

Stocker du carbone dans les sols français

Quel potentiel et à quel coût ?

S. Pellerin, L. Bamière, I. Savini, O. Réchauchère, coord.



Stocker du carbone dans les sols français

Quel potentiel au regard de l'objectif
4 pour 1 000 et à quel coût ?

*Sylvain Pellerin, Laure Bamière, Isabelle Savini,
Olivier Réchauchère, coord.,*

*et le comité d'experts scientifiques mobilisé
par la Direction de l'expertise scientifique collective,
de la prospective et des études d'INRAE*

Éditions Quæ

Collection Matière à débattre et décider

Qualité des aliments d'origine animale. Production et transformation
S. Prache, V. Santé-Lhoutellier, C. Donnars, coord.
2021, 170 p.

Les sols urbains sont-ils cultivables ?
C. Mougin, F. Douay, M. Canavese, T. Lebeau, É. Rémy, coord.
2020, 228 p.

Filière forêt-bois et atténuation du changement climatique,
A. Roux, A. Colin, J.-F. Dhôte, B. Schmitt, coord.
2020, 152 p.

Quelle politique agricole commune demain ?
C. Détang-Dessendre, H. Guyomard, coord.
2020, 306 p.

Agriculture et gaz à effet de serre.
Dix actions pour réduire les émissions
S. Pellerin, L. Bamière, L. Pardon, coord.
2015, 200 p.

© Éditions Quæ, 2021

Photo de couverture : © Florent/Adobe Stock

ISBN papier : 978-2-7592-3148-5
ISBN PDF : 978-2-7592-3149-2
ISBN ePub : 978-2-7592-3150-8
ISSN : 2115-1229

Éditions Quæ
RD 10
78026 Versailles Cedex
www.quae.com
www.quae-open.com

Ouvrage financé par la DEPE et sous licence CC-by-NC-ND



Ouvrage issu du rapport de l'étude « 4 pour 1 000 France »

Le présent ouvrage est une synthèse du rapport de l'étude scientifique conduite par la Direction de l'expertise scientifique collective, à la prospective et aux études d'INRAE. Cette étude a été sollicitée conjointement par l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (Ademe) et le ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation (MAA), convention n° 1660C0020. Le Centre d'accès sécurisé aux données (CASD) a permis l'accès au Réseau d'information comptable agricole (RICA)¹.

Le contenu du rapport et du document de synthèse publiés lors de la présentation des principaux résultats de l'étude en juin 2019, ainsi que du présent ouvrage, n'engage que la responsabilité de leurs auteurs. Le rapport d'étude, source du document de synthèse et de cet ouvrage, a été élaboré par les experts scientifiques sans condition d'approbation préalable par les commanditaires ou l'Inra.

Ces documents sont disponibles sur le site institutionnel d'INRAE (www.inrae.fr).

Pour citer ce document :

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 Gatal, 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 Perche, Isabelle Savini, Olivier Réchauchère, 2021. *Stocker du carbone dans les sols français. Quel potentiel au regard de l'objectif 4 pour 1 000 et à quel coût ?* Éditions Quæ, Versailles, 232 p.

Contacts :

Sylvain Pellerin : sylvain.pellerin@inrae.fr

Laure Bamière : laure.bamiere@inrae.fr

Olivier Réchauchère : olivier.rechauchere@inrae.fr

1. Le CASD est un groupement d'intérêt public qui a pour objet principal de mettre en œuvre des services d'accès sécurisé pour les données confidentielles à des fins de recherche. Il est financé sur des fonds publics et, de ce fait, la présente étude a bénéficié d'une aide de l'État gérée par l'Agence nationale de la recherche au titre du Programme d'investissements d'avenir portant référence ANR-106EQPX-17 (Centre d'accès sécurisé aux données – CASD).

Nous souhaitons ici avoir une pensée pour nos deux collègues, Bassem Dimassi et Jérôme Balesdent, qui étaient impliqués dans cette étude et nous ont quittés prématurément.

Bassem Dimassi avait travaillé au tout début de l'étude, en 2017, pour mener un travail de simulation préliminaire. Il s'agissait d'estimer des quantités de carbone à apporter au sol pour augmenter le stock de 4 pour 1 000 par an. Les résultats obtenus à l'échelle de la France et avec un haut niveau de résolution ont ainsi constitué une référence précieuse pour la suite de l'étude.

Formé à l'Institut national d'agronomie de Tunis en 2006, il avait construit sa trajectoire scientifique sur cette thématique du stockage de carbone dans le sol, encadré par Claire Chenu et Benoît Gabrielle en master, puis par Bruno Mary en thèse, et par Manuel Martin lors de son post-doctorat au sein de l'unité InfoSol où il a travaillé jusqu'à la fin de l'année 2017.

Bassem possédait une personnalité amicale, sincère et attachante, dont témoignent tous ceux qui ont pu le côtoyer.

