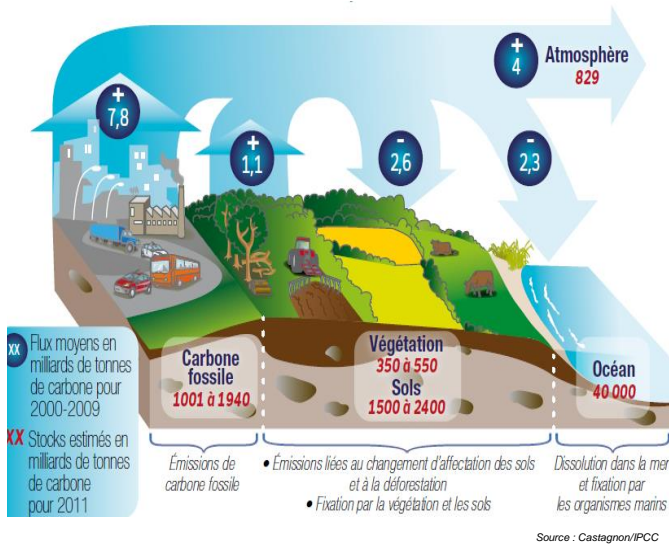


## Note n° 3 — Stocker plus de carbone dans les sols : un enjeu pour le climat et pour l'alimentation — Mars 2018

Flux et stocks de carbone



### Résumé

- Les sols peuvent stocker davantage de carbone qu'ils n'en émettent, dans certaines conditions, encore soumises à des incertitudes d'un point de vue scientifique.
- Stocker plus de carbone dans les sols présente un intérêt majeur, d'une part, pour compenser les émissions anthropiques de CO<sub>2</sub>, d'autre part, pour renforcer la sécurité alimentaire.
- Les programmes de recherche qui, par une meilleure connaissance des sols, permettront de mettre en œuvre des pratiques favorables au stockage de carbone dans les sols agricoles et forestiers notamment, telle l'initiative « 4 pour 1 000 », doivent être poursuivis et encouragés.

M. Roland Courteau, Sénateur, Vice-président

### Contexte de la note

Les questions de réchauffement climatique et de sécurité alimentaire sont brûlantes. Or les sols, **importants réservoirs de carbone** (C) sous la forme de matière organique (MO), représentent un élément essentiel, bien que longtemps sous-estimé, de ces deux sujets. En effet, bien que les sols soient trop souvent vus comme de simples surfaces, ils forment des volumes aux propriétés physico-chimiques complexes et nécessaires à la vie. Ainsi, leur préservation est importante non seulement à l'échelon local car des évolutions, mêmes faibles, du stock de carbone des sols ont des effets majeurs sur leur fertilité, et donc sur la productivité agricole, mais aussi au niveau global, à travers le cycle mondial des gaz à effet de serre (GES). Le sol est **émetteur de GES**, sous la forme de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>), lorsque les matières organiques s'y dégradent mais, en même temps, il contribue au stockage de carbone lorsqu'elles s'y accumulent, la matière organique des sols étant constituée pour plus de 50 % de carbone. Dans certaines conditions, **le sol peut stocker plus qu'il n'émet**. Il y a, au total, plus de carbone dans le sol que dans la végétation qui le recouvre et l'atmosphère réunies, puisqu'il s'agit d'un minimum estimé de 1 500 milliards de tonnes de carbone dans

la matière organique des sols mondiaux, soit plus de deux fois le carbone du CO<sub>2</sub> atmosphérique.

Le rapport de l'OPECST « De la biomasse à la bioéconomie : une stratégie pour la France »<sup>(1)</sup> appelait en 2015 une poursuite des investigations sur la question des relations entre sols et carbone, et tout particulièrement sur les enjeux du stockage de carbone dans les sols<sup>(2)</sup>. C'est l'objet de la présente note.

