



STOCKER DU CARBONE DANS LES SOLS FRANÇAIS

QUEL POTENTIEL AU REGARD DE L'OBJECTIF 4 POUR 1000 ET À QUEL COÛT ?

RÉSUMÉ DE L'ÉTUDE - Version finale NOVEMBRE 2020

ÉTUDE RÉALISÉE POUR L'ADEME ET LE MINISTÈRE DE L'AGRICULTURE ET DE L'ALIMENTATION

L'initiative "4 ‰ sur les sols pour la sécurité alimentaire et le climat", lancée par la France à l'occasion de la Conférence de Paris sur le climat (COP-21), propose d'augmenter chaque année d'un quatre millième le stock de carbone présent dans tous les sols du monde. Ce chiffre résulte d'un calcul initial simple, considérant que l'ensemble des émissions annuelles de CO₂ dues aux activités humaines représente actuellement, au niveau mondial, l'équivalent d'un quatre millième du stock de carbone (C) des sols de la planète (environ 2 400 gigatonnes de C). Un stockage annuel de 4 pour 1000 (4‰) sur toute la profondeur du sol compenserait alors l'ensemble de ces émissions. Cet objectif initial a été corrigé ultérieurement en considérant une cible de stockage annuel de 4‰ sur le seul horizon de surface (0-30 cm) des sols mondiaux. L'objectif, très ambitieux, nécessite des évolutions profondes des pratiques agricoles et des modes de gestion sylvicole, voire des modifications des modes d'occupation des sols et des systèmes de production. Un programme international de recherche a été lancé dans le cadre de cette initiative. Cet objectif ne doit cependant pas laisser penser que la réduction des émissions serait devenue facultative. Elle reste même l'objectif principal, le stockage dans le sol ne pouvant intervenir que comme un complément, dans un contexte d'urgence climatique. C'est particulièrement vrai pour un pays industrialisé comme la France, pour lequel une augmentation de 4‰ par an du stock de carbone organique des sols (stock qui s'élève à 3,58 Gt de carbone pour l'horizon 0-30 cm, soit 13,4 Gt d'équivalent CO₂) ne permettrait de compenser que 12% des émissions nationales annuelles de gaz à effet de serre (0,458 Gt de CO₂e en 2016). Dans le cadre d'une mobilisation de l'ensemble des leviers permettant d'atteindre l'objectif de neutralité carbone à l'horizon 2050, porté par la Stratégie Nationale Bas Carbone, un chiffrage du potentiel permis par ce levier demeure cependant indispensable.

A la demande de l'ADEME et du Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation, l'INRA a conduit une étude, centrée sur la France métropolitaine, visant à estimer le potentiel de stockage de carbone des sols agricoles et forestiers, en identifiant les pratiques qui permettraient d'accroître leur teneur en carbone organique et in fine à évaluer la contribution potentielle de ce levier à l'objectif de réduction des émissions nettes de gaz à effet de serre.

Cette étude a examiné des pratiques agricoles et forestières permettant de stocker du carbone dans les sols français (hors outre-mer) sans modifier l'usage des sols et sans changer structurellement les systèmes agricoles et forestiers. Sans changement d'usage des sols, de pratiques agricoles et forestières et hors artificialisation, l'évolution actuelle des stocks de carbone des sols présente une forte incertitude : elle varie de 0‰ à +3,2‰ par an selon que l'on retient les hypothèses basses ou hautes pour les données issues tant de la littérature scientifique que de simulations. Grâce au ré-échantillonnage en cours des parcelles du RMQS¹, l'incertitude sur cette évolution tendancielle des stocks de carbone des sols agricoles sans changement d'usage sera réduite. Par ailleurs, les changements d'usage des sols (par exemple l'artificialisation et le retournement des prairies) ont aujourd'hui des effets nets négatifs sur les stocks de carbone des sols nationaux. Le principal enseignement de l'étude est qu'en mettant en œuvre l'ensemble des pratiques identifiées sur la totalité des surfaces où cela est techniquement faisable, il est possible d'atteindre un stockage additionnel de +1,8‰ par an pour l'ensemble des surfaces agricoles et forestières. Il est de +3,2‰ pour les seules surfaces agricoles et de +5,1‰ si on se limite aux seules grandes cultures (là où les stocks sont les plus faibles). Ces niveaux de stockage annuels sont estimés sur une période de 30 ans et sont limités dans le temps. Stocker davantage de carbone dans les sols est possible à un coût inférieur à la valeur tutélaire du carbone (c'est-à-dire la valeur de l'action pour le climat). L'enrichissement des sols en matière organique, essentiellement en grandes cultures, est par ailleurs un objectif important pour améliorer différentes composantes de leur fertilité. Les pratiques à mettre en œuvre (extension des cultures intermédiaires avec retour au sol, des prairies temporaires, de l'agroforesterie...) apportent des co-bénéfices vis-à-vis de la qualité de l'eau et de la biodiversité. A contrario, partout où les stocks de carbone du sol sont élevés (principalement en forêts et prairies permanentes), il est difficile de les augmenter, l'enjeu est alors surtout d'entretenir et de protéger ces stocks et de préserver leur taux d'augmentation tendanciel. Des politiques publiques favorisant le maintien des prairies permanentes, des zones humides et des forêts et stoppant l'artificialisation des sols sont donc indispensables et complémentaires de celles visant l'augmentation des stocks de carbone à même usage du sol. En réalisant sur l'ensemble du territoire national ces deux objectifs complémentaires, il serait possible de s'approcher, voire de dépasser, la cible d'une augmentation de 4‰ par an des stocks de carbone des sols métropolitains, sous réserve de lever l'incertitude sur l'évolution tendancielle des stocks (première évaluation en 2021). La réalisation de ces objectifs supposera une réorientation des politiques publiques et des financements associés, au bénéfice de systèmes durables, favorables à la préservation et au stockage du C dans les sols, ainsi qu'une forte évolution des stratégies de l'ensemble des acteurs des filières agricoles et forestières, en lien avec les territoires.

Les stocks de carbone dans les sols métropolitains

La carte des stocks de carbone des sols métropolitains pour la couche 0-30 cm (Figure 1) montre une variation géographique qui résulte à la fois de l'occupation des sols, du type de sol et du climat. Les stocks les plus élevés (>100 tC/ha) sont observés dans les zones d'altitude (Alpes, Pyrénées, Massif Central, Jura, Vosges) ou dans les zones de prairie (Bretagne). Les stocks élevés en zone montagneuse s'expliquent par l'effet combiné du climat (températures faibles et pluviométrie élevée avec périodes d'anoxie peu favorables à la minéralisation du carbone du sol) et du mode d'occupation du sol (dominance de la prairie permanente et de la

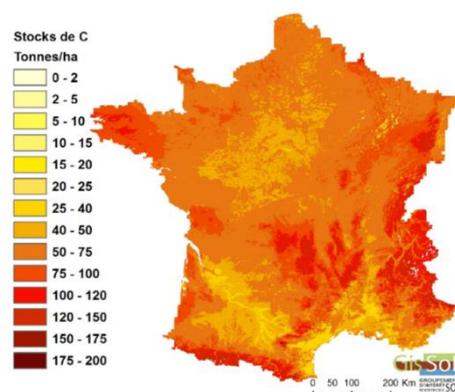


Figure 1. Carte des stocks de C organique des sols français (en tC/ha) sur les 30 premiers centimètres de sol (données GIS Sol)

¹ Réseau de Mesure de la Qualité des Sols opéré par le GIS Sol

forêt). S'y ajoute dans certaines zones l'effet de la minéralogie (sols volcaniques du Massif Central). Des stocks de carbone moyennement élevés (75 à 100 tC/ha) sont caractéristiques des grandes régions forestières ou fourragères (Est, Massif Central, Normandie). Les stocks de carbone faibles à moyens (25 à 50 tC/ha) se rencontrent essentiellement dans les sols des grandes plaines de culture intensive, comme par exemple dans le grand Bassin parisien, une partie du Bassin aquitain, le Toulousain et le sillon rhodanien. Les stocks les plus faibles sont observés en Languedoc-Roussillon. Ils s'expliquent par l'importance des surfaces en vigne, culture restituant très peu de carbone au sol dans la majorité des conditions de culture.

