

Le stockage du carbone dans les sols

CHENU Claire

UMR Ecosys, Université Paris-Saclay, INRAE, AgroParisTech

CHOTTE Jean-Luc

UMR Eco&Sols, IRD, CIRAD, INRAE, Université de Montpellier, SupAgro Montpellier

Et LUU Paul

Secrétariat Exécutif de l'Initiative internationale « 4 pour 1000 »

Les sols du monde représentent un très important stock de carbone, environ 2 400 Gt de carbone, sous forme de matières organiques. Une perte, même faible, de ces stocks aurait des conséquences désastreuses pour le climat, alors qu'une petite augmentation de ceux-ci pourrait contribuer à atténuer le changement climatique. Cet article présente les caractéristiques de ce stockage, les pratiques et usages des sols qui peuvent être mobilisés pour protéger les stocks de carbone des sols existants et les augmenter, leur performance, ainsi que les nombreux bénéfices associés en termes de fertilité des sols et donc de sécurité alimentaire, d'adaptation au changement climatique et de services écosystémiques. Mais aussi les barrières à l'implémentation de la technologie considérée et les risques associés. Même si le stockage du carbone dans les sols est une technologie d'émissions négatives à bas coût, largement promue par l'Initiative internationale « 4 pour 1000 », des mesures incitatives sont nécessaires pour permettre d'accroître sa mise en œuvre.

Le rapport spécial du GIEC sur le changement climatique et les terres émergées (2018) a mis en avant les technologies d'émissions négatives, en particulier le stockage du carbone dans les sols. En effet, les sols à l'échelle mondiale contiennent trois fois plus de carbone qu'il n'y en a dans l'atmosphère (2 400 Gt de carbone dans les sols contre 860 Gt dans l'atmosphère (Jobbagy and Jackson, 2000), auxquels il faut ajouter les 1 760 Gt de carbone présents dans les pergélisols (Tarnocai *et al.*, 2009)). Une perte, même faible, des stocks de carbone des sols à l'échelle mondiale aurait des conséquences désastreuses pour le climat, alors qu'une petite augmentation de ces mêmes stocks pourrait contribuer à limiter, voire à atténuer le changement climatique. C'est le point de départ de l'Initiative « 4 pour 1000 : les sols pour la sécurité alimentaire et le climat » (www.4p1000.org). Son titre « 4 pour 1000 » tient au fait qu'une augmentation annuelle de 0,4 % (4 pour mille) des stocks de carbone organique des sols à l'échelle mondiale compenserait le flux de carbone vers l'atmosphère dû aux combustibles fossiles qui est de 9,4 Gt carbone/an (soit l'équivalent de 35,5 GtCO₂/an) (Balesdent and Arrouays, 1999). Le potentiel de stockage du carbone dans les sols est donc très important ; il est associé à de nombreux co-bénéfices et peut être mis en œuvre à bas coût par comparaison à d'autres technologies. Nous présentons dans cet article les caractéristiques de ce stockage, les pratiques et

usages des sols mobilisés, leur performance, ainsi que les limites et risques associés et les instruments dont on dispose actuellement pour promouvoir ce stockage, en accordant une attention particulière à l'Initiative « 4 pour 1000 ».

Des stocks de carbone en perpétuel renouvellement

Les matières organiques des sols sont constituées d'un ensemble varié de composés organiques. Les végétaux (chutes de feuilles, résidus de culture, racines mortes) et les exsudats racinaires sont les sources principales alimentant le réservoir organique des sols. Ces apports sont incorporés au sol, puis utilisés par les organismes vivants qui y vivent (faune, micro-organismes) comme source de matière et d'énergie. Ils fragmentent, biodégradent et minéralisent les matières organiques, qui sont donc un continuum de fragments organiques et de molécules d'origine végétale, animale ou microbienne, en cours de décomposition. Le carbone, le principal constituant des matières organiques du sol, est minéralisé sous forme de CO₂. La vitesse de décomposition des matières organiques dépend de leur composition chimique, de l'abondance et de la nature des organismes décomposeurs, des conditions environnementales (température, disponibilité de l'eau et de l'air,