### Connaissances scientifiques sur le rôle des sols dans le stockage du carbone

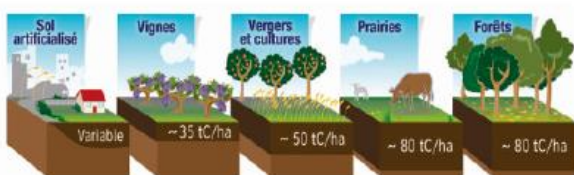
Dans une étude visionnaire parue en 1853 et intitulée « Des climats et de l'influence qu'exercent les sols boisés et non boisés »<sup>(3)</sup>, Antoine-César Becquerel expliquait que « les faits nombreux et variés exposés dans cet ouvrage montrent combien est complexe la question relative à l'influence du déboisement et du défrichement sur les climats, attendu qu'il faut prendre en considération une foule de causes secondaires que l'on néglige ordinairement dans la discussion ». 165 ans après ce travail, cette complexité multicausale dans les interactions entre les sols et le climat continue de se vérifier.

**Le climat influe sur la teneur en carbone organique des sols** en jouant sur les entrées, à

travers la productivité végétale par exemple, et sur les sorties, par l'intermédiaire de l'activité biologique et de l'érosion. Le sol fait figure d'acteur-clé dans les cycles biogéochimiques du carbone. Les flux de carbone dans les sols dépendent de nombreux facteurs : nature des écosystèmes ; nature et quantité des apports de matières organiques ; activité biologique dont dépendent à la fois l'humification et la minéralisation, l'équilibre entre les deux étant principalement fonction des conditions physicochimiques, de la température et des possibilités de liaisons entre les matières organiques et des particules minérales. L'augmentation de la température, la diminution de l'humidité des sols ou encore le travail mécanique du sol favorisent la minéralisation.

Les sols sont marqués par une grande diversité : la quantité maximale de MO qui y est contenue peut fluctuer fortement d'un écosystème à un autre, suivant les variations des différents facteurs évoqués. Selon la nature du sol et son usage, **le stockage de carbone dans les sols est très inégal** : entre tourbières, sols forestiers, sols agricoles, ou encore sols dégradés, artificialisés, voire imperméabilisés, les écarts sont grands <sup>(4)</sup>.

Stock de carbone dans les sols selon l'usage



Source : ADEME (valeur pour les 30 premiers cm de sol).

**Le temps de résidence du carbone dans le sol est** en moyenne de quelques décennies mais il est **très variable** puisqu'il peut aller, pour un même sol, de quelques heures à plusieurs millénaires, sous l'effet de plusieurs facteurs <sup>(5)</sup>. Ce temps est augmenté par l'association de la matière organique aux particules minérales du sol, en particulier aux argiles, car elles assurent une protection physique et physicochimique vis-à-vis des micro-organismes décomposeurs <sup>(6)</sup>. La protection physique des matières organiques est un processus dont l'amplitude est complexe à estimer, et qui est susceptible d'être affectée par les pratiques culturales comme par les changements climatiques. Ainsi, un broyage fin des agrégats du sol s'accompagne d'une minéralisation accrue du carbone organique. Favorisée par le travail mécanique et l'absence de couverture végétale, l'érosion est, sous l'effet du ruissellement, un facteur de destruction des sols et de perte de MO. **La dégradation des sols**, par destruction du complexe organo-minéral ou par érosion, **réduit leur capacité à stocker le carbone** et leur rendement de produits agricoles et forestiers. Elle aboutit, au pire, à la désertification. Il faut pourtant plusieurs milliers d'années pour « faire un sol » <sup>(7)</sup>. Le

sol est donc une ressource non renouvelable à l'échelle de temps des activités humaines. Aujourd'hui, 25 % des sols de la planète sont fortement dégradés (41 % pour les sols cultivés) auxquels s'ajoutent chaque année 12 millions d'hectares supplémentaires. **L'artificialisation des sols** <sup>(8)</sup> a pour conséquences : leur imperméabilisation (ils ne rendent alors plus d'autre service que de supporter les constructions et les voies de transport), la fragmentation des milieux et une atteinte à la biodiversité, un mitage de l'espace agricole et une moindre régulation des flux d'eau (aggravation des inondations) et des températures chaudes en ville.