Valeur des stocks de carbone des sols sous différents modes d'occupation

Le Tableau 1 et la Figure 2 présentent les stocks moyens de carbone des sols sous différents modes d'occupation, hors surfaces artificialisées. Les sols forestiers représentent 38% du stock total, ceux sous prairies permanentes 22%. Malgré un stock par hectare plus faible qu'en prairie permanente, les stocks sous grandes cultures et prairies temporaires représentent 26,5% du stock total du fait de l'importance des surfaces correspondantes.

	Stock de C Horizon 0-30 cm (tC/ha)	Ecart type	Surface (Mha)	Stock total Horizon 0-30 cm (MtC)
Prairie permanente	84,6 ±2,8	35,0	9,3	790
Terres arables (grandes cultures et prairies temporaires)	51,6 ±1,1	16,2	18,4	950
Forêts	81,0 ±2,9	35,4	16,9	1 370
Autres	79,0		6,0	475
TOTAL			50,6	3 585

Tableau 1. Stocks de carbone par mode d'occupation du sol pour l'horizon 0-30 cm (données RMQS - GIS Sol)

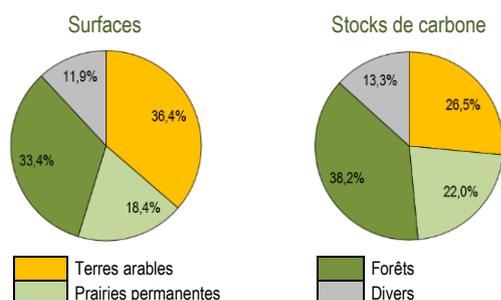


Figure 2. Surfaces et stocks totaux de carbone par grand mode d'occupation des terres, estimés d'après le RMQS

Les surfaces en terres arables incluent les prairies temporaires (< 6 ans) et les prairies artificielles

Stock de carbone des sols, un solde d'entrées et de sorties

Le stock de carbone d'un sol est la somme de ce qui reste de chacun des apports annuels passés. Il dépend donc des flux de carbone entrant, des biotransformations de ce carbone et de ses durées de stabilisation, avant que le carbone ne quitte le sol essentiellement sous forme de CO₂, produit de la respiration des organismes décomposeurs. Les principaux processus qui régulent

la dynamique des matières organiques dans les sols sont synthétisés dans la Figure 3.

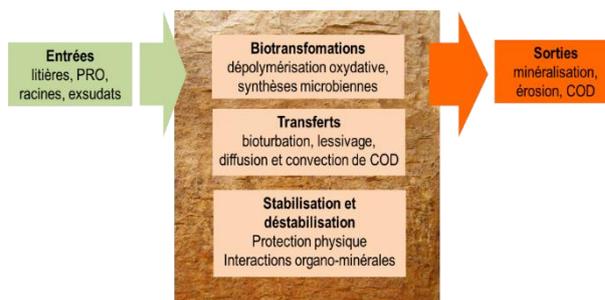


Figure 3. Les différents processus qui contrôlent le stockage de carbone dans les sols (PRO : produit résiduaire organique ; COD : carbone organique dissout)

Stockage et stockage additionnel de carbone

Le **stockage de carbone** est l'augmentation du stock de carbone dans le temps. Il est très largement déterminé par deux paramètres : la quantité de carbone entrant qui va alimenter le pool de carbone du sol, et son temps moyen de résidence avant minéralisation. Un changement de régime d'apport ou de sorties, s'il est pérennisé, va faire évoluer le stock de carbone jusqu'à un équilibre au bout d'un temps théoriquement infini. On définit le **stockage maximal** associé au changement comme la différence entre le futur stock à l'équilibre et le stock initial. Il est donc défini pour un sol donné, sous un climat donné, et un changement de gestion donné.

Le **stockage additionnel** lié à une pratique agricole B est la différence entre le stock de carbone dans un sol sous la pratique B et celui du même sol sous une pratique de référence A, à partir d'un état initial. Le stockage additionnel est donc défini pour deux pratiques, un site donné, et un temps écoulé depuis la différenciation des pratiques (Figure 4). Cette notion constitue le principal choix méthodologique de cette étude : le stockage additionnel lié à un changement de pratique est calculé par différence entre le stock simulé à 30 ans (Encadré 1) sous hypothèse d'adoption de cette pratique et le stock simulé à 30 ans sous hypothèse de maintien des pratiques actuelles, appelée ligne de base.

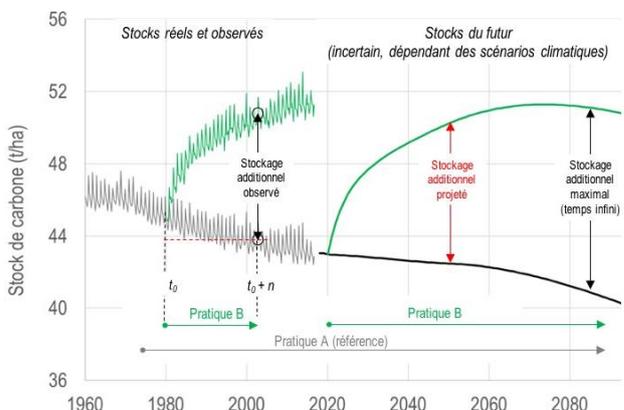


Figure 4. Représentation schématisée des cinétiques de stockage de carbone associées à l'adoption de pratiques en un lieu donné : stockage additionnel observé (à gauche), stockage additionnel projeté (à droite).

Encadré 1. Choix méthodologiques

Le potentiel technique de stockage additionnel de carbone correspond au niveau de stockage qu'il est possible d'atteindre à partir des actions techniquement réalisables sur les surfaces éligibles d'un territoire. Le potentiel économique inclut le stockage permis par les actions techniques et le coût associé à la mise en œuvre de ces actions.

Potentiel technique de stockage

Le potentiel de stockage quantifié dans le cadre de cette étude est le stockage additionnel lié à l'adoption de nouvelles pratiques ou à leur extension, par rapport au stockage (ou déstockage) qui aurait été observé avec la poursuite des pratiques agricoles actuelles. Pour cela, la "ligne de base", correspondant à l'évolution du stock de carbone sous l'effet des pratiques actuelles, a été simulée sur une période de 30 ans et analysée. Alors qu'une approche classique consiste à comparer un état actuel à un état projeté, cette démarche originale de comparaison à un scénario de référence est particulièrement adaptée à l'objectif d'éclairer des politiques publiques. Elle est analogue aux méthodes économiques d'évaluation de projet par référence à un scénario dit contrefactuel.

Les pratiques considérées pour accroître le stockage de carbone dans les sols ont été choisies au titre du stockage additionnel permis d'après la littérature. Les mesures et résultats bibliographiques ne permettant pas de décrire toute la diversité des situations pédoclimatiques du territoire métropolitain, la quantification du potentiel de stockage additionnel de carbone des pratiques a été faite, chaque fois que possible, par simulation à une résolution spatiale fine, de l'ordre du km². Le territoire métropolitain est découpé en unités pédoclimatiques homogènes, dans lesquelles sont identifiés les séquences de culture ou les types de prairies dominants (Figure 5).

Les simulations ont été réalisées en utilisant les modèles STICS en grandes cultures et PaSim en prairie permanente. Ces modèles intègrent une représentation explicite du cycle du carbone dans le système sol-plante-(animal) et rendent compte de l'effet des multiples facteurs pédoclimatiques et des pratiques qui conditionnent l'évolution des stocks de carbone et d'autres variables de sortie d'intérêt (rendement, lixiviation d'azote, émissions de N₂O...). Plusieurs bases de données nationales sur les sols, les climats, les successions de cultures et les pratiques agricoles (travail du sol, fertilisation...) ont été mobilisées pour renseigner les variables d'entrée des modèles.

Pour quelques pratiques stockantes comme l'agroforesterie intra-parcellaire et les haies pour lesquelles on ne disposait pas de modèles adaptés, c'est l'approche classique par extrapolation de valeurs moyennes issues de la littérature qui a été utilisée.

Pour toutes les pratiques stockantes étudiées un bilan gaz à effet de serre complet a été calculé, tenant compte non seulement du stockage additionnel de carbone mais aussi des modifications des autres postes d'émissions (CO₂ lié à l'usage de carburants, N₂O lié aux apports d'azote...).