Jérôme Balesdent était un chercheur mondialement reconnu pour ses travaux sur la matière organique des sols, dont il a contribué à élucider la dynamique en mobilisant l'abondance relative des différents isotopes du carbone. En plus de cette brillante carrière, il s'était impliqué dans l'expertise scientifique, en participant en 2002 à l'expertise « Stocker du carbone dans les sols agricoles de France », puis à la présente étude, dans laquelle, au-delà du chapitre dont il était un des coordinateurs, il était très engagé pour stimuler la réflexion collective.

C'est d'ailleurs dans une publication cosignée avec Dominique Arrouays en 1999² que l'on trouve la première mention de l'idée du « 4 pour 1 000 » : « Les matières organiques des sols de la planète contiennent 1 500 milliards de tonnes de carbone, et constituent le plus gros réservoir superficiel échangeant du carbone avec l'atmosphère. Il s'agit d'une source ou d'un puits potentiel de CO₂ énorme : à titre d'illustration, une augmentation annuelle de ce réservoir de seulement 0,4 % par an stockerait autant de carbone que la combustion de carbone fossile n'en émet. »

Jérôme avait mis beaucoup de son énergie dans ce travail d'appui aux politiques publiques, mobilisant ses connaissances, sa rigueur scientifique et son sens très fin des relations humaines. Il y voyait une forme d'engagement du chercheur pour contribuer à la résolution des enjeux planétaires.

Sa disparition à l'été 2020 a plongé tous ses collègues dans une grande tristesse. Sa modestie, son ouverture d'esprit et sa bienveillance étaient reconnues et appréciées de toutes et tous.

2. Jérôme Balesdent et Dominique Arrouays, 1999. Usage des terres et stockage de carbone dans les sols du territoire français. Une estimation des flux nets annuels pour la période 1900-1999. *C.R. Acad. Agric. Fr.*, 85 (6), 265-277. Séance du 19 mai 1999.

Table des matières

Introduction	7
Contexte et motivations de l'étude	7
Objectifs et modalités de mise en œuvre de l'étude	10
Plan du document	11
1. Définitions et choix méthodologiques de l'étude	13
Stocks de carbone dans le sol : nature et ordre de grandeur	13
Stock, stockage et stockage additionnel de carbone dans le sol	16
Dépendance du stockage aux conditions pédoclimatiques et agronomiques	20
Du potentiel technique au potentiel économique de stockage	22
2. Analyse bibliographique	27
Les mécanismes à l'origine du stockage/déstockage de carbone dans les sols	27
Les modèles d'évolution des stocks de carbone dans les sols	44
Effets de la teneur en carbone des sols sur le fonctionnement des agroécosystèmes	53
Stocks de carbone des sols métropolitains, évolutions tendancielle et effet des changements d'occupation des sols	61
3. Pratiques stockantes et méthodes d'estimation de leur potentiel et de leur coût	73
Les pratiques stockantes retenues	73
Analyse conjointe du potentiel de stockage additionnel et du coût : approche globale	78
Estimation du stockage additionnel de carbone lié à l'adoption de pratiques stockantes	82
Estimation du coût technique unitaire des pratiques stockantes	88
Assemblage des résultats et allocation coût-efficace de l'effort de stockage	90
4. Potentiel technico-économique de stockage de carbone dans les sols français	93
Évolutions des stocks de carbone des sols sous les systèmes actuels de grandes cultures et de prairies permanentes	93

Potentiel de stockage additionnel de carbone dans les systèmes de grande culture et de cultures pérennes	111
Potentiel de stockage additionnel de carbone dans les systèmes de prairies permanentes	168
Analyse transversale du potentiel de stockage et du coût, et allocation coût-efficace de l'effort de stockage	183
Conclusion générale	205
Principaux enseignements de l'étude	205
Conséquences en termes de politiques publiques	207
Originalité de l'étude, suites à donner et besoins de recherche	208
Glossaire spécifique au stockage de carbone dans les sols	211
Sigles et abréviations	216
Sélection bibliographique	218
Les participants à l'étude	227

Introduction

Contexte et motivations de l'étude

I Les enjeux

Le rapport spécial du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) de 2018 établit que pour contenir la hausse de la température en deçà de + 1,5 °C par rapport à la période préindustrielle, il serait nécessaire d'atteindre la neutralité carbone à l'échelle du globe en 2050. Cet objectif ambitieux d'équilibre entre les émissions anthropiques de gaz à effet de serre (GES) et la séquestration de CO₂ par les écosystèmes s'impose désormais comme référence dans la plupart des politiques climatiques nationales, européennes et internationales. L'accord de Paris de 2015 mentionne, dans son article 4, l'objectif d'atteindre la neutralité carbone avant la fin du siècle, pour rester bien en dessous de 2 °C par rapport aux niveaux préindustriels. Dans le cadre du projet de loi relatif à l'énergie et au climat de 2019, la France remplace l'objectif de division par quatre des émissions de GES entre 1990 et 2050 (facteur 4) par un objectif de neutralité carbone en 2050, ce qui constitue un défi plus exigeant puisqu'il suppose une division des émissions par un facteur supérieur à six. Parallèlement, la Stratégie nationale bas carbone (SNBC) mise en place en 2015 a fixé trois premiers budgets carbone jusqu'en 2028, constituant des plafonds d'émissions à ne pas dépasser par périodes de cinq ans.