#### Artificialisation et imperméabilisation des sols

Un sol artificialisé risque de devenir un sol imperméabilisé, de manière irréversible. L'imperméabilisation induit une transformation profonde des sols, porte atteinte à la biodiversité et diminue considérablement les stocks de carbone dans la végétation et les sols. Après un pic de 830 km<sup>2</sup> par an entre 2006 et 2008 (+ 1,8 % par an), les surfaces artificialisées en France ont crû de 540 km<sup>2</sup> par an entre 2008 et 2014 (+ 1,1 % par an). Selon la méthode de calcul utilisée, l'estimation de la surface artificialisée varie de 5,6 % à 9,3 % du territoire national. L'enjeu est de limiter l'artificialisation nette des sols, de limiter l'imperméabilisation des espaces artificialisés et de compenser autant que possible l'artificialisation, tout en assurant la capacité à répondre aux besoins sociaux, notamment en matière de logement.

**L'épaisseur du sol est elle aussi très diverse**, puisqu'elle peut aller de quelques centimètres à quelques mètres tout en jouant un rôle essentiel, mais différencié, selon sa profondeur et sa nature physicochimique dans les cycles de l'eau, du carbone, du phosphore et de l'azote. L'utilisation des sols pour stocker davantage de carbone, grâce aux matières organiques qu'ils contiennent, rend nécessaire d'évaluer le niveau maximal de matières organiques qu'un sol peut contenir, sachant que ce niveau dépend de nombreux facteurs : du bilan humidification/minéralisation, des apports de matières organiques et de destruction de l'humus à la suite de sa minéralisation, mais aussi de son épaisseur (les apports de matières organiques y sont intégrés), de sa minéralogie ou, encore, de la granulométrie de ses particules (argiles, limons, sables...).

Les méthodes de quantification du carbone dans le sol relèvent de deux types : des méthodes de laboratoire, dites « classiques », qui s'appuient sur la combustion sèche ou l'oxydation sulfochromique d'un échantillon de sol, et des mesures spectroscopiques (ultraviolet-visible et infrarouges), d'utilisation plus

récente pour ce qui concerne la quantification du carbone du sol. Ces mesures reposent sur le traitement du spectre de réflectance du sol qui dépend, entre autres paramètres influents, de sa teneur en matière organique. Les résultats varient selon les différentes profondeurs de sol retenues : 30 ou 40 premiers centimètres, un mètre, deux mètres... En France, les sols agricoles et forestiers (environ 80 % du territoire) stockent actuellement 4 à 5 Gt de carbone (soit 15 à 18 Gt de CO<sub>2</sub>) dont près d'un tiers dans la biomasse (arbres principalement) et plus des deux tiers dans les sols au sens strict, et toute variation positive ou négative de ce stock influe sur les émissions nationales de GES. Pour mémoire, ces émissions sont estimées à 0,5 Gt CO<sub>2</sub> éq/an (valeur 2011). Les dynamiques d'évolution des stocks de carbone dans nos sols présentent cependant de fortes incertitudes.

### ■ Les incertitudes scientifiques

**Stocker plus de carbone dans les sols présente un intérêt pour compenser les émissions anthropiques de CO<sub>2</sub>** face au réchauffement climatique et pour la sécurité alimentaire car la présence accrue de matière organique améliore la structure physico-chimique du sol, sa résistance à l'érosion et sa fertilité, donc le rendement des cultures. L'amélioration des connaissances scientifiques sur le stockage du carbone dans les sols, en particulier sur l'âge du carbone stocké et les cycles biogéochimiques à différentes échelles de temps et d'espace, reste nécessaire. En effet, selon le contexte, une même pratique favorable au stockage de carbone n'engendre pas le même effet. Par exemple, les tourbières, certaines prairies ou forêts approchent déjà un niveau de stockage maximal. Les efforts ne pourront donc porter que sur une partie des sols. Par ailleurs, la saturation ou niveau maximal de capacité de stockage globale demeure incertaine. Un stockage additionnel de carbone ne serait donc qu'une solution pertinente à moyen terme, limitée dans le temps, car les sols atteindraient un nouvel équilibre après quelques décennies jusqu'à saturation de leurs capacités (la durée d'atteinte de ce nouvel équilibre peut être de 20 ans comme de plus de 100 ans, selon les conditions). De plus, stocker plus de carbone suppose une disponibilité accrue d'azote (N) et de phosphore (P) pour permettre la croissance des végétaux et pour stabiliser la MO, ce qui – pour éviter des engrais de synthèse – plaide pour le recyclage des effluents et la culture de légumineuses<sup>(9)</sup>. L'émission d'autres GES, comme le méthane (CH<sub>4</sub>) et les oxydes d'azote (NO<sub>x</sub>), doit être surveillée, afin qu'un effort en matière de stockage de carbone dans les sols ne conduise pas à les augmenter<sup>(10)</sup>.