Les simulations ont été faites sur l'horizon de sol 0-30 cm, du fait de la capacité limitée du modèle STICS à simuler l'évolution du stock de carbone sur toute la profondeur de sol, et parce qu'une information sur l'horizon 0-30 cm permettait plus facilement des comparaisons avec la bibliographie, tout en étant pertinente d'un point de vue agronomique. Sur les résultats agrégés finaux, des calculs de stockage additionnel sur toute la profondeur de sol ont cependant été réalisés car c'est ce qui est le plus pertinent en ter-

mes d'atténuation du changement climatique. Cette extrapolation a été calculée en faisant l'hypothèse que les pratiques stockantes mises en œuvre ne modifiaient pas la répartition verticale du carbone dans le sol, ce qui reste une approximation. Dans le cas particulier du semis direct, on a considéré, à la suite de la revue de la littérature internationale, que le stockage additionnel était en moyenne positif sur l'horizon 0-30 cm, mais nul quand on considère toute la profondeur de sol, ce qui fait que cette pratique n'a pas été prise en compte pour les analyses relatives à l'atténuation.

Les simulations ont été réalisées sur 30 années pour tenir compte du temps de réponse du stockage de carbone aux pratiques mises en œuvre et de la variabilité climatique interannuelle. Les données climatiques utilisées ont été celles de la période 1982-2012. Afin de prendre en compte l'effet du changement climatique sur l'évolution des stocks de carbone, des simulations ont été réalisées sous un deuxième scénario climatique (RCP 8.5 2030-2060).

Potentiel économique de stockage

Comme pour le stockage additionnel de carbone, le coût des pratiques stockantes est un "coût additionnel", correspondant aux variations de dépenses et de recettes associées aux modifications induites par la pratique "stockante" par rapport aux pratiques actuelles (sans prendre en compte toutes les externalités positives, par exemple en lien avec la biodiversité). Le coût calculé est le coût technique pour l'agriculteur ; il peut représenter une perte (coût positif) ou un gain (coût négatif).

Les calculs ont été effectués à l'échelle des anciennes régions administratives en utilisant les données technico-économiques (d'assolement, de prix des produits et des intrants...) disponibles dans des bases de données existantes (Statistique agricole annuelle, Réseau d'information comptable agricole...), moyennées sur la période 2009-2013 afin de lisser les variations interannuelles.

Le modèle d'optimisation de l'effort de stockage mis en œuvre, BANCO, utilise les informations issues des simulations agronomiques et les calculs de coûts. Il permet, pour une cible nationale de stockage donnée, de sélectionner les pratiques à mobiliser, et les régions où le faire, pour atteindre la cible de stockage additionnel fixée en minimisant le coût total. C'est cette procédure qui détermine la part de l'assiette maximale technique sur laquelle une pratique favorable au stockage est effectivement mise en œuvre.

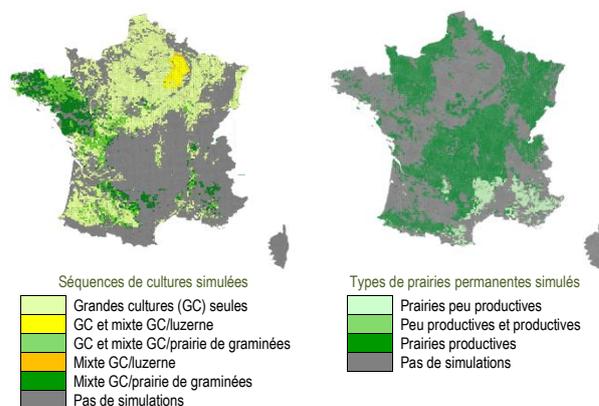


Figure 5. Dispositif de simulation avec le modèle STICS (séquences de grandes cultures, y compris prairies temporaires ; à gauche), et avec le modèle PaSim (prairies permanentes ; à droite)

L'évolution des stocks sous l'effet des pratiques actuelles et de l'histoire récente de l'occupation des sols

Résultats de l'analyse bibliographique

En forêt, l'évolution des stocks de carbone dépend fortement de l'histoire de l'occupation des sols. Le stockage est particulièrement élevé en cas d'afforestation récente sur des sols à teneur initiale faible (anciens sols cultivés). Un calcul d'ordre de grandeur, considérant les surfaces relatives et les valeurs de stockage tendanciel pour cinq catégories de forêt se distinguant par leur ancienneté, conduit à une valeur moyenne de +240 kgC/ha/an (entre +130 et +420 kgC/ha/an).

En prairie permanente la variabilité du taux de stockage de carbone dans les sols est importante, liée à l'âge de la prairie et à la diversité de la nature des sols, des conditions climatiques et des modes de gestion. Le stockage est plus faible dans le cas d'une exploitation par fauche. En se basant sur les données obtenues en régions tempérées le stockage moyen est estimé à +110 kgC/ha/an.

En sols de grandes cultures, une compilation réalisée à l'échelle européenne, rassemblant des données de suivis de longue durée et des modélisations, indique un déstockage moyen de -170 kgC/ha/an pour la période 1967-2007. Cette valeur reflète pour partie l'arrière effet des retournements de prairie intervenus pendant cette période.

Résultats des simulations (ligne de base)

Les simulations de l'évolution des stocks sous l'effet des pratiques actuelles (ligne de base) donnent des chiffres différents de ceux issus de l'analyse bibliographique, mais classent les grands types d'occupation du sol dans le même ordre (-91 kg C/ha/an pour les séquences de grandes cultures pures, +259 kgC/ha/an pour les séquences de grandes cultures incluant des prairies temporaires, avec une moyenne pondérée de +47 kgC/ha/an pour l'ensemble des systèmes de grandes cultures et prairies temporaires ; +189 kgC/ha/an pour les prairies permanentes productives, +396 kgC/ha/an pour les landes et estives, avec une moyenne pondérée pour l'ensemble des prairies permanentes de +212 kgC/ha/an). Aucune simulation n'a été faite pour les forêts (cf. infra). Les écarts entre les résultats issus de la bibliographie et ceux des simulations s'expliquent en partie par les choix d'initialisation du stock de carbone dans les modèles, et également par le fait que les simulations ont été faites à usage du sol constant, alors que les données bibliographiques incluent l'arrière effet de changements d'occupation du sol (retournements de prairies notamment). Il en résulte que la connaissance de l'évolution tendancielle des stocks sous l'effet des pratiques actuelles est très incertaine. Les prochaines campagnes de prélèvements du Réseau de Mesure de la Qualité des Sols permettront de préciser ces évolutions.

Choix des pratiques stockantes retenues

Les écosystèmes forestiers sont caractérisés par des stocks actuellement élevés (81,0 tC/ha), et une tendance à la hausse des stocks (+240 kg C/ha/an en moyenne d'après la bibliographie), en partie explicable par le fait qu'une partie non négligeable des surfaces forestières résulte d'afforestations récentes et n'a pas encore atteint un état d'équilibre. Certaines évolutions de pratiques peuvent avoir un impact négatif sur le stock de carbone des sols (préparation mécanisée du sol avant plantation, contrôle récurrent

du sous-bois, récolte intensive de biomasse, raccourcissement des révolutions...). Dans les forêts anciennes et gérées de France métropolitaine, aucune pratique plus stockante que les pratiques habituelles n'a été identifiée. Les sols forestiers n'ont donc pas fait l'objet de travaux de simulations. Pour les forêts, l'objectif est de conserver les stocks élevés actuels, et de préserver les pratiques sylvicoles permettant de faire perdurer le stockage tendanciel positif.

Les écosystèmes prairiaux de longue durée (prairies permanentes) sont également caractérisés par des stocks élevés (84,6 t/ha), et une tendance à un léger stockage (+110 kgC/ha/an d'après la bibliographie). L'analyse de la littérature a permis d'identifier deux leviers techniques ayant un effet presque toujours positif sur le stockage, et qui ont fait l'objet de simulations :

- Une intensification modérée des prairies extensives, par apport de fertilisants, entraînant une production additionnelle de biomasse qui augmente le retour au sol de résidus végétaux.
- L'exploitation de l'herbe par pâturage plutôt que par fauche, qui a aussi pour effet d'augmenter le retour au sol de résidus du fait de la moindre exploitation de l'herbe (refus par les animaux...) et l'apport des déjections.