Atteindre la neutralité carbone suppose à la fois :

- de réduire drastiquement les émissions de CO₂ liées à l'usage des énergies fossiles (charbon, pétrole, gaz), à la déforestation et à la disparition des zones humides, ainsi que les émissions des autres GES (CH₄ et N₂O), d'origine majoritairement agricole ;
- d'accroître simultanément le puits de CO₂ que constitue la biosphère continentale, par des changements d'occupation des sols (afforestation notamment) et le développement de pratiques agricoles et sylvicoles favorisant la séquestration de carbone dans les sols et dans la biomasse ligneuse.

L'analyse des tendances récentes d'évolution des émissions de GES en France, en Europe et dans le monde montre qu'en dépit de l'accord de Paris de 2015, celles-ci ont continué d'augmenter, hormis une légère baisse amorcée en Europe en 2018 (- 2,5 % par rapport à 2017). Au niveau national, le bilan de la SNBC établi sur la période 2015-2018 révèle que le premier objectif n'a pas été atteint. Tous les leviers mobilisables pour réduire ces émissions doivent être mis en œuvre sans tarder si l'on veut éviter une hausse de la température supérieure à + 1,5 °C à l'horizon 2050, et toutes les conséquences qu'aurait un tel changement sur les écosystèmes et les conditions de vie de l'humanité. Parallèlement, tout doit être fait pour accroître la séquestration de CO₂ par la biosphère, en favorisant le stockage de C dans des compartiments à temps de résidence long comme les sols ou

la biomasse ligneuse. La neutralité carbone ne pourra être raisonnablement atteinte en 2050 que si les deux leviers sont mis en œuvre simultanément.

I L'initiative 4 pour 1 000

À l'échelle planétaire, le **stock de carbone organique** des sols (COS) représente de l'ordre de 2 400 Gt de C, soit le triple de la quantité de carbone contenue sous forme de CO₂ dans l'atmosphère (800 GtC). Le rapport entre les émissions anthropiques annuelles de C (9,4 GtC) et le stock de C des sols (2 400 GtC) est de l'ordre de 0,4%, soit 4 pour mille (4 ‰), ce qui suggère qu'une augmentation de 4 ‰ par an du stock de C des sols permettrait théoriquement de compenser les émissions anthropiques de CO₂. Sur la base de ce calcul, l'initiative « 4 pour mille : les sols pour la sécurité alimentaire et le climat » a été portée par la France en 2015 à l'occasion de la COP 21. Elle vise à promouvoir l'augmentation des teneurs en carbone organique dans les sols, au nom des bénéfices attendus en matière d'atténuation du changement climatique, mais aussi de préservation des sols et de sécurité alimentaire du fait des effets positifs du carbone des sols sur leurs propriétés et sur les rendements agricoles, en particulier dans les régions du monde où les sols sont les plus dégradés.

En France, le stock total de carbone organique dans l'horizon 0-30 cm des sols (hors surfaces artificialisées) est de l'ordre de 3,58 Gt de C, équivalent à 13,4 Gt de CO₂e. Une augmentation de 4 ‰ par an de ce stock compenserait de l'ordre de 12 % des émissions françaises de GES (458 MtCO₂e en 2016). En faisant le calcul, très théorique, sur l'horizon 0-100 cm, le pourcentage de compensation atteindrait 15 %. Ce calcul montre que dans le cas d'un pays comme la France, le stockage additionnel de carbone dans les sols ne peut en aucun cas suffire à atteindre la neutralité carbone. Il ne peut être qu'un levier parmi d'autres, au premier rang desquels figure la réduction des émissions. L'ordre de grandeur permis par ce levier est néanmoins significatif, ce qui milite pour un chiffrage plus précis du potentiel associé.

Au niveau national, un premier rapport d'expertise scientifique collective publié par l'Inra (*Contribution à la lutte contre l'effet de serre : stocker du carbone dans les sols agricoles de France ?*) avait dès 2002 mis en évidence l'existence d'un potentiel de stockage additionnel de carbone dans les sols agricoles français de l'ordre de 1 à 3 millions de tonnes de C par an, tout en soulignant les fortes incertitudes associées à ces estimations, les limites d'une approche ne considérant pas les autres GES agricoles, et les difficultés de prise en compte de ce levier dans les inventaires et les négociations climatiques internationales. Un deuxième rapport publié par l'Inra en 2013 (*Quelle contribution de l'agriculture française à la réduction des émissions de gaz à effet de serre ?*) a chiffré le potentiel d'atténuation permis par des modifications des pratiques agricoles, dont certaines visant un stockage additionnel de carbone dans les sols et la biomasse ligneuse représentant un potentiel d'environ 2,3 millions de tonnes de C par an.

