

Les sols, facteurs d'atténuation ou, au contraire, d'aggravation du changement climatique

Par Suzanne LUTFALLA

Laboratoire de géologie, PSL Research University, CNRS-ENS UMR8538, Paris

Lauric CÉCILLON

Université Grenoble Alpes, IRSTEA, Saint-Martin-d'Hères

et Pierre BARRÉ

Laboratoire de géologie, PSL Research University, CNRS-ENS UMR8538

Dans cet article, nous présenterons comment les sols influencent le climat en tant que réservoir dynamique de carbone. Après avoir rappelé l'origine, la nature et le devenir du carbone des sols, nous montrerons que l'évolution des flux de carbone entre les sols et l'atmosphère est une composante majeure de celle de la concentration en CO₂ atmosphérique. Nous discuterons ensuite des incertitudes fortes qui entourent les évolutions futures des stocks de carbone des sols, à toutes les échelles. Puis, nous reviendrons sur l'avènement, au niveau local (notamment dans le cadre des intercommunalités françaises) comme au niveau international, de politiques volontaristes en matière de séquestration du carbone dans les sols. Nous concluons sur le fait que si les sols ont un fort potentiel d'atténuation du changement climatique et que la réalisation de ce potentiel s'accompagnera de bénéfices très importants pour la qualité des sols, la priorité pour lutter contre le changement climatique reste la baisse des émissions de gaz à effet de serre d'origine anthropique.

Les sols renferment environ trois fois plus de carbone sous la forme de matières organiques que l'atmosphère en contient sous la forme de CO₂ (2 400 giga tonnes de carbone (GtC) contre 800 GtC (Jobbagy et Jackson, 2000)). En prenant en compte les sols gelés des hautes latitudes (le pergélisol), la taille du réservoir mondial de carbone organique des sols atteint les 4 100 GtC (Tarnocai *et al.*, 2009). Les variations (augmentation ou diminution) du stock de carbone organique des sols jouent sur la concentration en CO₂ atmosphérique sur des pas de temps courts, allant de la décennie au siècle. Dans cet article, nous présenterons tout d'abord l'importance du stockage du carbone dans les sols sur l'évolution de la concentration en CO₂ atmosphérique, puis nous exposerons les prévisions d'évolution de ce stock de carbone et, enfin, nous terminerons en discutant de deux exemples de politiques volontaristes de séquestration du carbone dans les sols qui se mettent en place tant au niveau local qu'au niveau international. Elles visent à limiter les changements climatiques et à adapter les territoires et l'agriculture à ces changements. Dans cet article, nous avons fait le choix de nous focaliser sur l'évolution des stocks de carbone organique des sols et des émissions de CO₂

correspondantes, nous ne traiterons donc pas des émissions de CH₄ et de N₂O par les sols qui peuvent elles aussi contribuer au changement climatique.

Les sols, des régulateurs de la concentration en CO₂ atmosphérique

Du carbone dans les sols : un cycle biogéochimique pour des sols vivants

Les plantes fixent le carbone atmosphérique dans leur biomasse, grâce à la photosynthèse. En se développant sur un sol, elles constituent la source principale d'entrée de carbone dans ce sol, sous forme de matières organiques. Ces entrées résultent de l'excrétion de composés organiques au niveau des racines des plantes (exsudation racinaire) et sont liées à la sénescence des plantes ou de certains de leurs organes (chute des feuilles, dépérissement de racines fines, etc.). Le carbone organique entrant dans les sols est à l'origine de la vie dans ces derniers. En effet, les organismes du sol (micro-organismes (bactéries, champignons) et autres animaux vivant dans le sol) organisés en un réseau trophique complexe utilisent ces matières organiques comme sources de matière et