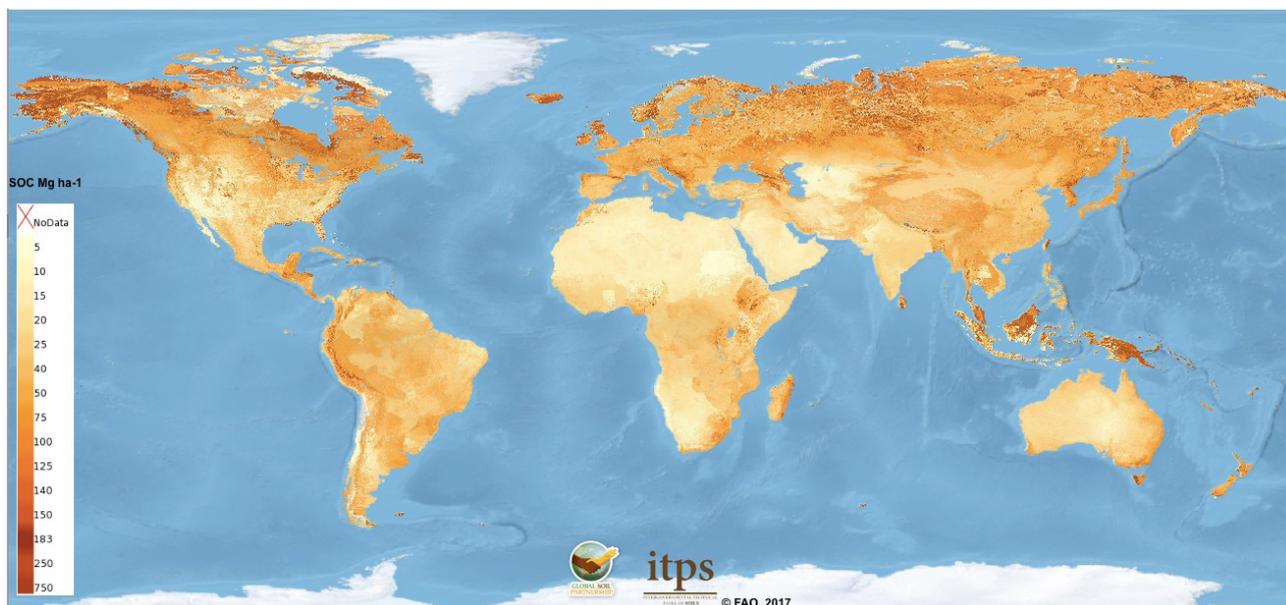


Figure 1 : Carte des stocks de carbone des sols du monde (tC/ha sur 30 cm de profondeur) – Source : FAO, Global Soil Partnership, 2017.

pH...) et de la protection offerte par les constituants minéraux du sol au regard de cette décomposition (adsorption de composés organiques sur les minéraux du sol, piégeage dans des microsites inaccessibles aux micro-organismes décomposeurs).

Le temps de résidence du carbone dans un sol donné est très variable. Il varie de quelques heures à plusieurs millénaires, avec une durée moyenne de quelques décennies. Le stock de carbone organique d'un sol dépend à la fois des entrées de biomasse dans le sol et des sorties par minéralisation. Dans certaines situations, des quantités importantes de carbone peuvent également être perdues du fait de l'érosion du sol. La variabilité des climats, des écosystèmes, des types de sol, des modes d'occupation et de gestion des sols explique la grande variabilité des stocks de carbone organique présents dans les sols (voir la Figure 1 ci-dessus). Deux priorités se dégagent donc : 1) préserver, et donc éviter la diminution des stocks de carbone existants, dans les zones où ils sont élevés (hautes latitudes, forêts tropicales), mais également dans les zones où ils sont plus faibles mais qui représentent de grandes superficies à l'échelle mondiale comme les zones arides (Hanan *et al.*, 2021), et

2) augmenter les stocks de carbone là où ils sont faibles (les sols cultivés).

Certains usages ou modes de gestion des terres permettent un meilleur stockage du carbone par rapport aux pratiques usuelles (voir la Figure 2 ci-dessous), parce qu'ils permettent une augmentation des entrées de biomasse ou une diminution des pertes en carbone. Ce stockage additionnel est lent et borné, car un nouvel équilibre est atteint en l'espace de plusieurs décennies et sa valeur dépendra de la pratique mise en œuvre. Il est aussi réversible si la pratique stockante est abandonnée. La cinétique de déstockage est rapide, et l'amplitude forte lors d'un changement d'usage comme une déforestation ou un retournement de prairies permanentes : la priorité est assurément de protéger les stocks existants de carbone dans les sols (voir la Figure 2). Le potentiel de stockage de carbone additionnel d'un sol correspond au gain maximal atteignable de carbone stocké par rapport à une pratique de référence, après une durée déterminée et pour un usage et un mode de gestion déterminés. Il dépend par ailleurs du climat et du type de sol (Chenu *et al.*, 2019). On réserve le terme de « séquestration » aux situations où un stockage de carbone est associé à un piégeage net de CO₂ de l'atmosphère (Chenu *et al.*, 2019).