### L'initiative « 4 pour 1 000 »

Lancée le 1<sup>er</sup> décembre 2015 dans le cadre de la COP21, cette initiative ambitieuse vise à contribuer à **compenser les émissions nettes de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère à l'échelle mondiale** (4,3 milliards de tonnes de carbone par an), **par une augmentation annuelle de 0,4 % ou 4 pour 1 000 du stock de carbone des sols**. Cette cible représente, selon le mode de calcul, 3,4 milliards de tonnes de carbone sur un total de 860 milliards dans les 40 premiers cm de sol, ou 6,3 milliards sur un total de 1 580 milliards dans le premier mètre de sol. Ces deux résultats différents expliquent une partie des controverses autour de l'initiative.

Cette initiative pour le climat et la sécurité alimentaire vise à **fédérer les acteurs publics et privés volontaires** (États, collectivités, entreprises, organismes de recherche, ONG...). Elle regroupe environ 150 membres dans un consortium, dont le président est Ibrahim Mayaki et le vice-président Stéphane Le Foll, et 281 partenaires réunis dans un forum consultatif. Elle s'appuie aussi sur un comité scientifique et technique (CST) de quatorze membres dont les membres français sont Claire Chenu, professeur à AgroParisTech, et Jean-François Soussana, vice-président de l'INRA.

La mise en œuvre de l'initiative, à travers des projets et des recherches, est en cours et la France y est particulièrement engagée, avec un projet agro-écologique national. L'INRA, l'ADEME et ARVALIS rendront un rapport « 4 pour 1 000 France » d'ici à la fin de l'année 2018, dans le but d'identifier les pratiques agricoles et sylvicoles adaptées, d'évaluer leur coût, de chiffrer et de cartographier le potentiel de stockage, de quantifier les autres effets induits (rendement, émissions d'autres GES, lessivage de nitrate, consommation d'eau...), d'identifier les freins à l'adoption et de proposer des politiques incitatives.

L'objectif mondial de stockage fixé par l'initiative est élevé et sera difficile à évaluer chaque année. Il doit donc plutôt être vu comme un horizon vers lequel tendre, en complément des efforts de réduction globale des émissions de gaz à effet de serre.

### ■ Les perspectives politiques et de recherche

**La réflexion internationale** se poursuit depuis le protocole de Kyoto, qui vise à augmenter les puits de carbone<sup>(11)</sup> et a complété en 1997 la Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques (CCNUCC), adoptée lors du Sommet de la Terre à Rio de Janeiro en 1992. Le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC)