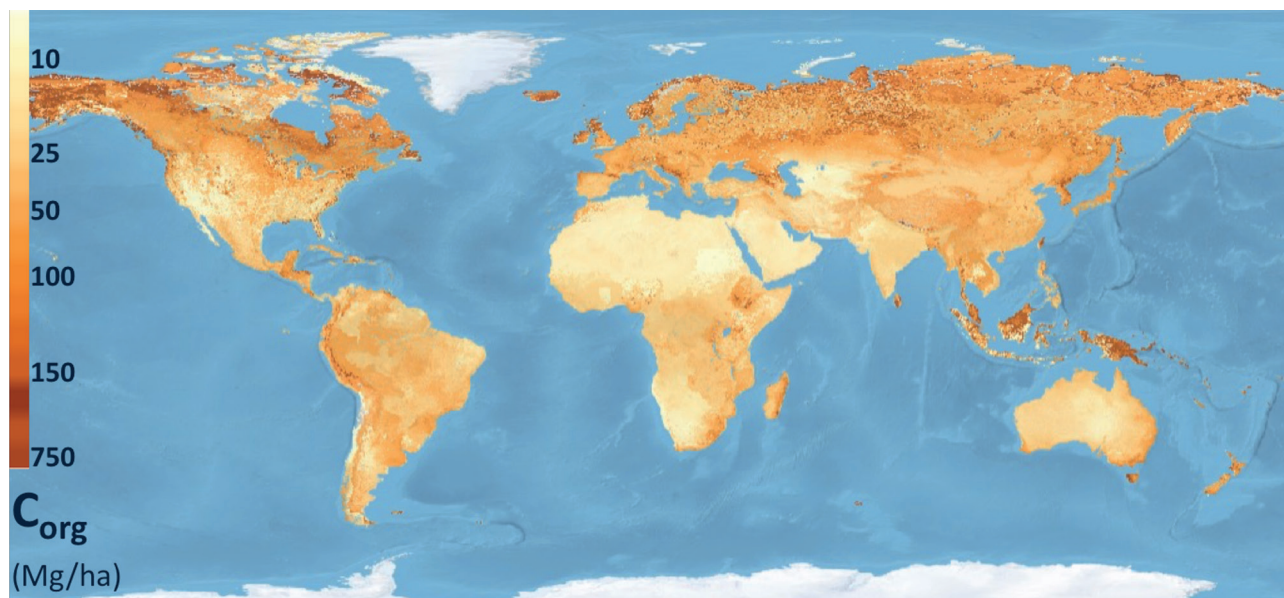


Figure 1 : Carte du monde des stocks de carbone (FAO/Global Soil Partnership ; <http://54.229.242.119/apps/GSOCmap.html>).

d'énergie pour leur métabolisme. En retour, l'activité des organismes du sol génère de nouvelles matières organiques dans les sols et du CO_2 (respiration du carbone organique), la respiration des micro-organismes des sols constituant le principal flux sortant de carbone, des sols vers l'atmosphère. Le carbone organique des sols est ainsi composé d'un continuum de molécules et de fragments organiques qui se trouvent sous forme de composés d'origines végétale, animale et microbienne en cours de décomposition. La vitesse de décomposition des matières organiques du sol par les organismes qui y sont présents dépend principalement de leurs qualités chimiques, de leur protection par la matrice du sol (adsorption sur des minéraux ou piégeage au sein d'agrégats) et des conditions environnementales (par exemple, la température et l'humidité du sol). Le stock de carbone organique d'un sol correspond à la différence entre les entrées et les sorties de carbone intervenues depuis la formation de ce sol. Dans certaines régions, notamment dans des zones fortement pentues ou très ventées, les sorties de carbone par érosion hydrique ou éolienne contribuent également significativement à la réduction du stock de carbone des sols de ces zones.

Les flux de carbone entre les sols et l'atmosphère : une composante majeure de l'évolution du climat

La conversion de forêts ou de prairies, dont les sols sont riches en carbone organique, en sols cultivés, plus pauvres en carbone, génère actuellement un flux de CO_2 des sols vers l'atmosphère d'environ 1 GtC par an (GCP, 2017). Ce flux représente aujourd'hui près de 10 % des émissions de gaz à effet de serre d'origine anthropique. Depuis 1750, le flux de carbone des sols vers l'atmosphère consécutif à des changements d'usage des terres représente environ 136 GtC, soit 25 à 30 % des émissions anthropiques totales enregistrées depuis cette date (LAL, 2004). À l'inverse, les surfaces continentales, notamment les sols, constituent des puits de carbone notables : on

estime que, chaque année, environ 30 % des émissions anthropiques sont captées par les sols et la végétation (~2,5-3 GtC/an). Les échanges de carbone entre les sols et l'atmosphère jouent ainsi un rôle significatif sur l'évolution de la concentration en CO_2 atmosphérique, et donc, sur celle du climat. Connaître l'évolution des flux de carbone entre les sols et l'atmosphère est donc essentiel pour pouvoir prédire celle de la concentration en CO_2 atmosphérique.

