins agricoles. Tandis que dans le projet BANCO (et l'étude GES), les émissions sont calculées, selon les cas, à partir de la méthode inventaire de 2010 ou selon une méthode « expert » basée sur les chiffres les plus récents disponibles à l'époque.

L'abandon du labour au profit des techniques culturales sans labour entraîne un accroissement du stock de carbone dans les horizons de surface (0 – 30 cm), mais pas d'accroissement de stock si l'on considère la totalité du profil de sol (0 – 100 cm). Il s'agit donc d'une redistribution verticale du C. Ainsi, le potentiel total d'atténuation n'intègre que les émissions directes et indirectes de GES. Malgré son coût technique relativement faible, son potentiel d'atténuation reste limité et peut être négatif dans certaines régions (ex : Bretagne, ex Franche-Comté, ex Aquitaine, etc).

Le choix d'exclure les émissions induites impacte peu le potentiel d'atténuation de la plupart des actions, à l'exception de la gestion de fertilisation, du développement des légumineuses et de l'alimentation animale. La prise en compte des émissions induites renforce le potentiel de certaines pratiques, en raison de la réduction des émissions de GES liées à la fabrication des engrais azotés pour les actions relatives à la fertilisation et aux légumineuses, et des émissions de GES liées à la production et au transport de

tourteaux de soja pour la pratique relative à l'alimentation azotée des animaux. A contrario, le potentiel d'atténuation de la pratique relative à l'ajout de lipides dans la ration des bovins est divisé par deux si on tient compte des émissions induites liées à la production des matières premières.

Lors de l'agrégation des pratiques, ni les interactions entre les assiettes, ni les interactions au niveau des potentiels d'atténuation et de stockage ne sont prises en compte. Toutefois, le déploiement d'une action ou d'une pratique peut modifier le potentiel d'atténuation et/ou le coût technique d'une autre action ou pratique, en raison d'interactions. Elles peuvent porter aussi bien sur l'assiette (ex : l'augmentation de la surface des légumineuses réduit l'assiette de l'action portant sur la fertilisation azotée) que sur le potentiel d'atténuation ou le coût technique unitaire (ex : la réduction des doses d'azote minéral diminue la quantité d'azote minéral qui peut être économisée par l'introduction d'un inhibiteur de nitrification). Les actions présentant des interactions "internes" entre les pratiques sont : A1 – Gestion de la fertilisation azotée, A19 – Méthanisation et torchères et A10 - Économies d'énergie.

Enfin, soulignons que les fiches régionales produites ici portent sur les leviers techniques dans le secteur agricole pour la réduction des émissions GES et/ou le stockage de carbone. Pour une réflexion globale et intégrée des évolutions possibles du secteur agricole pour l'atteinte des objectifs d'atténuation du changement climatique (en lien notamment avec les évolutions des autres secteurs, dont l'alimentation), un exercice prospectif est adapté.

Références

Pellerin S., Bamière L., Angers D., Béline F., Benoît M., Butault J.P., Chenu C., Colnenne-David C., De Cara S., Delame N., Doreau M., Dupraz P., Faverdin P., Garcia-Launay F., Hassouna M., Hénault C., Jeuffroy M.H., Klumpp K., Metay A., Moran D., Recous S., Samson E., Savini I., Pardon L., 2013. Quelle contribution de l'agriculture française à la réduction des émissions de gaz à effet de serre ? Potentiel d'atténuation et coût de dix actions techniques. Synthèse du rapport d'étude, INRA (France), 92 p.

Pellerin, S., Bamière, L., & Pardon, L. (2015). *Agriculture et gaz à effet de serre, dix actions pour réduire les émissions* (Éditions Quae (ed.)).

Bamière, Laure ; Camuel, Alexandre ; De Cara, Stéphane ; Delame, Nathalie ; Dequiedt, Benjamin ; Lapierre, Aline ; Lévêque, Benjamin. 2017. Analyse des freins et des mesures de déploiement des actions d'atténuation à coût négatif dans le secteur agricole : couplage de modélisation économique et d'enquêtes de terrain – Rapport final. 79 pages.

Sylvain Pellerin et Laure Bamière, Camille Launay, Raphaël Martin, Michele Schiavo, Denis Angers, Laurent Augusto, Jérôme Balesdent, Isabelle Basile-Doelsch, Valentin Bellassen, Rémi Cardinael, Lauric Cécillon, Eric Ceschia, Claire Chenu, Julie Constantin, Joël Darroussin, Philippe Delacote, Nathalie Delame, François Gastal, Daniel Gilbert, Anne-Isabelle Graux, Bertrand Guenet, Sabine Houot, Katja Klumpp, Elodie Letort, Isabelle Litrico, Manuel Martin, Safya Menasseri, Delphine Mézière, Thierry Morvan, Claire Mosnier, Jean Roger-Estrade, Laurent Saint-André, Jorge Sierra, Olivier Théron, Valérie Viaud, Régis Gâteau, Sophie Le Perchec, Isabelle Savini, Olivier Réchauchère, 2019. *Stocker du carbone dans les sols français, Quel potentiel au regard de l'objectif 4 pour 1000 et à quel coût ?* Synthèse du rapport d'étude, INRA (France), 114 p.

INRAE, 2021. Etude 4pour1000 Stocker du carbone dans les sols français : quel potentiel au regard de l'objectif 4 pour 1000 et à quel coût ? Dataverse. <https://data.inrae.fr/dataverse/etude4pour1000>

REMERCIEMENTS

L'ADEME remercie INRAE, en particulier Nosra Ben Fradj et Laure Bamière, pour l'élaboration de ces fiches régionales qui capitalisent des travaux clés pour accompagner les acteurs locaux et agricoles en vue de la réduction des émissions GES, la préservation voire l'augmentation des stocks de carbone du secteur agricole.

CONTACTS

- Suivi technique national ADEME :

Thomas EGLIN et Audrey TREVISIOL (Direction Bioéconomie et Energies renouvelables / Service Forêt Alimentation Bioéconomie)