intègre de plus en plus le rôle des sols dans ses analyses. Il en sera ainsi pour ses trois rapports spéciaux prévus d'ici à la fin de l'année 2018, portant sur : le réchauffement de 1,5°C<sup>(12)</sup> ; les changements climatiques et les océans et la cryosphère<sup>(13)</sup> ; les liens entre le changement climatique, la désertification, la dégradation des terres, la gestion durable des terres, la sécurité alimentaire et les flux de GES dans les écosystèmes terrestres<sup>(14)</sup>. La FAO a conduit un travail spécifique sur le sujet<sup>(15)</sup>. L'Union européenne, qui s'est engagée à réduire d'ici à 2030 d'au moins 40 % ses émissions de GES par rapport à 1990, donne une place grandissante au stockage du carbone dans les sols : le **règlement « LULUCF »** (pour *land use, land use change and forestry*) en cours d'adoption<sup>(16)</sup>, fait du carbone des sols l'un des objectifs de l'Union en matière climatique ; le **projet de directive sur la protection des sols**<sup>(17)</sup> identifie la diminution de la MO des sols comme l'une des huit menaces contre lesquelles lutter ; et, depuis 2017, les mesures agro-environnementales et climatiques (MAEC) de la politique agricole commune (PAC) sont enrichies d'une **MAEC « sols »**, visant la réduction du travail du sol, la mise en place de couverts végétaux et la diversification des rotations culturales dans le but, notamment, d'accroître la MO des sols<sup>(18)</sup>. En France, la politique d'atténuation du changement climatique s'incarne dans la **stratégie nationale bas carbone**<sup>(19)</sup> (SNBC), la **stratégie pour la bioéconomie** et la **stratégie nationale de mobilisation de la biomasse**<sup>(20)</sup> (SNMB) prévues par la loi relative à la transition énergétique pour la croissance verte (TECV) du 17 août 2015. La SNBC a recours au label « bas carbone » et la SNMB inclut un volet sur la séquestration du carbone. La question est sensible car la SNMB pourrait avoir de nombreuses incidences négatives sur l'enjeu de protection de la qualité des sols : la valorisation économique de la biomasse est souvent supérieure au maintien des sols en l'état, faute d'incitations spécifiques (dans le cas où prélever plus de bois s'accompagne d'une promotion de l'agroforesterie, cette valorisation peut toutefois être bénéfique). La tendance à l'artificialisation du foncier agricole et le développement d'usages non alimentaires de la biomasse issue de l'agriculture et de la forêt impliquent une vigilance particulière sur les conflits d'usages qui peuvent être engendrés. La mise en œuvre nationale de l'initiative « 4 pour 1 000 » sera donc à suivre avec attention et nécessitera un effort en matière de recherche<sup>(21)</sup> sur un plan national, européen et international.

#### ■ Les recommandations de l'Office

- **Poursuivre et amplifier, au niveau international, l'initiative « 4 pour 1 000 »**, dans son volet « recherche », comme dans son volet « projets » : les sciences des sols, par nature interdisciplinaires, devront permettre d'éclairer les mesures à mettre en

œuvre et les pratiques favorables au stockage de carbone dans les sols agricoles et forestiers (agroforesterie, implantation de cultures intermédiaires ou intercalaires, agriculture de conservation pour réduire le travail du sol...).

- **Construire une PAC incitative au stockage de carbone dans les sols** : rémunérer les services écosystémiques fournis par les agriculteurs, diffuser les bonnes pratiques, éviter de laisser le sol à nu et donc allonger la durée de couverture des sols, y compris avec la culture de légumineuses, soutenir les prairies et supprimer la règle classant en prairie temporaire les seules prairies de durée de vie de moins de cinq ans, qui présente l'effet pervers d'inciter à retourner les prairies. Au regard du stockage possible au sein des surfaces agricoles de l'UE<sup>(22)</sup>, de l'ordre de 115 millions de tonnes de carbone par an et selon un prix de 30 euros la tonne de carbone, la valeur en jeu s'élève à 3,5 milliards d'euros (soit 6 % des 56 milliards d'euros de budget annuel de la PAC). En raison des difficultés à évaluer rigoureusement les variations annuelles de stockage dans chaque exploitation, cette nouvelle PAC devrait moins reposer sur un contrôle des résultats que sur une contractualisation autour d'objectifs et de moyens, au sein par exemple de « zones homogènes » délimitées par les États membres sur leur territoire.

- **Se doter d'une stratégie nationale sur les sols** et mettre en œuvre l'initiative « 4 pour 1 000 » selon une approche territoriale, en veillant à la cohérence des actions conduites, en particulier par le ministère de la Transition écologique et solidaire et par le ministère de l'Agriculture, la SNBC et la SNMB ne devant en aucun cas se contredire. Le pilotage de ces politiques devra s'appuyer sur les expertises de l'INRA et du programme « GESSOL » (« GESTion du patrimoine SOL ») et sur les inventaires du centre interprofessionnel technique d'études de la pollution atmosphérique (CITEPA), qui comptabilise les sources et les puits de GES, ainsi que du système d'information sur les sols et du réseau de mesure de la qualité des sols (RMQS) du « GisSol » (groupement d'intérêt scientifique sur les sols). La mesure des stocks de carbone à un moment donné est satisfaisante mais la compréhension fine de leurs évolutions dans le temps reste un enjeu pour la recherche scientifique. Plus généralement, les sols sont un compartiment de la zone superficielle de notre planète, appelée « zone critique » par les géologues, dont le fonctionnement global demeure mal compris mais qui régule la formation des sols, la composition de l'atmosphère, la qualité des eaux et la durabilité des écosystèmes.