I Les controverses scientifiques

L'initiative « 4 pour mille » a donné lieu depuis son lancement à une controverse scientifique parfois assez vive. Le caractère simpliste du calcul initial a été, à juste titre, souligné. D'autres calculs, basés sur une vision plus globale des stocks et des flux de C à l'échelle globale et considérant uniquement l'horizon de surface du sol, ont été proposés depuis. L'augmentation du stock de carbone des sols par adoption de pratiques « plus stockantes » n'est possible que pendant une durée limitée, après quoi un nouvel équilibre est atteint, équilibre qui ne se maintient que si les pratiques stockantes perdurent dans le temps. L'augmentation du stock est réversible si les pratiques stockantes sont abandonnées. Hormis quelques techniques susceptibles d'accroître les stocks par limitation des pertes de carbone par minéralisation, la plupart des pratiques stockantes supposent un accroissement des entrées de carbone dans les sols ; elles requièrent donc la mobilisation de ressources organiques supplémentaires par rapport à celles déjà restituées aux sols (effluents d'élevage, résidus de culture...), dont la disponibilité est limitée, voire pourrait être réduite à l'avenir dans un contexte de développement de la bioéconomie. Compte tenu de la faible flexibilité des rapports entre éléments (carbone, azote, phosphore) dans la matière organique du sol, il ne peut y avoir de stockage additionnel de carbone sans un stockage concomitant d'azote. Si cet azote provenait d'apports supplémentaires d'engrais de synthèse, il en résulterait des effets négatifs sur les émissions de GES du fait des émissions directes de N_2O associées et des émissions induites de CO_2 liées au coût énergétique de fabrication des engrais. Le changement climatique lui-même peut limiter le bénéfice attendu du stockage additionnel de carbone dans les sols, par accélération de la minéralisation sous l'effet de l'augmentation de la température. Enfin, de très nombreuses barrières agronomiques, économiques et sociales sont susceptibles de limiter l'adoption de pratiques agricoles favorisant le stockage de carbone. Le chiffrage du stockage additionnel potentiel à l'échelle du globe avancé en 2017 (2-3 GtC par an, ce qui compenserait 20-35 % des émissions anthropiques de CO_2) est ainsi jugé optimiste par plusieurs auteurs.

Malgré toutes ces limites et incertitudes, il demeure que l'ordre de grandeur de ce potentiel est significatif au regard des autres flux de GES induits par les activités humaines et mérite donc d'être considéré, parmi d'autres, en tant que levier d'atténuation du changement climatique pour tendre vers la neutralité carbone. À l'occasion de la COP 21 à Paris en 2015, la plupart des États ayant proposé une contribution volontaire à la réduction des émissions de GES (INDC, pour *intended nationally determined contribution*), devenue engagement suite à la ratification de l'accord, ont mobilisé, parmi d'autres, le levier du stockage additionnel de carbone dans les sols. Dans un contexte difficile d'atteinte des objectifs fixés au niveau international, réexplorer les possibilités offertes par ce levier reste d'actualité. La controverse qui a suivi le lancement de l'initiative « 4 pour mille » a en fait surtout pointé la nécessité de mieux quantifier le potentiel de séquestration permis par ce levier, et de réduire les incertitudes associées.

Objectifs et modalités de mise en œuvre de l'étude

C'EST DANS CE CONTEXTE QUE LE MINISTÈRE de l'Agriculture et de l'Alimentation et l'Ademe ont demandé à l'Inra de conduire la présente étude « 4 pour mille France ». Les objectifs étaient :

- d'identifier des pratiques agricoles et sylvicoles plus « stockantes » que les pratiques actuellement mises en œuvre ;
- de chiffrer le potentiel de stockage additionnel associé, de le cartographier, de quantifier les autres effets induits liés à l'adoption de ces pratiques stockantes (pertes ou gains de rendement, émissions de N_2O , lixiviation de nitrate, utilisation de produits phytosanitaires...) ;
- de chiffrer leur coût de mise en œuvre, d'identifier les freins à l'adoption et de proposer une stratégie coût-efficace de stockage.

I Méthode et périmètre de l'étude

L'un des enjeux majeurs étant d'affiner l'estimation du potentiel de stockage, l'approche choisie a été de compléter l'analyse de la bibliographie par une évaluation du potentiel de stockage additionnel de carbone par modélisation à une résolution spatiale fine. Les simulations ont été faites en utilisant les modèles Stics pour les grandes cultures et PaSim (voir section « Modèles utilisés (et cas hors modèles) », p. 82) pour les prairies permanentes, qui intègrent une représentation explicite du cycle du carbone dans le système sol-plante(-animal) et peuvent rendre compte de l'effet des multiples facteurs pédoclimatiques et des pratiques agricoles sur l'évolution des stocks de carbone. Ces deux modèles ont été largement utilisés en France et dans des contextes agropédoclimatiques similaires, ce qui leur confère une certaine robustesse pour une utilisation à l'échelle nationale. Ils sont bien maîtrisés par les équipes en charge de l'étude.

Pour le volet économique, la perspective d'une mise en place de politiques incitatives à l'adoption de pratiques stockantes a conduit à affiner également l'estimation des coûts pour les agriculteurs, et à procéder à des analyses à l'échelle régionale. L'estimation du potentiel de stockage additionnel de carbone et des coûts additionnels liés à l'adoption des pratiques stockantes a permis de calculer le coût de stockage d'une tonne de carbone, de comparer les pratiques sur ce critère, puis de proposer une stratégie coût-efficace de l'effort de stockage. L'outil choisi pour effectuer cette allocation optimale de l'effort de stockage a été le modèle Banco développé par l'Inra.