Les écosystèmes de grandes cultures (y compris prairies temporaires) et de cultures pérennes sont caractérisés par des stocks plus faibles (51,6 tC/ha en grandes cultures), et une tendance à la baisse (-170 kgC/ha/an d'après la bibliographie). Plusieurs pratiques ont été identifiées dans la littérature comme susceptibles d'apporter un stockage additionnel de carbone dans le sol :

- Le passage au semis direct. Les études les plus récentes concluent à un stockage additionnel dans l'horizon 0-30 cm très faible en climat humide, plus marqué en climat sec. En revanche, le stockage additionnel lié à cette pratique est négligeable quand on considère la totalité du profil de sol. Le semis direct a été simulé sur toutes les séquences ne comportant pas de culture incompatible avec la pratique (betterave, maïs, tournesol), excepté sur sols hydromorphes.
- La mise en place ou l'allongement des cultures intermédiaires, sans exportation de la biomasse produite, dont l'effet est bien établi dans la littérature scientifique. Quasiment toutes les surfaces de grandes cultures sont concernées par ce scénario, soit par l'implantation de cultures intermédiaires là où elles n'existent pas actuellement, soit par l'augmentation de la fréquence des cultures intermédiaires dans la rotation, soit par l'allongement des cultures intermédiaires déjà en place.
- L'accroissement de la part des prairies temporaires dans les successions culturales, par allongement de leur durée ou par introduction en remplacement de la culture de maïs fourrage.
- La mobilisation et l'apport au sol de matières organiques exogènes supplémentaires, comme des composts de produits résiduels organiques, dans la mesure où leur utilisation est conforme à la réglementation et ne pose pas de problème d'acceptabilité sociale.
- Le développement de l'agroforesterie intraparcélaire, par la plantation d'alignements d'arbres (récoltés à 50 ans) sur toutes les parcelles de grandes cultures d'au moins 1 ha et ayant un sol d'au moins 1 m de profondeur.
- La plantation de haies sur les terres arables, autour de parcelles ou d'îlots de parcelles d'au moins 8 ha.
- L'enherbement des inter-rangs en vignoble, permanent ou hivernal (avec des restrictions pour les vignobles de Cognac et du pourtour méditerranéen et les sols à trop forte pierrosité).

Encadré 2. Simulations agronomiques des effets d'une pratique et calcul des coûts : l'exemple de l'implantation ou de l'extension des couverts intermédiaires

Quasiment toute la surface de grandes cultures de la France est concernée par ce scénario, soit via l'implantation de cultures intermédiaires là où elles n'existent pas actuellement (en particulier en dehors des zones vulnérables "Nitrate"), soit via l'augmentation de leur fréquence dans la rotation, soit enfin via l'allongement des couverts déjà en place en retardant leur destruction (Figure 6). Dans les deux cas, toute la biomasse produite est restituée au sol. La surface totale concernée, appelée assiette maximale technique (AMT), est de 16 Mha.

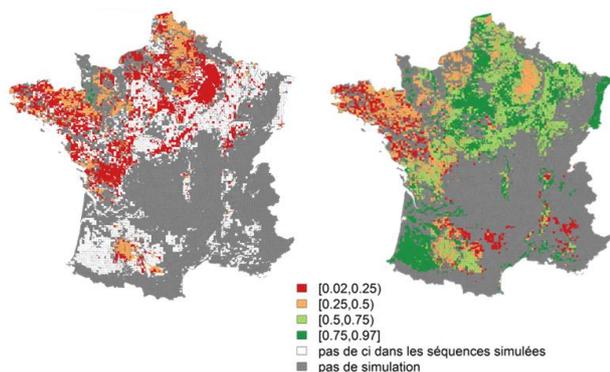


Figure 6. Taux de cultures intermédiaires dans la rotation dans la ligne de base (gauche) et dans le scénario simulé (droite)

En moyenne, le scénario "Insertion et allongement des cultures intermédiaires" permet un stockage additionnel par rapport à la situation actuelle calculé sur l'horizon 0-30 cm de +126 kgC/ha/an soit +2,3% par an, avec un écart-type de 93 kgC/ha/an. Ce niveau, inférieur à celui relevé dans la littérature (+313 kgC/ha/an), est lié au fait que les valeurs de la bibliographie comparent des situations avec et sans cultures intermédiaires, alors que la valeur de stockage additionnel calculée ici prend pour point de comparaison la ligne de base dans laquelle les cultures intermédiaires sont déjà fortement présentes. La Bretagne, les Pays-de-la-Loire et l'extrême Nord se démarquent par un stockage additionnel plus faible (< 50 kgC/ha/an) pour deux raisons : une extension des cultures intermédiaires souvent limitée à l'allongement des couverts préexistants et, dans l'Ouest, la présence importante des prairies temporaires qui réduit la fréquence des cultures intermédiaires (Figure 7). Le stockage est plus important dans le Bassin Parisien et en Poitou-Charentes, grâce à l'ajout de cultures intermédiaires en interculture d'été.

La mise en œuvre de cette pratique induit des coûts directs (semis et destruction du couvert) et des coûts indirects dus à la modification du rendement de la culture suivante. Ces coûts varient selon les régions, avec une moyenne nationale de 39 €/ha/an. Le coût de la tonne de C stockée grâce à cette pratique s'élève en

moyenne à 307 €/tC sur l'horizon 0-30 cm, et à 180 €/tC sur l'ensemble du profil de sol (soit 49 €/tCO_{2e}). Sa mise en œuvre sur l'ensemble des surfaces éligibles représente un coût total de 619 M€. Les possibilités d'expansion des cultures intermédiaires sont importantes dans les zones de grandes cultures ou de polyculture, et très faibles dans les zones de prairies permanentes. Le coût de stockage de la tonne de carbone dépend essentiellement de l'efficacité du stockage : dans les régions à stock de carbone élevé ou comportant des prairies temporaires dans la rotation (Bretagne, Pays de Loire), le stockage additionnel est faible, et son coût rapporté à la tonne de carbone stockée est élevé. A l'inverse, dans les régions de grandes cultures où les stocks sont faibles (grand bassin parisien), le stockage additionnel est plus important et le coût par tonne de carbone stockée est relativement faible (Figure 8).

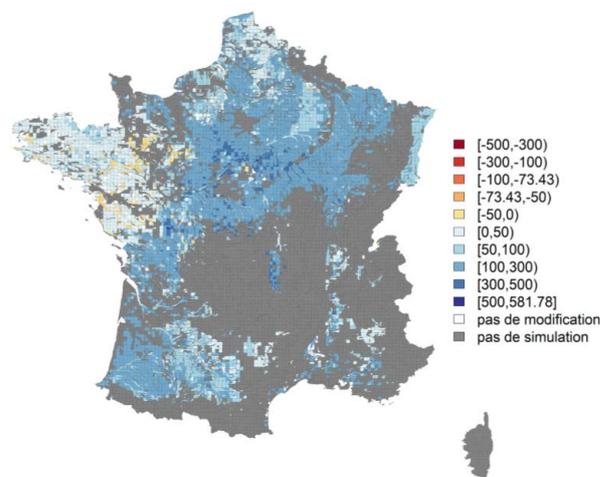


Figure 7. Stockage additionnel absolu (kgC/ha/an) sur 0-30 cm avec le scénario "Insertion et allongement des cultures intermédiaires"

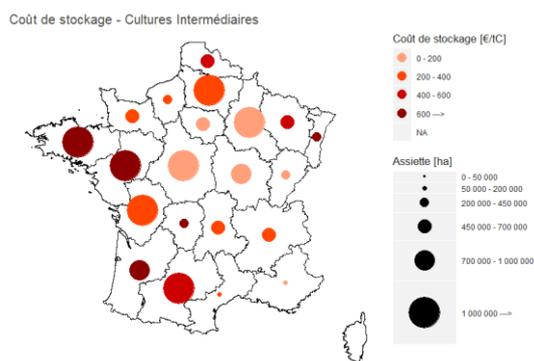


Figure 8. Coût de la tonne de C stockée (€/tC) et Assiette maximale technique (ha) de la pratique, par région

Synthèse des résultats agronomiques obtenus

Le Tableau 2 indique, par grand mode d'occupation du sol, le stockage additionnel calculé pour chaque pratique stockante étudiée (exprimé en kg de carbone par hectare sur lequel la pratique est mise en œuvre et par an), l'assiette correspondante (en Mha) et le stockage additionnel calculé pour la France entière (en Mt/an). Le stockage additionnel relatif (exprimé en % par an) est calculé pour chaque mode d'occupation du sol et globalement.