Sites Internet de l'Office :

<http://www.assemblee-nationale.fr/commissions/opepst-index.asp>  
<http://www.senat.fr/opepst>

## Références

- (1) Cf. <https://www.senat.fr/notice-rapport/2015/r15-380-notice.html>
- (2) Ouvrages pouvant être mentionnés : A.Bispo, C.Guellier, E.Martin, J.Sapijanskas, H.Soubelet et C.Chenu, « Les sols : Intégrer leur multifonctionnalité pour une gestion durable », éditions Quae, 2016, M.-C.Girard, C.Schvartz et B.Jabiol « Étude des sols. Description, cartographie, utilisation », éditions Dunod, 2017, la brochure de l'ADEME « Carbone organique des sols », 2016, le rapport INRA-ADEME « Quelle contribution de l'agriculture française à la réduction des émissions de gaz à effet de serre ? », 2013, les rapports du GIEC, du GISSol et de l'IPCC (Cf. « Climate Change: The Physical Science Basis », 2013), R.Calvet, C. Chenu S.Houot « Les matières organiques des sols : rôles agronomiques et environnementaux », éditions France Agricole, 2011, M.-C.Girard, C.Walter, J.-C.Rémy, J.Berthelin et J.-L.Morel, « Sols et environnement », éditions Dunod, 2011, N.Thybaud « Capter et stocker le CO<sub>2</sub> dans le sous-sol », 2007 éditions BRGM, R.Calvet, « Le sol, propriétés et fonctions », 2003, éditions France Agricole et le rapport d'expertise de l'INRA « Stocker du carbone dans les sols ? », 2002. Articles pouvant être cités : B.Minasny et al. « Soil carbon 4 per mille » *Geoderma*, n° 292, 2017, J.W. van Groenigen et al. « Sequestering Soil Organic Carbon: A Nitrogen Dilemma », *Environmental Science & Technology*, n° 51 (9), 2017, M.-F.Dignac, D.Derrien, P.Barré, S.Barot, L.Cécillon, C.Chenu, T.Chevallier, G.T.Freschet, P.Garnier, B.Guenet, M.Hedde « Increasing soil carbon storage: mechanisms, effects of agricultural practices and proxies. A review », *Agronomic Sustainable Development*, n° 37-14, 2017, A.Chabbi et al. « Aligning agriculture and climate policy », *Nature Climate Change*, 2017, R.Lal, « Beyond COP 21: potential and challenges of the "4 per Thousand" initiative », *Journal of Soil and Water Conservation*, n° 71(1), 2016, D.Derrien, M.-F.Dignac, I.Basile-Doelsch, S.Barot, L.Cécillon, C.Chenu, M.Hedde « Stocker du C dans les sols. Quels mécanismes, quelles pratiques agricoles, quels indicateurs ? » *Étude et Gestion des Sols*, n° 23, 2016, U.Stockmann et al. « The knowns, known unknowns and unknowns of sequestration of soil organic carbon », *Agriculture, Ecosystems & Environment*, n° 164, 2013, D.S.Powlson, A.P.Whitmore, K.Goulding, « Soil carbon sequestration to mitigate climate change: a critical re-examination to identify the true and the false », *European Journal of Soil Science*, n° 62 (1), 2011, R.Lal « Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security », *Science*, n° 304 (5677), 2004, J.Six, R. T.Conant, E.A.Paul, K.Paustian « Stabilization mechanisms of soil organic matter: implications for C-saturation of soils », *Plant and soil*, n° 241(2), 2002, W.H.Schlesinger, « Carbon sequestration in soils: some cautions amidst optimism », *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 82(1), 2000.
- (3) Antoine-César Becquerel, « Des climats et de l'influence qu'exercent les sols boisés et non boisés », éditions Firmin Didot Frères, 1853.
- (4) Les tourbières ne couvrent que 3 à 5 % des terres émergées mais contiendraient ainsi 30 % du carbone organique total de tous les sols. Leur potentiel de stockage supplémentaire est très faible. À l'inverse, le potentiel de séquestration du carbone est estimé à 1,4 Gt C/an pour les sols agricoles et à plus de 2 Gt C par an pour les autres sols, dont la forêt et l'agroforesterie pour lesquelles un tiers du carbone additionnel serait stocké dans les sols.