Pour des raisons de faisabilité et d'homogénéité de l'approche mise en œuvre, le périmètre de l'étude a été limité au territoire métropolitain. Conformément au cahier des charges, les pratiques étudiées correspondent uniquement à des leviers techniques pouvant être mis en œuvre sans délais importants (modalités de travail du sol, cultures intermédiaires, prairies temporaires, modes d'exploitation des prairies...), sans modification des modes d'occupation du sol (équilibre forêt-agriculture notamment), des systèmes de production agricoles et de leur localisation. La quantification du potentiel de

stockage additionnel de carbone et d'atténuation des émissions de GES permis par des leviers plus systémiques associés à des transformations plus radicales des systèmes de production agricoles (réassociation agriculture-élevage, changements d'occupation des sols, développement de l'agriculture biologique...) supposerait la mobilisation de modèles différents de ceux utilisés dans le cadre de ce travail.

I Modalités de mise en œuvre

L'étude a été conduite par la **Délégation à l'expertise scientifique collective, à la prospective et aux études** de l'Inra (DEPE), sous la responsabilité de deux pilotes scientifiques et d'un coordinateur de projet, entourés d'un collectif d'une trentaine d'experts choisis pour leurs compétences sur le sujet, avec l'appui d'une équipe-projet DEPE.

Un **comité technique**, animé par l'Ademe et composé de représentants du monde agricole, a été constitué pour aider au recueil d'informations techniques et d'avis sur la faisabilité et l'acceptabilité des scénarios envisagés. Un **comité consultatif d'acteurs** a été informé de la mise en place de l'étude à son démarrage et de ses principaux choix méthodologiques, puis des résultats avant leur diffusion, afin de recueillir leurs avis sur les orientations et les principales conclusions de l'étude. Enfin, le **comité de suivi**, constitué de représentants des commanditaires et de l'Inra, s'est assuré du bon déroulement du travail.

Plan du document

LE PRÉSENT OUVRAGE EST STRUCTURÉ EN QUATRE CHAPITRES :

- un chapitre de cadrage, incluant un rappel des principales notions et définitions, et présentant les grandes orientations méthodologiques de l'étude ;
- un état des connaissances scientifiques sur les processus relatifs à la dynamique du carbone du sol, l'état de l'art en matière de modélisation, l'effet de la teneur en carbone des sols sur le fonctionnement des agrosystèmes, l'état actuel des stocks en France et les tendances d'évolution, l'effet des pratiques agricoles ou sylvicoles susceptibles d'accroître le stockage dans les sols. Les pratiques stockantes candidates ont été choisies au vu des résultats de cette analyse bibliographique ;
- une présentation des pratiques stockantes retenues et du dispositif construit pour estimer le potentiel technico-économique de stockage additionnel de carbone dans les sols français par couplage d'une estimation par modélisation du potentiel de stockage additionnel de carbone par adoption de pratiques stockantes, d'un calcul de coût de mise en œuvre de ces pratiques et d'un modèle d'optimisation permettant une allocation coût-efficace de l'effort de stockage ;
- un chapitre de résultats récapitulant, pour chacune des pratiques analysées, les enseignements tirés de l'analyse bibliographique, les résultats des estimations agronomiques

du potentiel de stockage et des estimations économiques, puis procédant à une analyse transversale de ces résultats.

Une sélection de références bibliographiques, non directement citées dans le texte et regroupées selon les principales thématiques abordées, est consultable à la fin du document. La liste exhaustive des références mobilisées dans l'étude figure dans le rapport scientifique.

1. Définitions et choix méthodologiques de l'étude

L'AUGMENTATION DE STOCK DE CARBONE DES SOLS, ou stockage, est une donnée factuelle précise qui nécessite des définitions partagées pour éviter toute confusion. Les débats et controverses sur le potentiel de stockage de carbone dans les sols et la place que pourrait jouer ce levier dans l'effort d'atténuation du changement climatique résultent pour partie d'ambiguïtés ou d'imprécisions sur les termes et les modes de calculs utilisés (stockage *versus* stockage additionnel, profondeur de sol considérée, degré de prise en compte des contraintes socio-économiques à l'adoption de nouvelles pratiques...). Évaluer le stockage additionnel de C lié à une pratique nécessite en particulier la comparaison avec une pratique de référence. La valeur du stockage additionnel dépend fortement de la pratique de référence choisie, et il est indispensable de préciser la durée sur laquelle le stockage ou le stockage additionnel de C sont quantifiés. L'objectif de ce chapitre est de clarifier les termes utilisés et les choix méthodologiques majeurs de l'étude.