Quelles sont les évolutions attendues du stock de carbone des sols au cours du XXI^e siècle ?

Des modèles pour prédire les flux de carbone entre les sols et l'atmosphère

Les modèles climatiques (par exemple, le modèle français ORCHIDEE (<http://www-lsceorchidee.cea.fr/>)) donnent, du fait de leur importance pour l'évolution du climat, une représentation spatialement explicite de la biosphère et du stock de carbone des sols, et de leurs évolutions au fil du temps. Dans ces modèles, la taille du réservoir de carbone des sols dépend des entrées de carbone issues de la production primaire nette des végétaux et des sorties de carbone résultant de la décomposition du carbone du sol par les micro-organismes. La vitesse de décomposition du carbone du sol dépend principalement de la température et de l'humidité du sol qui sont deux des variables directement influencées par le climat. Ces modèles offrent donc une représentation de la boucle de rétroaction existant entre les sols et le climat, dans laquelle l'évolution du stock de carbone des sols dépend de l'évolution du climat, qui, elle-même, dépend de l'évolution du stock de carbone des sols !

Les évolutions de la production primaire nette et de la vitesse de décomposition du carbone des sols ne sont pas faciles à prédire avec précision. Actuellement, les différents modèles disponibles prédisent des évolutions

du stock de carbone des sols très différentes au cours du XXI^e siècle, allant d'une perte de 72 GtC à un gain de 253 GtC (Todd-Brown *et al.*, 2014). De plus, les mécanismes de stabilisation du carbone, et donc le temps de résidence moyen du carbone organique dans les sols, sont mal représentés dans ces modèles globaux (Luo *et al.*, 2016 ; He *et al.*, 2016). Cela illustre la très grande incertitude qui entoure l'évolution du stock de carbone des sols au cours de ce siècle.

Des prévisions d'évolution du stock de carbone des sols incertaines et très contrastées selon les régions du globe

Les évolutions des stocks de carbone des sols au XXI^e siècle vont différer selon les régions du monde. En effet, l'intensité des changements climatiques varie en fonction des régions : la production primaire des végétaux et la décomposition du carbone des sols varieront donc fortement d'une région à une autre. De même, les changements dans l'utilisation des terres différeront selon les zones, et il est difficile d'en anticiper les déterminants socio-économiques. Indépendamment de ces éventuelles évolutions dans l'utilisation des terres, les changements climatiques pourraient conduire à une augmentation des stocks de carbone des sols non gelés de pays comme la Russie ou le Canada, la hausse des températures entraînant une augmentation de la production primaire des végétaux supérieure à celle de la décomposition du carbone dans les sols. En revanche, la fonte d'une partie des pergélisols, ces sols gelés caractéristiques des plus hautes latitudes de ces pays, pourrait être une importante source de génération de gaz à effet de serre au cours du XXI^e siècle, notamment sous forme de méthane (CH₄). Même en excluant les émissions générées par la fonte de ces sols gelés, mais en raisonnant à l'échelle plus large de l'ensemble des pays du Nord, la hausse des stocks de carbone consécutive aux changements climatiques devrait être supérieure à la baisse générée par des changements dans l'usage des terres (Eglin *et al.*, 2010).