Sur l'ensemble des surfaces agricoles et forestières considérées dans l'étude, le stockage additionnel de carbone sur l'horizon 0-30 cm permis par l'adoption des neuf pratiques stockantes retenues est de 5,69 MtC/an, soit un stockage additionnel par rapport à la ligne de base de +1,8% par an pour l'ensemble des surfaces agricoles et forestières (+3,2% pour les surfaces agricoles seules, +5,1% si on se limite aux seules grandes cultures).

Tableau 2. Stockage additionnel par pratique

	Stockage additionnel par ha d'assiette Horizon 0-30 cm kgC/ha/an	Assiette Mha	Stockage additionnel France entière Horizon 0-30 cm MtC/an	Stockage additionnel, rapporté au stock du mode d'occupation du sol correspondant ‰ /an
En grandes cultures et prairies temporaires				
Extension des cultures intermédiaires	+126	16,03	+2,019	
Semis direct	+60	11,29	+0,677	
Nouvelles ressources organiques	+57	1,46	+0,084	
Insertion et allongement de prairies temporaires	+127	6,63	+0,840	
Agroforesterie intraparcellaire	+207	5,33	+1,103	
Haies	+17	8,83	+0,150	
Total grandes cultures			+4,873 (85,6%)	+5,1
En prairie permanente				
Intensification modérée	+176	3,94	+0,694	
Remplacement fauche-pâture	+265	0,09	+0,023	
Total prairies permanentes			+0,717 (12,6%)	+0,9
En vignoble				
Enherbement	+182	0,56	+0,103	
Total vignoble			+0,103 (1,8%)	+3,7
En forêt				
Pas d'identification de pratique plus stockante que les pratiques actuelles	-	-	-	-
Total forêt			-	-
Total France (hors surfaces artificialisées et divers)			5,693 (100%)	+1,8

Le potentiel de stockage additionnel par adoption de pratiques stockantes se trouve très majoritairement dans les systèmes de grandes cultures, qui représentent à eux seuls 86% du potentiel total. Les possibilités de stockage additionnel par adoption de pratiques stockantes sont beaucoup plus faibles en prairie permanente (12,6% du total). Le potentiel de stockage additionnel unitaire par enherbement est significatif en vignoble (+182 kgC/ha/an) mais faible à l'échelle de la France entière du fait de l'assiette réduite. Enfin, rappelons que l'analyse bibliographique n'a pas permis d'identifier de pratiques plus stockantes que les pratiques actuelles en forêts.

Le Tableau 3 récapitule les résultats de stockage de la ligne de base et du stockage additionnel permis par l'adoption de pratiques stockantes, par grand mode d'occupation du sol. Compte tenu des écarts entre les résultats de l'analyse bibliographique et les simulations concernant la ligne de base, une fourchette est indiquée utilisant les deux valeurs. Pour les forêts, les deux valeurs sont des estimations basses et hautes issues de la littérature.

Tous modes d'occupation du sol confondus, la ligne de base se situe entre 0,0‰ et +3,2‰ par an. Elle est négative à légèrement positive pour les systèmes de grandes cultures, avec des valeurs simulées négatives pour les systèmes de grandes cultures pures

Tableau 3. Stockage tendanciel et additionnel par catégorie d'occupation des sols

	Surfaces Mha	Stock agrégé France entière Horizon 0-30 cm MtC	Stockage ligne de base		Stockage additionnel relatif permis par l'adoption de pratiques stockantes ‰/an	Stockage total (ligne de base + additionnel lié à l'adoption de pratiques stockantes), en relatif	
			Valeur littérature	Valeur simulations		Valeur littérature	Valeur simulations
			kgC/ha/an	‰/an		‰/an	‰/an
Grandes cultures et prairies temporaires	18,4	950	-170 +47	-3,3 +0,9	+5,1	+1,8 +6,0	
Prairies permanentes	9,3	790	+110 +212	+1,3 +2,5	+0,9	+2,2 +3,4	
Vignes	0,8	27	0	0,00	+3,7	+3,7	
Forêts	16,9	1370	+130 +420 (2)	+1,6 +5,2 (2)	-	+1,6 +5,2 (2)	
Total (1)	45,4	3137		0,0 +3,2	+1,8	1,8 5,0	

(1) Les valeurs de surfaces et de stocks agrégés au niveau France entière sont inférieures à celles indiquées dans le Tableau 1 et la Figure 2 car elles n'incluent pas la catégorie "Autres"

(2) Pour les forêts, les deux valeurs basse et haute sont issues de la littérature scientifique.

et des valeurs légèrement positives pour les systèmes associant grandes cultures et prairies temporaires. La ligne de base est positive pour les prairies permanentes et les forêts. En ajoutant la ligne de base et le stockage additionnel permis par l'adoption de pratiques stockantes, le stockage relatif total se situe entre +1,8‰ et +5,0‰ par an pour l'ensemble des surfaces agricoles et forestières.

Coût technique des pratiques stockantes

Le Tableau 4 regroupe l'ensemble des informations concernant les coûts : le coût unitaire de chaque pratique (en €/ha/an) qui, multiplié par l'assiette maximale technique (AMT), permet de calculer un coût total à l'année pour chaque pratique ; ce même coût unitaire, rapporté au stockage additionnel, donne pour chaque pratique un coût de la tonne de carbone stockée. Ces coûts sont ici exprimés en moyenne nationale. Ils présentent néanmoins une grande variabilité interrégionale, due aussi bien à la variabilité du stockage additionnel qu'à la variabilité des pertes ou gains de revenus liés à la mise en œuvre de la pratique stockante. Cette variabilité a été prise en considération dans les calculs mobilisés pour classer les pratiques en termes d'efficacité-coût. Elle est

importante pour toutes les pratiques, sauf l'enherbement des vignobles. Pour l'analyse économique, le stockage additionnel sur l'ensemble du profil de sol a été considéré. Le semis direct a été exclu car n'apportant pas de stockage additionnel de carbone quand on considère l'ensemble du profil de sol mais seulement une redistribution verticale.

Sur les huit pratiques retenues, une seule est à coût négatif (enherbement des vignobles permanent ou hivernal, 2% du potentiel de stockage additionnel), quatre sont à coût modéré (remplacement fauche-pâture; mobilisation de nouvelles ressources organiques; intensification modérée des prairies; cultures intermédiaires; <250 €/t C ; 53% du potentiel de stockage), trois sont à coût élevé (insertion et allongement des prairies temporaires; agroforesterie intra-parcellaire ; haies ; >300 €/t C ; 45% du potentiel de stockage additionnel). Ces coûts de stockage seraient réduits pour ces deux dernières pratiques si on considérait également le stockage dans la biomasse, sans même considérer le bilan de GES complet.

Les AMT, les coûts techniques unitaires et les valeurs de stockage additionnel par hectare ont été utilisés pour générer une courbe de coût marginal de stockage additionnel en France métropolitaine calculé sur l'ensemble du profil de sol.

Tableau 4. Récapitulatif des coûts par pratique, en moyenne au niveau national, selon que l'horizon de stockage considéré est 0-30 cm ou l'ensemble du profil

	Coût technique unitaire (€/ha/an)	Assiette maximale technique (Mha)	Coût total (M€/an)	Horizon 0-30 cm	Ensemble du profil de sol	
				Coût de stockage de la tonne de C (€/tC)	Coût de stockage de la tonne de C (€/tC)	
Extension des cultures intermédiaires	39	16,03	619	307	180	
(Semis direct)	13	11,29	142	210		
Nouvelles ressources organiques	22,6	1,46	33	397	231	
Insertion et allongement des prairies temporaires	91	6,63	602	712	423	
Agroforesterie intraparcellaire	118	5,33	628	570	302	
Haies	73	8,83	645	4 380	2 322	
Intensification modérée des prairies permanentes	28	3,94	109	157	130	
Remplacement fauche-pâture en prairies permanentes	73	0,09	6	277	203	
Enherbement des inter-rangs (vignobles)	permanent	-26	0,15	-4	-106	-56
	hivernal	-15	0,41	-6	-96	-51

Allocation coût-efficace de l'effort de stockage

La courbe de coût marginal de stockage additionnel (Figure 9), construite à l'aide du modèle d'allocation coût-efficace de l'effort de stockage BANCO, a été analysée en plusieurs points d'intérêt :

- 0 €/tC (A sur la courbe) : c'est-à-dire sans incitation à stocker du carbone ;
- 91,75 €/tC \equiv 25 €/tCO₂e (B) : prix actuel sur le marché d'échange de quota de carbone européen, qui n'inclut pas le secteur agricole ;
- 201,70 €/tC \equiv 55 €/tCO₂e (C) : prix de la composante carbone de la Contribution Climat-Energie (CCE) initialement prévu en 2019, et valeur tutélaire actuelle du carbone ;
- 917,50 €/tC \equiv 250 €/tCO₂e (D) : valeur tutélaire 2030 du carbone en France (Commission Quinet, 2019, valorisation monétaire des émissions de CO₂ utilisée pour évaluer la rentabilité des investissements publics) ;
- Stockage additionnel maximal (E).