Stocks de carbone dans le sol : nature et ordre de grandeur

I Origine et composition du carbone, répartition dans le sol

Les matières organiques (MO) du sol sont constituées à 95 % de MO mortes et à 5 % d'organismes vivants (figure 1-1). Ces proportions sont indicatives et varient fortement d'un sol à l'autre et d'un horizon à l'autre. Ces MO, provenant directement ou indirectement de la production photosynthétique des végétaux supérieurs, sont constituées d'environ 50 % de carbone. Le carbone organique étant le constituant principal des MO, on utilise souvent indifféremment les termes « **carbone organique** » et « **matières organiques** ». Les laboratoires d'analyse mesurent la teneur en carbone organique du sol, puis l'expriment en teneur en MO en la multipliant par le coefficient (historique et fixe) 1,724. Alors que la mesure de la teneur en C est juste, celle des MO est très approximative : les MO des sols contiennent en moyenne 50 % de carbone, mais, par exemple, la cellulose en contient 45 %, et les cires végétales 85 %.

Le carbone organique des sols (COS) est réparti verticalement avec un fort gradient de concentrations décroissant de la surface vers la profondeur : depuis 400 gC/kg de sol dans les horizons organiques à la surface du sol, près de 100 gC/kg de sol dans le premier centimètre de l'horizon organo-minéral, et jusqu'à des teneurs en moyenne inférieures à 5 gC/kg à 1 m de profondeur (figure 1-2).

Figure 1-1. Matières organiques du sol : nature et proportions indicatives, en masse (d'après Calvet *et al.*, 2011).

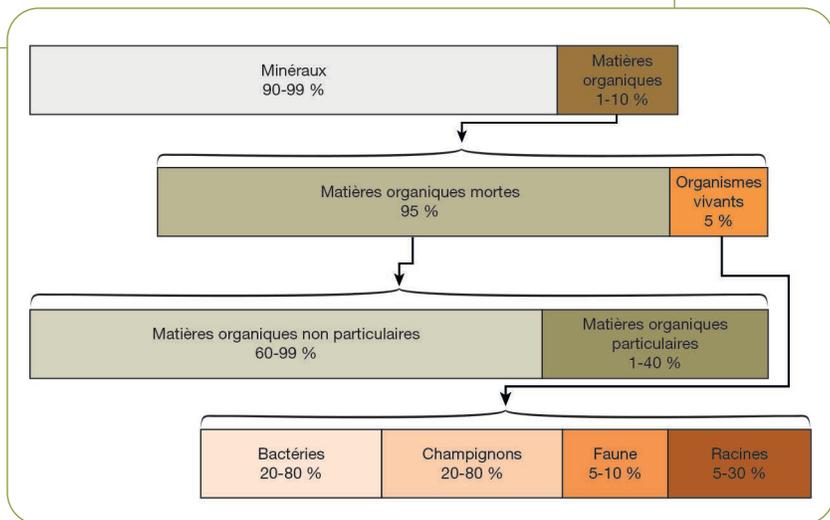
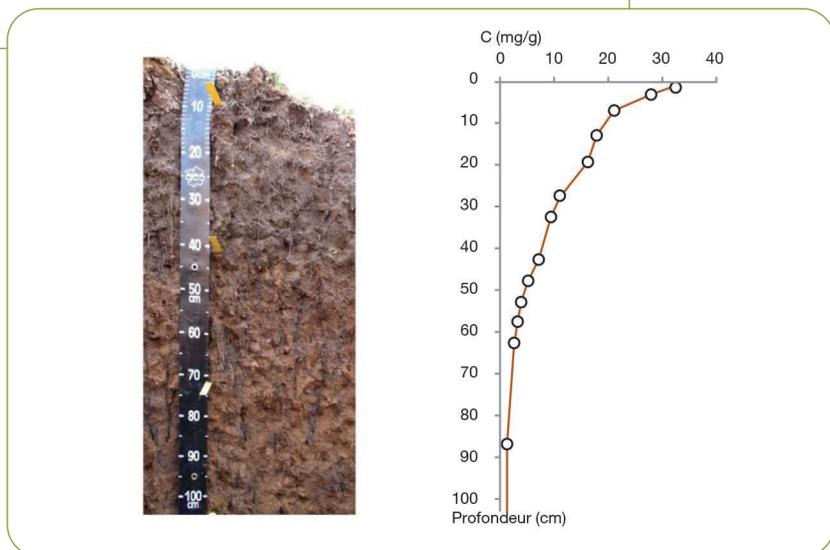


Figure 1-2. Profil de sol de prairie et distribution verticale du carbone organique de ce sol.