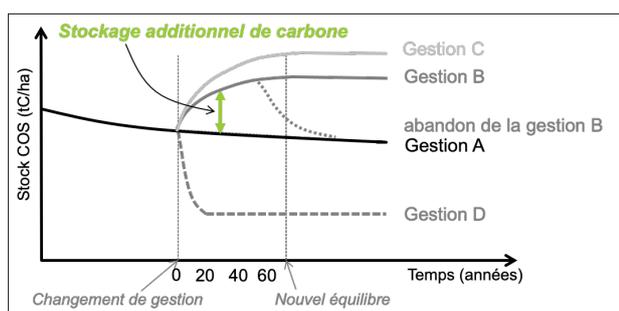


Figure 2 : Trajectoires possibles d'évolution du stock de carbone des sols – Figure réalisée par Claire Chenu.

Quels usages et pratiques pour préserver et augmenter les stocks de carbone des sols ?

Les usages des sols sont caractérisés par des stocks de carbone très contrastés : les prairies permanentes et les forêts affichant des stocks plus importants que les sols cultivés (par exemple, en France métropolitaine, de l'ordre de 80 tonnes de carbone/ha sont stockées sous les prairies permanentes ou des forêts, contre 50 tonnes de carbone/ha stockées dans des sols sous cultures annuelles ou 35 tonnes de carbone/ha sous

des vignobles). Il est donc essentiel de réduire la déforestation et le retournement des prairies permanentes. Les zones humides et sols de tourbières sont caractérisés par des stocks très élevés (> 100 t de carbone/ha) ; éviter le drainage des tourbières et des zones humides est donc crucial.

Une autre option est de mettre en œuvre des pratiques agricoles ou forestières qui augmentent les entrées de carbone dans les sols, telles que les cultures intermédiaires, les plantes de couverture ou l'agroforesterie, ou de diminuer les sorties de carbone du sol en faisant appel à l'agroforesterie ou à l'agriculture de conservation des sols. En contexte forestier, la restitution (naturelle) des « rémanents » est une pratique stockante par rapport à leur exportation pour une valorisation énergétique, tandis qu'en contexte urbain, la végétalisation des sols urbains, naturels ou reconstitués, permet d'augmenter les stocks de carbone des sols.

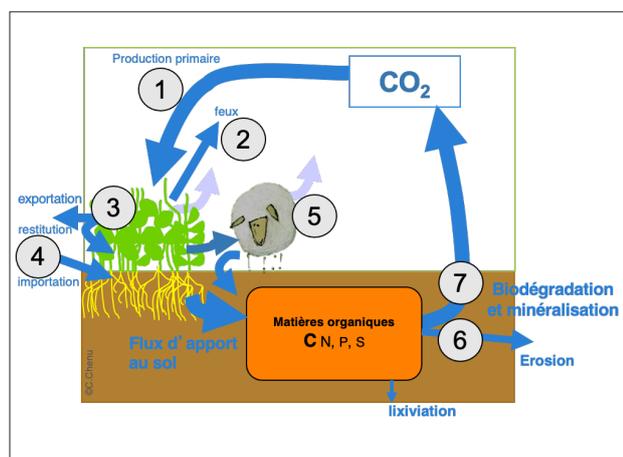


Figure 3 : Volants d'action mobilisables pour augmenter les stocks de carbone des sols en agriculture : 1) augmenter la photosynthèse réalisée par unité de surface (cultures intermédiaires, enherbement des vignes et vergers, plantes de couverture, agroforesterie, prairies temporaires), 2) réduire les feux, 3) augmenter la restitution de résidus de culture, 4) apports d'effluents d'élevage et de produits résiduels organiques, 5) remplacer la fauche par la pâture, 6) réduire les pertes de carbone par érosion (agriculture de conservation, agroforesterie, pratiques et aménagements anti érosifs), et 7) réduire les pertes par minéralisation (réduction du travail du sol). Adaptée de CHENU *et al.* (2019).

Il est aujourd'hui établi que les stratégies les plus efficaces sont celles qui consistent à augmenter les entrées de carbone dans les sols (Fujisaki *et al.*, 2018). L'efficacité de ces différentes options et pratiques est contrastée et dépend, en outre, du contexte pédoclimatique. En Afrique de l'Ouest subaride, les sols à texture grossière sont caractérisés par des stocks de carbone faibles, mais variables selon l'usage fait des sols et la gestion des apports organiques. Malou *et al.* (2021) montrent que les stocks de carbone organique sont significativement plus élevés dans les sols des parcelles proches des habitations, lesquels reçoivent de plus grandes quantités d'intrants organiques, que dans ceux des parcelles plus éloignées du village (les champs extérieurs).