Inversement, sans tenir compte des effets liés aux changements dans l'utilisation des terres, le climat plus chaud et plus sec attendu en Afrique et en Amérique Latine va probablement conduire à un bilan global correspondant à une baisse sensible des stocks de carbone des sols. Outre sa contribution à l'augmentation de la concentration de CO₂ dans l'atmosphère, cette baisse des stocks risque de faire peser une sérieuse menace sur la capacité des sols à remplir leur rôle de substrat en matière de production agricole dans des régions déjà vulnérables en termes de sécurité alimentaire. Enfin, la poursuite ou l'intensification de la déforestation prévue dans ces régions risque d'augmenter plus encore la baisse des stocks de carbone des sols (Eglin *et al.*, 2010). Cependant, ces prévisions basées sur des sorties de carbone issues de modèles globaux sont incertaines. De plus, elles ne peuvent être utilisées comme un outil d'aide à la décision pour la gestion de ces territoires. En effet, les simulations à grande échelle ne prennent pas en compte les variations locales de pédoclimats qui influencent fortement les flux de carbone entre les sols et l'atmosphère.



Figure 2 : Profil de sol d'un podzsol meuble issu de sable des landes (référentiel pédologique 2008), sous une plantation de pins maritimes en lande sèche. Site FCBA de Préchac (GIS Coop de données), département de la Gironde, France. Fosse pédologique réalisée par L. Cécillon, L. Soucemarianadin et A. Delahaie.

Des politiques volontaristes en matière d'augmentation des stocks de carbone dans les sols

Comment augmenter les stocks de carbone des sols ?

L'évolution des stocks de carbone des sols influe sur la concentration en CO₂ atmosphérique. Les sociétés humaines, à travers leurs actions, peuvent modifier ce stock de carbone. L'augmentation contrôlée du stock de carbone des sols est donc régulièrement proposée, depuis une vingtaine d'années, comme une solution à l'atténuation du changement climatique (voir l'expertise INRA : Arrouays *et al.*, 2002). La stratégie la plus évidente et la plus consensuelle pour augmenter les stocks de carbone des sols consiste à augmenter les entrées de carbone dans les sols. Une première option consiste à remplacer un usage du sol conduisant à de faibles entrées de carbone par un usage générant des entrées plus fortes

(par exemple, les prairies ou les forêts sont des usages du sol qui génèrent, en moyenne, des entrées de carbone plus importantes que les grandes cultures agricoles). Une autre option est d'augmenter les entrées de carbone en maintenant un usage du sol constant, il s'agit alors de mettre en œuvre des itinéraires techniques « stockants ». Cela peut être réalisé pour l'agriculture, par exemple, en augmentant les restitutions de pailles après récolte, en intégrant des inter-cultures pour réduire les périodes pendant lesquelles le sol reste à nu ou en intégrant des périodes de prairie temporaire dans les rotations culturales. Les augmentations de carbone provoquées par un changement d'usage des terres ou des modifications dans les pratiques agricoles sont variables, elles peuvent aller de quelques dizaines de kilogrammes de carbone par hectare et par an à plus de 10 tC/ha/an pour le cas particulier de la restauration de sols organiques comme les tourbières (Smith *et al.*, 2008 ; Chenu *et al.*, 2014). Inversement, des pratiques ou des usages délétères pour les stocks de carbone et l'arrêt ou l'abandon des pratiques « stockantes » conduisent à d'importantes pertes en carbone des sols. Il s'agit donc, lorsque cela est possible, de mettre en œuvre une stratégie de séquestration du carbone dans les sols et, dans les autres cas, d'empêcher la perte de carbone des sols et contribuer ainsi au maintien des stocks initiaux.

À l'échelle internationale, l'Initiative « 4 pour 1 000 » fédère des acteurs autour de la séquestration du carbone dans les sols