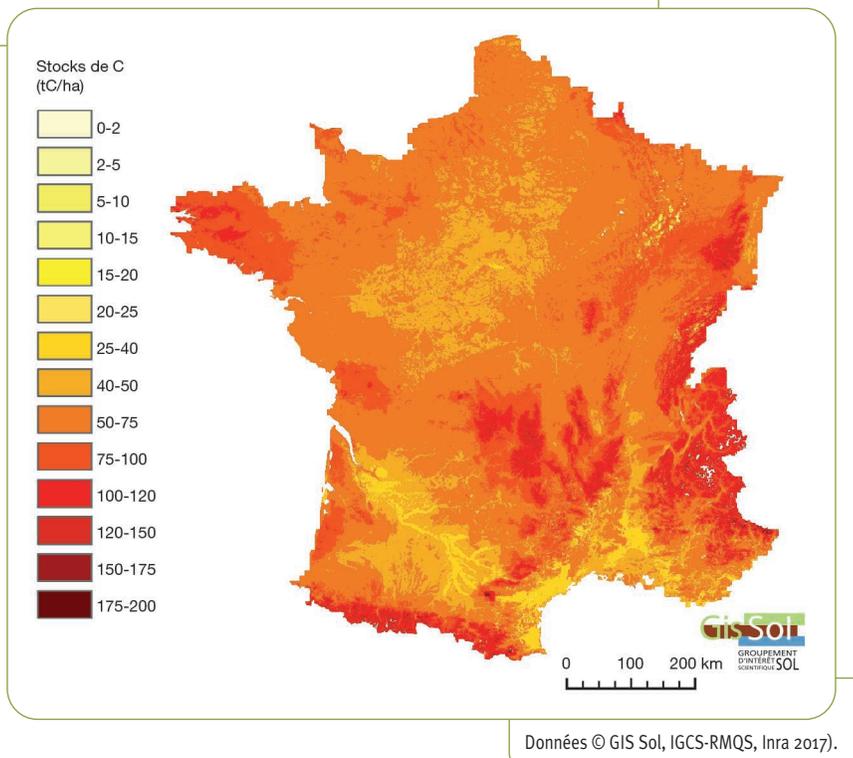


Par convention en pédologie, le niveau 0 cm correspond au sommet des horizons minéraux ou organo-minéraux des sols (excepté pour les sols de tourbes, où le niveau zéro correspond à leur sommet). De nombreux inventaires des stocks de C font référence à la couche 0-30 cm, ou 0-100 cm, plus, le cas échéant, les horizons organiques ou horizons « O » (litière forestière, mulch des sols agricoles conduits en semis direct), qui peuvent représenter une partie non négligeable du COS. Les travaux historiques sur les dynamiques du C ont majoritairement été consacrés à la couche de sol considérée par les agronomes, soit « 0-30 cm ». La plupart des calculs faits dans le cadre de ce rapport se réfèrent à cet horizon, qui est aussi l'horizon de référence des travaux du GIEC et des inventaires nationaux d'émission. Seuls les chiffres finaux d'atténuation à un niveau agrégé ont été estimés en considérant la totalité du profil de sol moyennant un terme de passage. Hormis pour les sols superficiels, il a été montré qu'environ la moitié du carbone des sols est située en dessous de 30 cm de profondeur, au niveau du territoire français métropolitain comme ailleurs dans le monde. Cette proportion varie cependant en fonction de l'occupation des sols.

I Stocks de carbone dans les sols métropolitains : ordre de grandeur et répartition géographique

La carte des stocks de C des sols métropolitains pour la couche 0-30 cm (figure 1-3) montre une variation géographique qui résulte à la fois de l'usage 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 montagnard (températures faibles et pluviométrie élevée avec périodes d'anoxie peu favorables à la minéralisation du C du sol) et du mode d'occupation du sol (dominance de la prairie permanente et de la forêt). S'y ajoute dans certaines zones l'effet de la minéralogie (sols volcaniques du Massif central). Des stocks de C moyennement élevés (75 à 100 tC/ha) sont caractéristiques des grandes régions forestières ou fourragères (Bretagne, Est, Massif central, Normandie). Les stocks de C faibles à moyens (25 à 50 tC/ha) sont caractéristiques des sols des grandes plaines de culture intensive ainsi que des sols limoneux, 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 C au sol. Le stock total de C des sols français sur la couche 0-30 cm est estimé à 3,58 GtC, hors surfaces artificialisées.

Figure 1-3. Stocks de carbone organique des sols français (en tC/ha) sur les 30 premiers centimètres de sol.



Stock, stockage et stockage additionnel de carbone dans le sol

LA PRÉVISION DU STOCKAGE DE C associé à une pratique présente plusieurs difficultés et des risques d'ambiguïtés liés à la comptabilisation du carbone du sol. Les biais possibles sont décrits et discutés de façon récurrente dans la littérature, mais prêtent cependant encore à controverse. Certains biais relèvent de l'observation, d'autres du mode de projection de l'observation pour la prévision, ou encore des méthodes de spatialisation qui peuvent conduire à des différences d'estimation.

I Stocks de carbone du sol

Mesure des stocks de carbone

La teneur en carbone organique (ou concentration en carbone organique) du sol correspond à la proportion massique de l'élément carbone sous forme de matière organique

dans le sol sec. Elle est exprimée en gC/kg sol, ou parfois en %. Sauf indication contraire, la masse de référence du sol est la masse sèche à 105 °C de la « terre fine ». L'analyse du C organique d'un échantillon de terre est réalisée sur la « terre fine », tamisée à 2 mm, donc sans les débris végétaux et les éléments grossiers (graviers et cailloux) de taille supérieure. Le carbone inorganique parfois présent dans les sols (sous forme de carbonates, comme dans la calcite de formule CaCO_3) n'est pas pris en compte.