Si de très nombreuses références sont aujourd'hui disponibles sur l'effet de certaines pratiques agri-

coles ou de l'usage fait des sols, peu d'études ont été réalisées dans le but d'estimer le potentiel technique du stockage de carbone à l'échelle de territoires nationaux (Rodrigues *et al.*, 2021). À l'échelle de la France métropolitaine, Pellerin *et al.* (2019) ont réalisé une estimation du potentiel technique du stockage additionnel de carbone dans les sols agricoles et montré que la mise en place combinée de cultures intermédiaires, de l'agroforesterie, de l'allongement de la durée des prairies temporaires, de l'extensification modérée des prairies permanentes et d'autres pratiques permettrait un stockage additionnel au bout de 30 ans de 8,34 millions de tonnes de carbone/an, soit 31 millions de tonnes de CO₂eq, ce qui correspond à 7 % des émissions nationales de gaz à effet de serre et à 41 % des émissions agricoles françaises. Ce stockage additionnel n'est pas négligeable. À l'échelle mondiale, plusieurs estimations ont été réalisées, mais elles souffrent bien sûr d'une plus grande incertitude. Des valeurs de stockage additionnel de 0,6 à 1,8 Gt de carbone/an ont été avancées (Fuss *et al.*, 2018 ; Zomer *et al.*, 2017), qu'il faut comparer au flux annuel de 5,1 Gt de carbone transitant de notre planète vers son atmosphère (Friedlingstein *et al.*, 2020). Comme à l'échelle nationale, le stockage de carbone ne permet pas de compenser les émissions totales de gaz à effet de serre, mais il peut en atténuer une fraction significative.

Un stockage de carbone qui apporte de nombreux co-bénéfices

Les matières organiques des sols assurent de nombreuses fonctions, qui sont autant de bénéfices associés à un stockage : elles retiennent l'eau et les éléments minéraux, agrègent les particules du sol et sont la ressource trophique des organismes vivant dans le sol ; leur minéralisation, quant à elle, libère des éléments nutritifs, principalement de l'azote, du phosphore et du soufre. Elles contribuent ainsi à la fertilité chimique des sols, mais aussi à la biodiversité de ceux-ci, au recyclage des éléments, à la régulation du cycle de l'eau et à la prévention de l'érosion. Stocker du carbone dans les sols apporte donc de nombreux co-bénéfices.

Limites et risques associés au stockage du carbone dans les sols

Augmenter les entrées de carbone dans les sols est le principal volant d'action pour accroître les stocks de carbone. La possibilité de produire et de restituer plus de biomasse est limitée par la faible disponibilité de l'eau ou des nutriments dans un certain nombre de contextes climatiques, pédologiques et économiques (Naudin *et al.*, 2011). Des usages de la biomasse peuvent être en concurrence avec le retour de celle-ci dans le sol, tels que le pacage des champs par le bétail après récolte ou l'utilisation des bouses de vache comme combustible domestique. En Europe, des tensions apparaissent entre les différentes valorisations possibles de la biomasse, notamment avec le développement de la méthanisation. Les barrières ne sont pas que biophysiques : les pratiques stockantes