Sans incitation, pour un prix du carbone nul (0 €/tC), ce qui correspond à la poursuite des conditions actuelles de production, le stockage additionnel obtenu est faible (0,29 MtC/an) pour un gain total de 34 M€/an pour les agriculteurs. Les pratiques contribuant au stockage additionnel dans toutes les régions sont l'enherbement permanent et hivernal des inter-rangs dans les vignobles, sous réserve que les freins à l'adoption soient levés (Figures 10 et 11). L'apport de NRO (régions Ile-de-France, Franche-Comté, Midi-Pyrénées et Provence-Alpes-Côte d'azur), la substitution fauche-pâturage en prairies permanentes (Basse-Normandie, Bretagne, Midi-Pyrénées et Languedoc-Roussillon) et l'introduction et l'allongement des prairies temporaires (Languedoc Roussillon et Bourgogne), sont également mises en œuvre dans les régions où elles ont un coût négatif.

En valorisant la tonne de carbone additionnelle stockée dans le sol à 55 €/tCO₂e, soit 201,7 €/tC, le stockage additionnel est multiplié

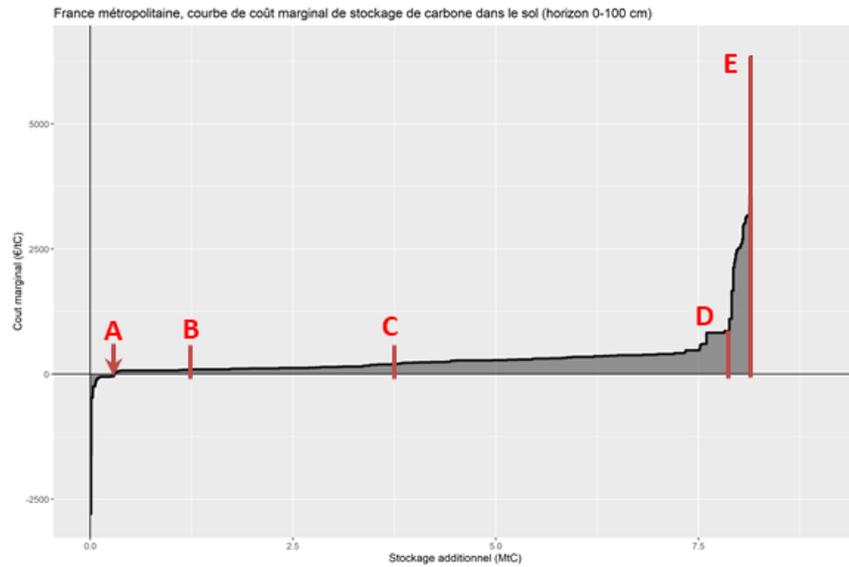


Figure 9. Courbe de coût marginal de stockage dans le sol ((sur l'ensemble du profil de sol))

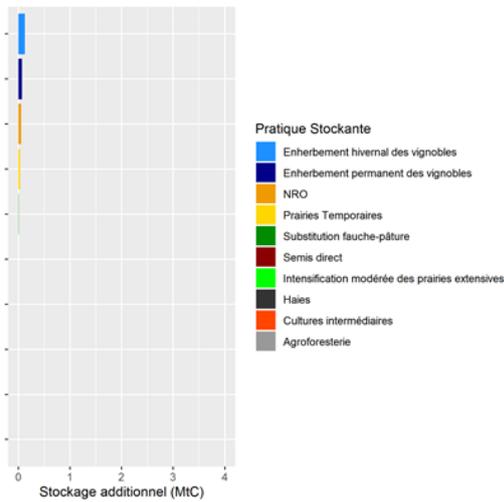


Figure 10. Contribution des pratiques au stockage additionnel obtenu pour un prix du carbone de 0 €/tCO_{2e}

A

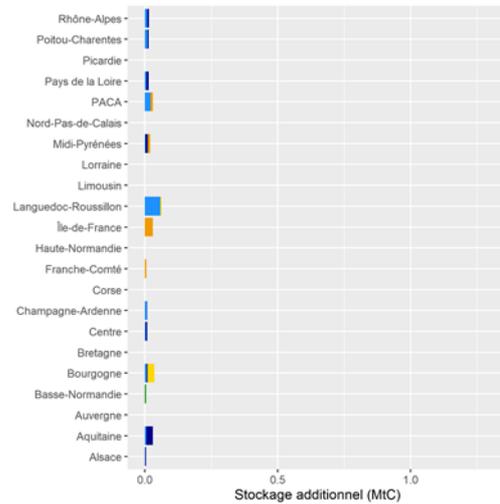


Figure 11. Contribution des régions au stockage additionnel, et détail par pratique, pour un prix de 0 €/tCO_{2e}

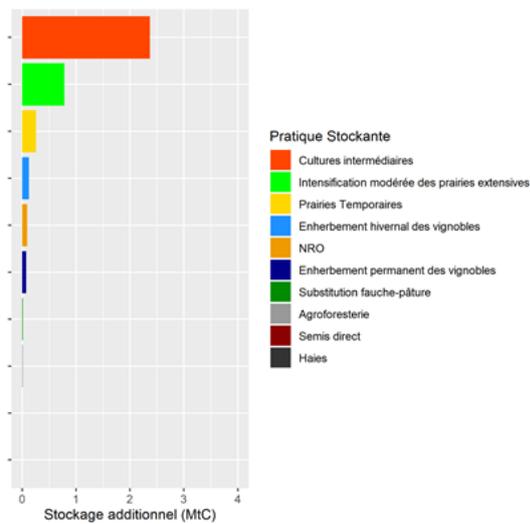


Figure 12. Contribution des pratiques au stockage additionnel obtenu au prix de la composante carbone de la CCE 55€/tCO_{2e}

C

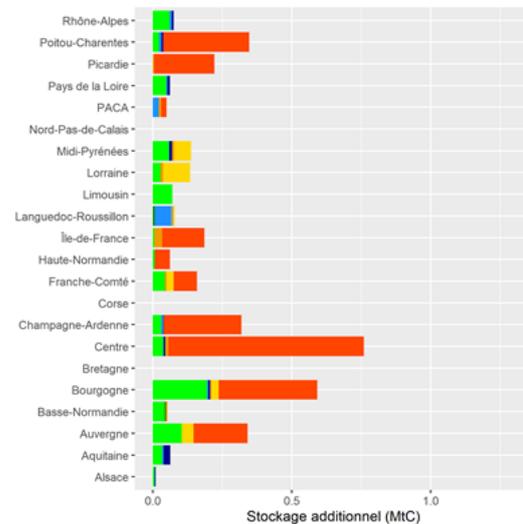


Figure 13. Contribution des régions au stockage additionnel, et détail par pratique, au prix de la composante carbone de la CCE 55€/tCO_{2e}