Le stock de carbone organique est la quantité totale de carbone contenue dans un volume de sol donné. Il est généralement exprimé en kilogramme par mètre carré ou en tonne par hectare ($1 \text{ kgC/m}^2 = 10 \text{ tC/ha}$) sur une profondeur donnée. Le stock de carbone (exprimé en tC/ha sur une profondeur donnée) est calculé en multipliant la concentration massique de C organique mesurée (exprimée en %) par la masse de terre fine contenue dans la couche ; cette dernière est le produit de l'épaisseur de la couche (exprimée en cm) et de la masse de terre fine par unité de volume de sol (exprimée en g/cm^3). La masse de terre fine d'un volume de sol (exprimée en g) est calculée par soustraction de la masse d'éléments grossiers ($> 2 \text{ mm}$; extraits par tamisage humide) à la masse totale d'un volume de sol séché à 105 °C. En divisant cette masse de terre fine par le volume du sol considéré (exprimé en cm^3), on obtient la masse de terre fine par unité de volume.

Les stocks sont exprimés en tonnes de carbone organique du sol par hectare (tC/ha), et non en tonnes de CO_2 ou d'équivalent CO_2 (t CO_2e), grandeur qui est utilisée pour mesurer les flux de GES, dont le CO_2 .

Le stock de carbone du sol est dit « à l'équilibre » quand le flux entrant (par les apports de carbone) est égal au flux sortant (par minéralisation, perte sous forme dissoute ou érosion), résultant en un stock de C du sol constant dans le temps. Le carbone du sol est dit « en régime stationnaire » si le stock est à l'équilibre et si, de plus, le flux d'apport est invariant dans le temps.

Sources de confusion concernant la comparaison des stocks de carbone observés

Une source triviale de confusion vient de la différence existant entre le stockage réel, du fait d'une augmentation de la quantité de carbone présente dans le sol, et un changement de stock dans une couche donnée (par exemple 0-30 cm), du fait de modifications de la masse volumique (tassement ou fragmentation) ou d'un déplacement vertical du carbone (travail du sol, bioturbation). Ce biais a historiquement entaché l'évaluation du potentiel de stockage lié à la réduction du travail du sol, ou aux changements d'utilisation des terres, par surestimation ou sous-estimation. Passer un rouleau compresseur sur le sol augmentera très significativement le stock de carbone des 30 premiers centimètres, mais ne stockera pas de carbone.

Une partie des horizons (H) organiques de surface est souvent exclue des bilans, à tort, puisque les mulchs ou les litières forestières ont couramment des âges de plusieurs dizaines d'années et peuvent représenter une part importante des stocks de carbone. Les horizons H des tourbes ou de prairies de zones humides sont également souvent mal pris en compte.

I Stockage et stockage additionnel de carbone

Stockage de carbone

Le **stockage de carbone** est l'augmentation du stock de carbone dans le temps.

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 (le stock à l'équilibre étant modélisé mathématiquement par une asymptote). 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 avec un changement de gestion donné. Ce stockage peut prendre une valeur négative, il s'agit alors d'un déstockage.

La **séquestration de carbone** dans le sol est le retrait net de CO_2 de l'atmosphère résultant du transfert de son carbone dans des compartiments à temps de renouvellement lent du carbone organique du sol par comparaison à une situation où ce CO_2 serait resté dans l'atmosphère. Stockage et séquestration sont deux notions distinctes : par exemple, épandre un produit résiduaire dans une parcelle donnée induira un stockage de carbone dans cette parcelle, mais ne correspondra pas à une séquestration, par rapport à un épandage qui aurait eu lieu ailleurs. Cette étude s'intéresse en premier lieu à l'effet de pratiques sur le stockage de C dans le sol, mais elle prend aussi en considération les effets induits de ces pratiques sur le bilan des GES : émissions de N_2O , de CH_4 et de CO_2 .

Stockage additionnel de carbone lié à un changement de pratique

Le **stockage additionnel** lié à une pratique agricole B est la différence entre le stock de carbone mesuré dans un sol après la mise en œuvre de la pratique B pendant une période donnée, et le stock de ce même sol sous une pratique de référence A mise en œuvre durant la même période, à partir d'un état initial commun. Le stockage additionnel est donc défini pour deux pratiques, un site donné, et un temps écoulé depuis la différenciation des pratiques. Un minimum de 5 à 10 ans est nécessaire pour qu'un stockage additionnel soit mesurable.

La plupart des études comparent les stocks de deux pratiques après n années de différenciation à partir d'une situation commune (études synchrones) et mesurent donc un stockage additionnel (différentiel entre A et B au temps $t_o + n$) ; très peu d'études ont mesuré le stock au temps initial t_o (études diachrones) et évaluent donc le stockage réel (différentiel entre le temps t_o et $t_o + n$ pour une pratique donnée). À noter que le changement de stock entre t_o et $t_o + n$ dépend à la fois de l'histoire antérieure à t_o , et donc du stock de carbone à l'instant t_o , et de la pratique.

Sources de confusion concernant l'évaluation du stockage de carbone lié à une pratique

La représentation des cinétiques de stockage et l'extrapolation des mesures. Le stockage moyen annuel observé n'est valide que pour le domaine de durée de l'observation et ne doit pas être appliqué à des durées plus longues, car le stockage maximal possible est