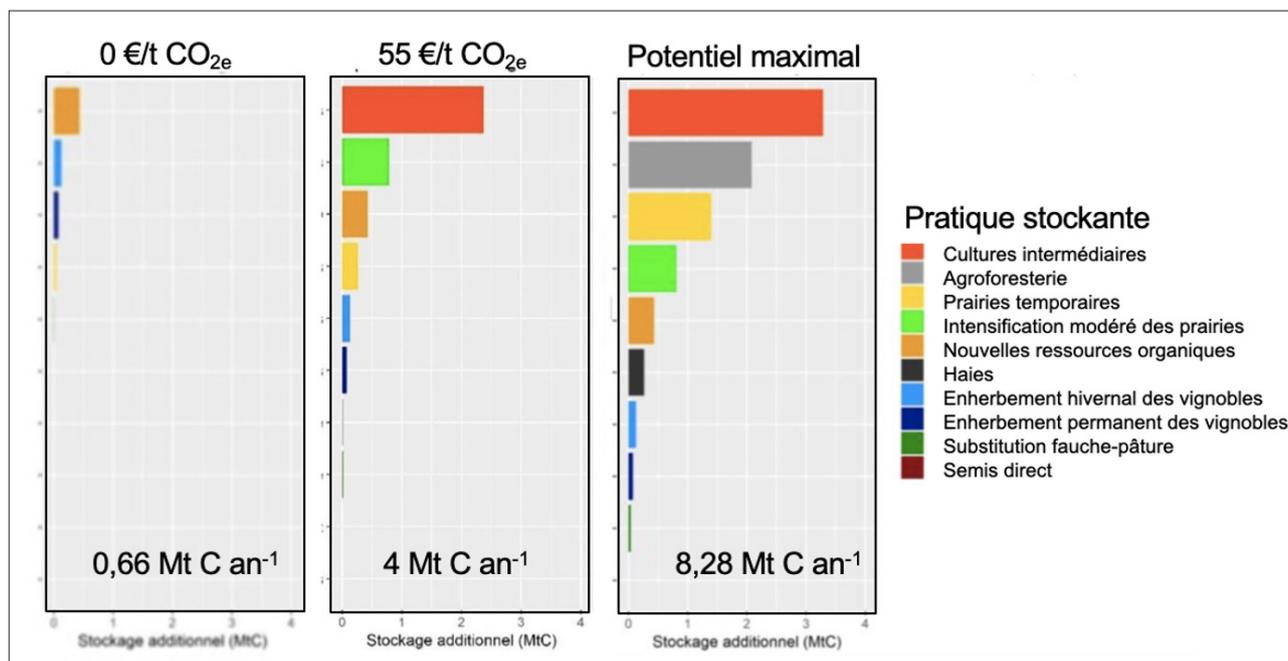


Figure 4 : Contribution des pratiques agricoles au stockage de carbone additionnel déterminée pour la France métropolitaine selon le coût de la tonne de CO₂ évitée (PELLERIN *et al.*, 2019 ; BAMIERE *et al.*, 2021).

s'accompagnent généralement d'un coût additionnel non nul (par exemple, l'achat de semences, de fioul pour le semis de cultures intermédiaires...). Ainsi, si le potentiel technique du stockage de carbone dans les sols de la France métropolitaine est de 8,34 Mt de carbone/an, il n'est que de 4 Mt de carbone/an si l'on se base sur un coût maximal de 50 € la tonne de CO₂ évitée et de 0,7 MtC/an pour un coût nul (voir la Figure 4 ci-dessus) (Bamière *et al.*, 2021). Enfin, une insuffisante maîtrise technique des agriculteurs, leur faible capacité à prendre des risques, l'absence de conseils agricoles adéquats, un fermage reposant sur des contrats courts, voire même certaines préférences culturelles limitent également la mise en œuvre des pratiques stockantes sur le terrain (Demenois *et al.*, 2020). Au-delà du potentiel technique du stockage de carbone, il est donc nécessaire de déterminer un potentiel économique et un potentiel atteignable ou tout du moins réaliste qui intègre les choix des acteurs de terrain.

Une approche intégrée et multicritères doit prévaloir, telle celle portée par l'Initiative « 4 pour 1000 » (https://www.4p1000.org/sites/default/files/francais/doc_2_criteria_and_indicators_vf.pdf). En effet, au-delà du stockage du carbone, c'est un bilan des gaz à effet de serre de l'itinéraire technique de ce stockage qui doit être réalisé, prenant en compte les émissions amont (l'achat de fertilisants minéraux, par exemple) et aval (les pertes d'azote), ainsi que les émissions au champ. Ainsi, certaines pratiques et conditions pédo-climatiques peuvent générer des émissions additionnelles de N₂O, lesquelles peuvent diminuer l'effet d'atténuation des émissions de gaz à effet de serre d'une pratique visant au stockage du carbone dans les sols (Guenet *et al.*, 2021).

Comment favoriser le stockage du carbone dans les sols ? L'Initiative « 4 pour 1000 »

Atténuer les émissions de gaz à effet de serre fait l'objet de politiques aux échelles internationale (par exemple, les Accords de Paris signés en 2015), européenne (la loi Climat) et nationale (Stratégie nationale bas carbone de 2015). Bien que les nations intègrent de plus en plus les sols et le carbone qu'ils contiennent dans leurs contributions nationales déterminées (Wiese *et al.*, 2021), les politiques aux différentes échelles précitées intègrent peu d'objectifs quantitatifs relatifs au carbone des sols. En France, la Stratégie nationale bas carbone 2 (2020) vise un doublement du stockage du carbone dans les sols et de la biomasse à l'horizon 2050.