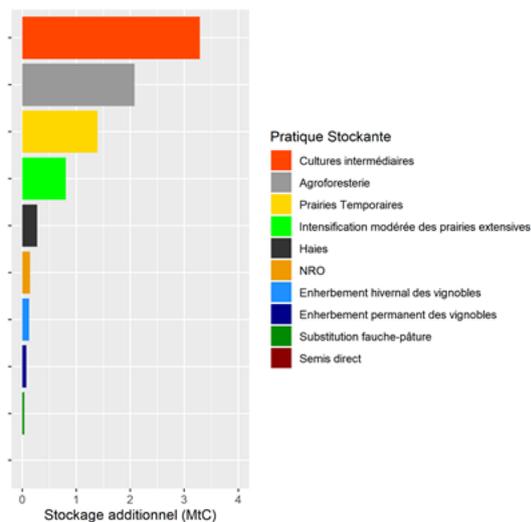


Figure 14. Contribution des pratiques au stockage additionnel maximal

E

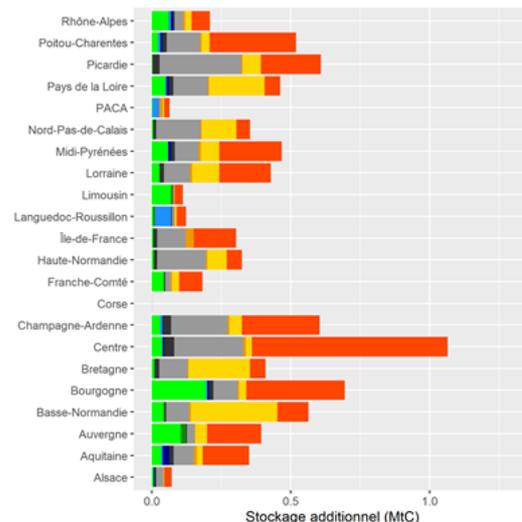


Figure 15. Contribution des régions au stockage additionnel maximal, et détail par pratique

par 13 et atteint 3,7 MtC/an pour un coût total de 359 M€/an pour les agriculteurs au niveau national. Les pratiques portant sur l'extension des cultures intermédiaires, l'intensification modérée des prairies permanentes et l'agroforesterie intra-parcellaire font leur entrée. L'extension des cultures intermédiaires (64%), l'intensification modérée des prairies permanentes (21%) et l'insertion et l'allongement des prairies temporaires (7%) contribuent le plus au stockage additionnel (Figures 12 et 13). Celui-ci est situé à 79% sur les terres de grandes cultures et le vignoble, et à 21% sur les prairies permanentes. On extrait ainsi 13,6 MtCO₂e/an de l'atmosphère, mais ce bilan est diminué d'environ 20% par la prise en compte des autres postes d'émissions de GES, principalement du fait de l'intensification modérée des prairies permanentes dont le bilan net est émetteur.

Enfin, le potentiel maximal de stockage additionnel au niveau national atteint 8,15 MtC/an. Mais il est obtenu pour un coût de la dernière tonne stockée de 6 364 €/tC/an et un coût total de 2 568 M€/an. Toutes les pratiques sont mobilisées. Les surfaces en grandes cultures sont à l'origine de 87% du stockage additionnel national (90% si l'on compte les vignes), et les prairies permanentes 10% (Figures 14 et 15). Ce potentiel maximal permet d'extraire 29,9 MtCO₂e/an de l'atmosphère, bilan qui est amélioré de +94% si l'on prend en compte les autres postes d'émissions de GES.

Principaux enseignements de l'étude

Le stock de carbone organique des sols français sur l'horizon 0- 30 cm représente 3 580 MtC (soit 13 400 MtCO₂). Ces stocks dépendent fortement du mode d'occupation du sol, en interaction avec le pédoclimat. Les sols forestiers représentent 38% du stock total, les sols de prairies permanentes 22%, ceux de grandes cultures 26,5%. Pour l'ensemble des surfaces agricoles et forestières, l'évolution des stocks sous l'effet des pratiques actuelles estimée par simulation et à partir de références bibliographiques se situe dans une fourchette entre 0 et +3,2% par an. La tendance est négative pour les systèmes de grandes cultures pures, légèrement positive pour les systèmes associant grandes cultures et prairies temporaires, plus clairement positive pour les prairies permanentes et les forêts. Les valeurs simulées classent les grands modes d'occupation du sol dans le même ordre

que les résultats bibliographiques mais les valeurs absolues diffèrent, notamment parce que les simulations ont été faites sous hypothèses d'usage des sols constant. L'incertitude sur la ligne de base est forte. Les prochaines campagnes de prélèvement du Réseau de mesure de la qualité des sols sont essentielles pour préciser ces valeurs.

La mise en œuvre des neuf pratiques stockantes explorées dans le cadre de cette étude, simulées sur 30 ans, sous climat actuel, sans modification de l'occupation des sols et sans transformation profonde des exploitations agricoles, permettrait un stockage additionnel annuel de +1,8% tous usages du sol confondus. L'essentiel du potentiel de stockage additionnel se situe en sols de grandes cultures, où le stockage additionnel pourrait dépasser la cible des 4 pour 1000, ce qui est en grande partie dû au fait que les stocks hérités y sont bas. En forêt, aucune pratique "plus" stockante que les pratiques actuelles n'a été identifiée. L'enjeu pour les écosystèmes forestiers est de préserver les stocks existants et les modes de conduites sylvicoles permettant le maintien d'un stockage tendanciel positif. En prairies permanentes, les pratiques étudiées se caractérisent par une assiette faible ou un stockage additionnel limité avec un bilan de GES global peu favorable. L'enjeu est également de préserver les stocks existants et les pratiques actuelles stockantes. Toutefois, le potentiel de stockage pourrait augmenter si l'on renonçait à maintenir le chargement animal actuel (hypothèse non considérée par l'étude). En ajoutant le stockage tendanciel et le stockage additionnel permis par l'adoption de pratiques plus stockantes, il est possible d'atteindre un stockage total se situant entre +1,8 et +5,0% pour l'ensemble des sols agricoles et forestiers. Il n'est donc pas exclu que l'on puisse atteindre l'objectif du 4 pour 1000 dans les sols français, mais les incertitudes sur la ligne de base sont actuellement trop fortes pour pouvoir l'affirmer. Quoi qu'il en soit, maximiser le stockage suppose à la fois de maintenir les surfaces et les pratiques favorables sur les écosystèmes présentant un stockage tendanciel positif (forêts et prairies permanentes) et de mettre en œuvre l'ensemble des pratiques stockantes sur la totalité de leur assiette technique en grandes cultures et prairies, ce qui est extrêmement ambitieux. Dans tous les cas, il faudra à terme pérenniser les pratiques stockantes pour pérenniser les stocks. Il serait par ailleurs indispensable de stopper les changements d'usage du sol qui réduisent les stocks comme le retournement des prairies et l'artificialisation des terres agricoles.

Les pratiques stockantes avec les plus forts potentiels de stockage additionnel sont l'extension des cultures intermédiaires (36% du potentiel total), l'agroforesterie intraparcellaire (20% du potentiel total), l'insertion et l'allongement du temps de présence de prairies temporaires (13% du potentiel total). Le semis direct permet un stockage additionnel dans l'horizon labouré, mais cet effet disparaît quand on considère l'ensemble du profil (du fait de la redistribution verticale du carbone). La mobilisation de nouvelles ressources organiques ne représente que 1,5% du potentiel de stockage additionnel total, mais l'assiette a été calculée avec prudence pour tenir compte des réticences au recyclage agricole de certaines ressources (boues de stations d'épuration). Le calcul du bilan de GES complet des pratiques étudiées renforce l'intérêt des leviers "agroforesterie", "haies" et "prairies temporaires" mais réduit l'intérêt de l'intensification modérée des prairies extensives.

Calculé sur la totalité du profil de sol, donc en excluant le semis direct, l'ensemble des pratiques étudiées mises en œuvre sur la totalité de leur assiette maximale technique représente un stockage additionnel de 8,15 MtC/an, (soit 29,9 MtCO_{2e}/an). Cela équivaut à 6,5% des émissions nationales (458 MtCO_{2e} en 2016) et 39% des émissions agricoles (76,7 MtCO_{2e} en 2016, hors usage énergie et changement d'usage des sols), ce qui conforte l'importance de la réduction des émissions car les puits ne compenseront pas tout. Des évolutions des systèmes agricoles sont nécessaires pour réduire les émissions de gaz à effet de serre (N₂O et CH₄), aller plus loin en termes de stockage additionnel de carbone dans les sols, et assurer d'autres services (protection de la biodiversité, amélioration de la qualité de l'eau et de l'air...).