Le rôle positif susceptible d'être joué par les sols dans la lutte contre le changement climatique a été mis en avant pendant la COP21, avec le lancement de l'Initiative « 4 pour 1 000 – Les sols pour la sécurité alimentaire et le climat » (<https://www.4p1000.org/>) sous l'impulsion de la France. Cette initiative vise à promouvoir les pratiques agricoles et forestières qui permettent d'augmenter les stocks de carbone, avec à la clé un triple bénéfice : cela permet 1) d'atténuer le changement climatique en compensant une partie des émissions de gaz à effet de serre (GES), 2) d'augmenter la sécurité alimentaire en améliorant la qualité des sols agricoles et, enfin, 3) de permettre une meilleure adaptation des agro-écosystèmes au changement climatique en augmentant leur résilience. L'intitulé de cette Initiative traduit l'idée suivante : avec un stock de carbone des sols global estimé à 2 400 GtC, une augmentation annuelle de ce stock de 4 pour 1 000 (c'est-à-dire 0,4 %) conduirait à un flux d'environ 10 GtC/an de l'atmosphère vers les sols, compensant ainsi l'intégralité des émissions anthropiques actuelles de gaz à effet de serre (Balesdent et Arrouays, 1999). Cet objectif ambitieux n'est pas réaliste, et ce pour de nombreuses raisons (Soussana *et al.*, 2017). Tout d'abord, une grande partie du stock de carbone des sols se trouve dans des horizons profonds qui, de fait, sont peu impactés, du moins à court terme, par des changements de pratiques agricoles, en outre, seule une partie des sols est cultivée et est donc susceptible d'être impactée par des changements de ce type. Par ailleurs, la multiplicité des acteurs intervenant dans la gestion des sols, c'est-à-dire des millions d'agriculteurs, des propriétaires terriens, des collectivités, etc., rend difficile, voire impossible la mise en place d'une action coordonnée à une grande échelle.

Il est donc clair (l'Initiative sur ce point est sans ambiguïté) que si les sols ont un véritable potentiel d'atténuation ou, au contraire, d'aggravation du changement climatique à travers le stockage ou le déstockage de carbone, ils ne peuvent en aucun cas se substituer à la nécessaire réduction des émissions de GES d'origine anthropique, laquelle demeure la priorité absolue dans le cadre de la lutte contre le changement climatique. Enfin, il faut noter qu'une augmentation du stock de carbone d'un sol améliore la qualité de celui-ci, ce qui pourrait favoriser une augmentation ou, à tout le moins, garantir une meilleure stabilité des rendements agricoles dans certaines zones du globe, contribuant ainsi à accroître la sécurité alimentaire. Cet aspect est aussi important, si ce n'est plus, que l'effet d'atténuation potentiel de la séquestration de carbone dans les sols.

Évaluer et développer la séquestration de carbone dans les sols, une nouvelle obligation à traduire par les intercommunalités françaises dans leurs plans climat (PCAET)

La prise en compte du potentiel du carbone des sols en matière d'atténuation (ou d'aggravation) des changements climatiques a également, depuis peu, une déclinaison locale. En effet, en application du décret n°2016-849 du 28 juin 2016, les établissements publics français de coopération intercommunale à fiscalité propre comptant plus de 20 000 habitants doivent prendre en compte la séquestration nette de carbone par leurs écosystèmes naturels, y compris les sols, dans leurs plans Climat Air Énergie territoriaux (PCAET). Cette prise en compte pose des questions d'ordre scientifique, car l'évaluation précise des stocks de carbone des sols et la prévision de leur évolution demeurent un véritable défi, même au niveau local. Pour l'instant, les méthodes de comptabilisation du carbone organique des sols dans les PCAET ne peuvent s'appuyer que sur des facteurs globaux déterminés à l'échelle nationale par type d'usage des terres, voire par catégorie de pratiques agronomiques. Cette méthodologie est similaire à la méthode Tiers 1 utilisée dans le cadre des travaux du Groupement intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC). Elle est peu précise, car elle ne prend pas en compte les déterminants pédoclimatiques locaux qui influencent grandement la séquestration de carbone dans les sols.

Conclusion

Il est aujourd'hui certain que les sols peuvent contribuer significativement, de manière aussi bien positive que négative, à l'évolution de la teneur en CO₂ atmosphérique, et donc à l'évolution du climat. Le potentiel des sols en matière d'atténuation des changements climatiques commence à être pris en compte dans les politiques publiques. Il convient néanmoins de noter que l'estimation de l'évolution du stock de carbone organique des sols à une échelle locale, et *a fortiori* globale, reste très incertaine. La détermination plus précise de cette évolution et la mise en place de plans d'action pour rendre effective la séquestration de carbone dans les sols passeront nécessairement par la levée de nombreux verrous scientifiques, en sciences « dures » comme en sciences humaines et sociales.