L'Initiative « 4 pour 1000 : les sols pour la sécurité alimentaire et le climat », lancée par la France en 2015 à l'occasion de la COP21, a fait monter les sols et le stockage du carbone dans ces derniers sur la scène politique climatique. Cette Initiative promeut la préservation et l'augmentation des stocks de carbone des sols afin de contribuer : 1) à une atténuation du changement climatique, 2) à une meilleure adaptation des agroécosystèmes au changement climatique liée au rôle joué par les matières organiques des sols dans le cycle de l'eau et la lutte contre l'érosion, et 3) à la sécurité alimentaire, du fait du rôle de ces mêmes matières organiques dans la fertilité des sols.

L'Initiative vise à fédérer tous les acteurs volontaires du public et du privé (États, collectivités, entreprises, organisations professionnelles de producteurs, ONG, établissements de recherche et d'enseignement, ...) et à les inciter à s'engager dans une transition agroécologique vers une agriculture productive, hautement rési-

liente, fondée sur une gestion adaptée des terres et des sols, créatrice d'emplois et de revenus et, par là-même, porteuse de développement durable.

Comme nous l'avons précisé en introduction, un taux annuel de croissance de 0,4 % (ou 4 ‰) des stocks de carbone dans les premiers 30 à 40 cm du sol réduirait de manière significative dans l'atmosphère la concentration de CO₂ liée aux activités humaines (Soussana *et al.*, 2019). Ce taux de croissance n'est pas une cible normative pour les pays et autres partenaires, mais vise à illustrer l'importance du carbone des sols (Rumpel *et al.*, 2020). L'Initiative affirme sans ambiguïté que le stockage du carbone dans les sols ne peut en aucun cas se substituer aux nécessaires efforts de réduction des émissions de gaz à effet de serre d'origine anthropique, une réduction qui demeure la priorité de la lutte contre le changement climatique (Rumpel *et al.*, 2020).

L'Initiative compte aujourd'hui plus de 670 membres représentant une grande diversité. Concrètement, elle mène des actions de sensibilisation auprès d'acteurs très divers et s'implique dans le débat public portant sur les questions d'agriculture et de climat. Le comité scientifique et technique international de l'Initiative a défini un ensemble de critères et d'indicateurs de référence auquel un projet estampillé « 4 pour 1000 » doit souscrire. Pour s'en assurer, il réalise des évaluations formatives des projets sur la base de ces critères. Il est à noter qu'au premier rang de ceux-ci figurent des critères « de sauvegarde » permettant de s'assurer que des actions entreprises pour augmenter les stocks de carbone des sols ne porteront pas atteinte aux droits de l'homme et n'affecteront pas négativement les droits fonciers et la diminution de la pauvreté. L'Initiative « 4 pour 1000 » a défini des priorités de recherche qu'elles diffusent auprès des financeurs de la recherche et mène ses propres études, comme l'analyse de la manière dont les contributions nationales déterminées (NDCs) prennent en compte les sols et le carbone qu'ils contiennent (Wiese *et al.*, 2021).

Conclusion

Dans la course pour l'atteinte de la neutralité carbone globale, la priorité reste la réduction des émissions de GES. Il est cependant également nécessaire de renforcer le rôle des sols dans l'éventail des solutions mobilisables pour le climat, la sécurité alimentaire, la lutte contre la perte de biodiversité et la dégradation des terres. Les sols se trouvent en effet au carrefour de nombreux enjeux locaux et globaux, alors qu'ils sont menacés et dégradés. En appui de cette ambition, il est indispensable de mettre en place des mesures incitatives pour soutenir, sur le long terme, la transition des systèmes agricoles sur la voie d'une valorisation de leur potentiel de stockage du carbone et pour accompagner les acteurs essentiels que sont les agriculteurs. Des méthodes et des indicateurs de performance du suivi et de l'évaluation *ex ante*, *in itinere* et *ex post* des impacts de ces systèmes sur l'évolution du stock de carbone organique des sols sont également nécessaires.

Une nouvelle stratégie européenne en faveur des sols, publiée par la Commission, le 17 novembre 2021, vise à « augmenter la teneur en carbone des sols agricoles, à lutter contre la désertification, à restaurer les terres et les sols dégradés, et à faire en sorte que, pour 2050, tous les écosystèmes des sols soient en bon état ». Pour cela, cette stratégie prévoit d'agir au travers d'outils qui existent déjà, mais aussi de développer la rémunération des agriculteurs au regard de l'évolution du carbone stocké et pour les services écosystémiques qu'ils rendent (« carbon farming »). Elle ambitionne également de mettre en place une législation spécifique pour protéger les sols, et ce dès 2023.