Globalement, la mise en œuvre de pratiques stockantes se traduit par un coût pour l'agriculteur. L'essentiel du potentiel de stockage additionnel est à un coût inférieur à la valeur tutélaire 2030 du carbone (250 €/tCO_{2e}), dont presque la moitié à un coût inférieur à sa valeur tutélaire actuelle (55 €/tCO_{2e}). Ces coûts ont été estimés d'après les données disponibles, la plupart du temps à l'échelle régionale mais aussi, dans certains cas, avec des données moyennes nationales. Ces calculs pourront être affinés avec des données locales quand elles seront disponibles. Les coûts calculés n'intègrent pas les coûts de transaction. Enfin, au-delà du coût, leur mise en œuvre nécessite de tenir compte des contraintes organisationnelles au sein des exploitations, ce qui demande une approche plus systémique du changement technique dans les exploitations agricoles.

L'étude a mis en évidence que les potentiels de stockage additionnel, les assiettes et les coûts varient entre les pratiques et d'une région à l'autre. La solution la plus efficace est donc une combinaison de "bonnes pratiques aux bons endroits", où chaque région contribue en fonction de ses caractéristiques. Les résultats du modèle d'allocation coût-efficace de l'effort de stockage additionnel ont vocation à être utilisés pour élaborer des politiques publiques en éclairant les décideurs publics sur les pratiques à soutenir prioritairement et dans quelles régions.

Une politique incitative devra veiller à l'équilibre entre des mesures visant à l'entretien des stocks là où ils sont élevés, voire très élevés comme les sols organiques (tourbières) et celles visant l'augmentation des stocks là où ils sont faibles. Dans les deux cas, elle devra prendre en compte le caractère réversible du stockage de carbone : à long terme, la pérennité du stock de carbone des sols dépend du maintien des pratiques stockantes. Par ailleurs, la plupart des pratiques proposées pour stocker du carbone dans les sols apportent d'autres bénéfices aux agriculteurs et à la société que la seule atténuation du changement climatique, à l'image de l'agroforesterie ou des cultures intermédiaires. Certaines pratiques peuvent avoir des effets négatifs. En effet, l'accroissement de la couverture végétale du sol (cultures intermédiaires, prairies,

agroforesterie) entraîne une réduction de la lame d'eau drainée annuelle (qui alimente les nappes phréatiques) qu'il conviendrait de quantifier précisément. Des politiques cohérentes et ambitieuses doivent prendre en compte l'ensemble de ces effets et s'assurer de leur compatibilité avec d'autres politiques publiques, notamment celles visant à utiliser davantage la biomasse produite, ce qui a inévitablement des effets sur le retour de carbone au sol et l'évolution des stocks.

Besoins de recherche

La modélisation à une échelle spatiale fine (de l'ordre du km²), couplée à l'utilisation massive de données sur les climats, les sols et les systèmes agricoles, est une approche innovante pour évaluer le potentiel de stockage additionnel permis par l'adoption de nouvelles pratiques agricoles. Elle permet de prendre en compte les interactions complexes dont dépendent les entrées et le devenir du carbone dans les sols. Elle valorise à la fois les progrès des connaissances capitalisés dans le cadre des modèles de fonctionnement des écosystèmes et les bases de données constituées pour renseigner les variables d'entrée. La méthode mise en œuvre dans le cadre de cette étude est originale et reproductible, elle pourrait être utilisée dans d'autres contextes à l'international. *A contrario*, les résultats sont très dépendants de la qualité des modèles, de leur paramétrage et des données d'entrées comme le stock de carbone initial. Des progrès sont nécessaires pour mieux simuler l'évolution du stock de carbone dans les horizons profonds et prendre en compte de nouveaux mécanismes (le "*priming effect*" par exemple). Les résultats des prochaines campagnes de prélèvement du Réseau de mesure de la qualité des sols seront très précieux pour renseigner l'évolution des stocks de carbone sous l'effet des pratiques actuelles sur l'ensemble du territoire (ligne de base) et la capacité des modèles à en rendre compte. De façon plus fondamentale, les mécanismes qui contrôlent le stockage ou le déstockage du C, ainsi que les modifications de ces mécanismes en réponse aux changements de pratiques et d'usages des sols méritent encore beaucoup d'efforts de recherche, susceptibles à terme de déboucher sur des innovations dans la gestion du carbone des sols.

La plupart des pratiques identifiées pour accroître les stocks de carbone du sol sont basées sur la production additionnelle de biomasse et/ou un accroissement de son retour au sol (cultures intermédiaires, agroforesterie intra-parcellaire, haies, mobilisation de nouvelles ressources organiques). L'accroissement des stocks de carbone est un levier pour l'atténuation du changement climatique, mais la valorisation de la biomasse pour la production d'énergie renouvelable est également une option possible. Dans un contexte de développement de la bioéconomie, et d'une compétition accrue pour l'utilisation de la biomasse, l'intérêt comparé de différentes filières de valorisation de cette ressource, dont le retour au sol, est une question de recherche dont il faut s'emparer. Parallèlement, l'innocuité des nouvelles ressources organiques mobilisables pour un retour au sol (boues de stations d'épuration, digestats de méthanisation, composts) vis-à-vis de la qualité des sols et de la sécurité sanitaire des aliments doit être mieux caractérisée et améliorée.

En plus d'un stockage additionnel de carbone, plusieurs des pratiques proposées présentent des co-bénéfices. C'est le cas des cultures intermédiaires, qui améliorent la qualité de l'eau et contribuent aussi à l'atténuation du changement climatique via des effets biogéophysiques (ex. effets albédo), ou encore de l'agroforesterie intra-parcellaire et des haies qui ont un effet positif sur la protection de la biodiversité, sur l'esthétique des paysages et la réduction du risque érosif lié au ruissellement. Dans le cadre

de la présente étude, portant sur le stockage de carbone dans les sols, ces autres services n'ont pas été monétarisés, faisant porter sur le seul stockage de carbone l'ensemble des coûts de mise en place et d'entretien de ces infrastructures. Des progrès sont nécessaires pour considérer et évaluer l'ensemble des services écosystémiques rendus.

Même avec des hypothèses de calcul optimistes, le stockage additionnel de carbone obtenu par la mise en œuvre des pratiques proposées ne compense que partiellement les émissions du secteur agricole. Ce constat renforce la nécessité d'explorer la réduction des émissions de gaz à effet de serre, N₂O lié à l'usage des engrais azotés de synthèse, CH₄ lié à l'élevage. Il met aussi en exergue le besoin d'explorer des évolutions plus radicales des systèmes de production agricole (usage des sols, ré-association agriculture-élevage, chargement animal), en lien avec le développement de l'agro-écologie et l'évolution des régimes alimentaires.

Le stockage additionnel de carbone, comme les autres leviers d'atténuation des émissions de gaz à effet de serre du secteur agricole et forestier, doit être envisagé dans le cadre du changement climatique qui va de toute façon se poursuivre, avec des effets importants non seulement sur la dynamique du carbone, mais aussi sur l'usage des sols, les systèmes de production et les pratiques. Des simulations doivent être menées sous plusieurs scénarios climatiques et, au-delà, les leviers d'atténuation doivent être examinés dans le cadre d'une agriculture qui se serait adaptée.

Il y a au final un besoin de prospective pour disposer de scénarios des systèmes de production agricole à différents niveaux (national, européen et mondial) et de modélisation des systèmes de production actuels et alternatifs, pour pouvoir simuler les effets économiques et environnementaux des changements de système. Il nous faut développer des modèles de marchés et d'échanges capables de rendre compte des principaux déterminants de l'avenir des systèmes de production agricoles et sylvicoles tels que

l'évolution des régimes alimentaires, des usages non alimentaires de la biomasse, les besoins des industries de transformation et de distribution, les politiques publiques et les échanges internationaux.

Démarche et auteurs de l'étude

L'étude a été conduite à la demande de l'ADEME et du Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation sous la responsabilité de l'INRA, dans le cadre des activités de la **Délégation à l'Expertise scientifique collective, à la Prospective et aux Etudes (DEPE)** de l'INRA, et en respecte les principes de compétence, pluralité, impartialité, transparence, tels que formalisés dans la Charte INRA de l'Expertise Scientifique Institutionnelle.

L'étude a mobilisé trente experts scientifiques principaux, huit experts contributeurs ponctuels et quatre chargés d'étude.

Le rapport d'étude complet, le document de synthèse et le présent résumé sont disponibles sur le site de l'INRA (www.inra.fr).

Pour en savoir plus :

Sylvain Pellerin et Laure Bamière (pilotes scientifiques), 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 Thérond, Valérie Viaud, Régis Grateau, Sophie Le Perchech, Isabelle Savini, Olivier Réchauchère (coordinateur), 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.