Références bibliographiques

- ARROUAYS D., BALESSENT J., GERMON J.-C., JAYET P. A., SOUSSANA J.-F. & STENGEL P. (eds) (2002), « Contribution à la lutte contre l'effet de serre. Stocker du carbone dans les sols agricoles de France ? », expertise scientifique collective, synthèse INRA, 32 p.
- BALESSENT J. & ARROUAYS D. (1999), "An estimate of the net annual carbon storage in French soils induced by land use change from 1900 to 1999" [French], *comptes rendus de l'Académie d'Agriculture de France* 85(6), pp. 265-277.
- CHENU C., KLUMPP K., BISPO A., ANGERS D., COLNENNE C. & MÉTAY A. (2014), « Stocker du carbone dans les sols agricoles : évaluation de leviers d'action pour la France », *Innovations agronomiques* 37, pp. 23-37.
- EGLIN T., CIAIS P., PIAO S. L., BARRÉ P., BELLASSEN V., CADULE P., CHENU C., GASSER T., KOVEN C., REICHSTEIN M. & SMITH P. (2010), "Historical and future perspectives of global soil carbon response to climate and land-use changes", *Tellus-B* 62, pp. 700-718.
- GCP (2017), Global Carbon Project, <http://www.globalcarbonproject.org/carbonbudget/>
- HE Y., TRUMBORE S. E., TORN M. S., HARDEN J. W., VAUGHN L. J. S., ALLISON S. D. & RANDERSON J. T. (2016), "Radiocarbon constraints imply reduced carbon uptake by soils during the 21st century", *Science* 353, pp. 1419-1424.
- IPCC (2014), "Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change", Core Writing Team, PACHAURI R. K. & MEYER L. A. (eds.), IPCC, Geneva, Switzerland, 151 p.
- JOBAGY 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.
- LUO Y., AHLSTRÖM A., ALLISON S. D., BATJES N. H., BROVKIN V., CARVALHAIS N., CHAPPELL A., CIAIS P., DAVIDSON E. A., FINZI A., GEORGIU K., GUENET B., HARARUK O., HARDEN J. W., HE Y., HOPKINS F., JIANG L., KOVEN C., JACKSON R. B., JONES C. D., LARA M. J., LIANG J., MCGUIRE A. D., PARTON W., PENG C., RANDERSON J. T., SALAZAR A., SIERRA C. A., SMITH M. J., TIAN H., TODD-BROWN K. E. O., TORN M., VAN GROENINGEN K. J., WANG Y. P., WEST T. O., WEI Y., WIEDER W. R., XIA J., XU X. & ZHOU T. (2016), "Toward more realistic projections of soil carbon dynamics by Earth system models", *Global Biogeochemical Cycles* 30(1), pp. 40-56.
- SMITH P., MARTINO D., CAI Z., GWARY D., JANZEN H., KUMAR P., MCCARL B., OGLE S., O'MARA F., RICE C., SCHOLLES B., SIROTENKO O., HOWDEN M., MCALLISTER T., PAN G., ROMANENKOV V., SCHNEIDER U., TOWPRAYOON S., WATTENBACH M. & SMITH J. (2008), "Greenhouse gas mitigation in agriculture", *Phil. Trans. R. Soc. B* 363, pp. 789-813.
- SOUSSANA J.-F., LUTFALLA S., EHRHARDT F., ROSENSTOCK T., LAMANNA C., HAVLÍK P., RICHARDS M., WOLLENBERG E. (LINI), CHOTTE J.-L., TORQUEBIAU E., CIAIS P., SMITH P. & LAL R. (2017), "Matching policy and science: Rationale for the "4 per 1000 – soils for food security and climate" initiative", *Soil Tillage Res.*
- TARNOCAI C., CANADELL J. G., SCHUUR E. A. G., KUHRY P., MAZHITOVA G. & ZIMOV S. (2009), "Soil organic carbon pools in the northern circumpolar permafrost region", *Global Biogeochemical Cycles* 23, GB2023.
- TODD-BROWN *et al.* (2014), "Changes in soil organic carbon storage predicted by Earth system models during the 21st century", *Biogeosciences* 11, pp. 2341-2356.