Références bibliographiques

- BALESDENT J. & ARROUAYS D. (1999), « Usage des terres et stockage de carbone dans les sols du territoire français. Une estimation des flux nets pour la période 1900-1999 », *Comptes rendus de l'Académie d'Agriculture de France* 85(6), pp. 265-277.
- BAMIÈRE L., JAYET P. A., KAHINDO S. & MARTIN E. (2021), "Carbon sequestration in French agricultural soils: A spatial economic evaluation", *Agricultural Economics* 52(2), pp. 301-316.
- CHENU C., ANGERS D. A., BARRÉ P., DERRIEN D., ARROUAYS D. & BALESDENT J. (2019), "Increasing organic stocks in agricultural soils: Knowledge gaps and potential innovations", *Soil and Tillage Research* 188, pp. 41-52.
- DEMENOIS J., TORQUEBIAU E., ARNOULT M. H., EGLIN T., MASSE D., ASSOUMA M. H., BLANFORT V., CHENU C., CHAPUIS-LARDY L., MEDOC J. M. & SALL S. N. (2020), *Barriers and Strategies to Boost Soil Carbon Sequestration in Agriculture. Frontiers in Sustainable Food Systems* 4.
- FRIEDLINGSTEIN P., O'SULLIVAN M., JONES M. W., ANDREW R. M., HAUCK J., OLSEN A., PETERS G. P., PETERS W., PONGRATZ J., SITCH S., LE QUERE C., CANADELL J. G., CIAIS P., JACKSON R. B., ALIN S., ARAGAO L., ARNETH A., ARORA V., BATES N. R., BECKER M., BENOIT-CATTIN A., BITTIG H. C., BOPP L., BULTAN S., CHANDRA N., CHEVALLIER F., CHINI L. P., EVANS W., FLORENTIE L., FORSTER P. M., GASSER T., GEHLEN M., GILFILLAN D., GKRTZALIS T., GREGOR L., GRUBER N., HARRIS I., HARTUNG K., HAVERD V., HOUGHTON R. A., ILYINA T., JAIN A. K., JOETZJER E., KADONO K., KATO E., KITIDIS V., KORSBAKKEN J. I., LANDSCHUTZER P., LEFEVRE N., LENTON A., LIENERT S., LIU Z., LOMBARDOZZI D., MARLAND G., METZL N., MUNRO D. R., NABEL J., NAKAOKA S. I., NIWA Y., O'BRIEN K., ONO T., PALMER P. I., PIERROT D., POULTER B., RESPLANDY L., ROBERTSON E., RODENBECK C., SCHWINGER J., SEFERIAN R., SKJELVAN I., SMITH A. J. P., SUTTON A. J., TANHUA T., TANS P. P., TIAN H., TILBROOK B., VAN DER WERF G., VUICHARD N., WALKER A. P., WANNINKHOF R., WATSON A. J., WILLIS D., WILTSHIRE A. J., YUAN W. P., YUE X. & ZAEHLE S. (2020), "Global Carbon Budget 2020", *Earth System Science Data* 12(4), pp. 3269-3340.
- FUJISAKI K., CHEVALLIER T., CHAPUIS-LARDY L., ALBRECHT A., RAZAFIMBELO T., MASSE D., NDOUR Y. B. & CHOTTE J.-L. (2018), "Soil carbon stock changes in tropical croplands are mainly driven by carbon inputs: A synthesis", *Agriculture, Ecosystems & Environment* 259, pp. 147-158.
- FUSS S., LAMB W. F., CALLAGHAN M. W., HILAIRE J., CREUTZIG F., AMANN T., BERINGER T., de OLIVEIRA GARCIA W., HARTMANN J., KHANNA T., LUDERER G., NEMET G. F., ROGELJ J., SMITH P., VICENTE J. L. V., WILCOX J., DEL MAR ZAMORA DOMINGUEZ M. & MINX

- J. C. (2018), "Negative emissions – Part 2: Costs, potentials and side effects", *Environmental Research Letters* 13(6).
- GUENET B., GABRIELLE B., CHENU C., ARROUAYS D., BALESDENT J. M., BERNOUX M., BRUNI E., CALIMAN J. P., CARDINAEL R., CHENS C., CIAISP., DESBOIS D., FOUCHE J., FRANK S., HENAUT C., LUGATO E., NAIPAL V., NESME T., OBERSTEINER M., PELLERIN S., POWLSON D. S., RASSE D. P., REES F., SOUSSANA J. F., SU Y., TIAN H. Q., VALIN H. & ZHOU F. (2021), "Can N₂O emissions offset the benefits from soil organic carbon storage?", *Global Change Biology* 27(2), pp. 237-256.
- HANAN N. P., MILNE E., AYNEKULU E., YU Q. & ANCHANG J. (2021), "A role for drylands in a carbon neutral world?", *Frontiers in Environmental Science* 9, p. 539.
- JOBBAGY E. G. & JACKSON R. B. (2000), "The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation", *Ecological Applications* 10, pp. 423-436.
- MALOU O. P., MOULIN P., CHEVALLIER T., MASSE D., VAYSSIÈRES J., BADIANE-NDOUR N. Y., TALL L., THIAM A. & CHAPUIS-LARDY L. (2021), "Estimates of carbon stocks in sandy soils cultivated under local management practices in Senegal's groundnut basin", *Regional Environmental Change* 21, p. 65.
- NAUDIN K., SCOPEL E., ANDRIAMANDROSO A. L. H., RAKOTOSOLOFO M., ANDRIAMAROSOA RATSIMBAZAFY N. R. S., RAKOTOZANDRINY J. N., SALGADO P. & GILLER K. E. (2011), "Trade-Offs between Biomass Use and Soil Cover. The Case of Rice-Based Cropping Systems in the Lake Alaotra Region of Madagascar", *Experimental Agriculture* 48(02), pp. 194-209.
- PELLERIN S., BAMIÈRE L., LAUNAY C., MARTIN R. L., SCHIAVO M., ANGERS D., AUGUSTO L., BALESDENT J. R. M., BASILE-DOELSCH I., BELLASSEN V., CARDINAEL R. M., CÉCILLON L., CESCHIA E., CHENU C., CONSTANTIN J., DARROUSSIN J. L., DELACOTE P., DELAME N., GASTAL F. O., GILBERT D., GRAUX A.-I., GUENET B., HOUOT S., KLUMPP K., LETORT E., LITRICO I., MARTIN M., MENASSERI S., MÉZIÈRE D., MORVAN T., MOSNIER C., ROGER-ESTRADE J., SAINT-ANDRÉ L., JORGE SIERRA O. T. R., VIAUD V. R., GRATEAU R. G., PERCHEC S. L., SAVINI I. & RÉCHAUCHÈRE O. (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).
- RODRIGUES L., HARDY B., HUYGHEBEART B., FOHRAFELLNER J., FORNARA D., BARANCIKOVA G., BARCENA T. G., DE BOEVER M., DI BENE C., FEIZIENE D., KATTERER T., LASZLO P., O'SULLIVAN L., SEITZ D. & LEIFELD J. (2021), "Achievable agricultural soil carbon sequestration across Europe from country-specific estimates", *Glob Chang Biol* 27(24), pp. 6363-6380.
- RUMPEL C., AMIRASLANI F., CHENU C., CARDENAS M. G., KAONGAM., KOUTIKAL S., LADHA J., MADARI B., SHIRATO Y., SMITH P., SOUDI B., SOUSSANA J. F., WHITEHEAD D. & WOLLENBERG E. (2020), "The 4p1000 initiative: Opportunities, limitations and challenges for implementing soil organic carbon sequestration as a sustainable development strategy", *Ambio* 49(1), pp. 350-360.
- SOUSSANA J. F., LUTFALLA S., EHRHARDT F., ROSENSTOCK T., LAMANNA C., HAVLIK P., RICHARDS M., WOLLENBERG E., CHOTTE J.-L., TORQUEBIAU E., CIAIS P., SMITH P. & LAL R. (2019), "Matching policy and science: Rationale for the '4 per 1000-soils for food security and climate' initiative", *Soil & Tillage Research* 188, pp. 3-15.
- TARNOCAI C., CANADELL J. G., SCHUUR E. A. G., KUHR Y. P., MAZHITOVA G. & ZIMOV S. (2009), "Soil organic carbon pools in the northern circumpolar permafrost region", *Global Biogeochemical Cycles* 23.
- WIESE L., WOLLENBERG E., ALCANTARA-SHIVAPATHAM V., RICHARDS M., SHELTON S., HONLE S. E., HEIDECHE C., MADARI B. E. & CHENU C. (2021), "Countries' commitments to soil organic carbon in Nationally Determined Contributions", *Climate Policy* 21(8), pp. 1005-1019.
- ZOMER R. J., BOSSIO D. A., SOMMER R. & VERCHOT L. V. (2017), "Global Sequestration Potential of Increased Organic Carbon in Cropland Soils", *Scientific Reports* 7.