- (5) Parmi ces facteurs peuvent être mentionnées la composition de la matière organique et diverses conditions locales (température, humidité, aération, érosion...).
- (6) La capacité des minéraux à protéger la matière organique de la minéralisation, grâce aux liaisons organominérales, est une variable déterminante car elle affecte fortement les vitesses de minéralisation (une partie des matières organiques n'est pas biodégradée à la vitesse à laquelle sa nature chimique le permettrait).
- (7) Ces évaluations sont démontrées par les reconstitutions paléoclimatiques et l'étude des sédiments lacustres.
- (8) L'INRA et l'Ifsttar ont conduit une expertise scientifique sur l'artificialisation des sols, publiée en décembre 2017 : <https://inra-dam-front-resources-cdn.brainsonic.com/ressources/afile/420284-12ef6-resource-artificialisation-des-sols-rapport-en-francais.pdf>
- (9) Comme les arbres, les légumineuses présentent l'intérêt de fixer davantage l'azote atmosphérique dans les sols.
- (10) L'agriculture devra d'autant plus veiller à maîtriser ses émissions d'autres GES que les pratiques tendant à augmenter le stockage de carbone dans les sols pourraient avoir des effets indésirables au niveau des exploitations, comme des émissions de méthane et d'oxydes d'azote ou, encore, la diffusion de nitrates. Pour mémoire, l'agriculture et la forêt représentent d'ores et déjà 20 % des émissions nationales de GES : 10 % pour le protoxyde d'azote (N<sub>2</sub>O), sous l'effet des engrais azotés ; 8 % pour le méthane (CH<sub>4</sub>), lié à l'élevage, et 2 % pour le dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>), en raison de l'usage d'énergie fossile.
- (11) Le protocole de Kyoto prévoit de limiter les émissions de GES et, notamment, d'augmenter les puits de carbone. Les conférences des parties de Bonn, de Marrakech et de Durban ont inclus la possibilité de comptabiliser les stocks de carbone des sols. Cf. [http://unfccc.int/portal\\_francoophone/essential\\_background/kyoto\\_protocol/items/3274.php](http://unfccc.int/portal_francoophone/essential_background/kyoto_protocol/items/3274.php)
- (12) Rapport du GIEC : « Special Report on impacts of global warming of 1.5°C » ou « SR 1.5 ».
- (13) Rapport du GIEC : « Special Report on climate change and oceans and the cryosphere » ou « SROCC ».
- (14) Rapport du GIEC : « Special Report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems » ou « SR Land ».
- (15) Cf. le rapport de la FAO « Unlocking the Potential of Soil Organic Carbon » à la suite de la Conférence internationale sur le carbone organique du sol (21-23 Mars 2017) : <http://www.fao.org/documents/card/en/c/25eaf720-94e4-4f53-8f50-cdfc2487e1f8/>
- (16) Cf. le projet de règlement « LULUCF » : [https://ec.europa.eu/clima/lulucf\\_en](https://ec.europa.eu/clima/lulucf_en)
- (17) Cf. le projet de directive sur la protection des sols : <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/?uri=LEGISSUM%3A128181>
- (18) Cette MAEC est facultative : seules les régions qui le souhaitent la mettront en place.
- (19) « Stratégie nationale bas carbone » 2015. Pour mémoire, l'objectif inscrit dans la loi TECV est la diminution des émissions de gaz à effet de serre à hauteur de 40 % en 2030 et de 75 % en 2050, par rapport à 1990.
- (20) Cf. l'arrêté du 26 février 2018 portant publication de la stratégie nationale de mobilisation de la biomasse <https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/biomasse-energie>
- (21) Un effort de coordination de la recherche internationale et européenne sur le stockage du carbone dans les sols est en cours autour de l'initiative CIRCASA (« Coordination of International Research Cooperation on soil Carbon Sequestration in Agriculture »). Ce projet est notamment financé par le programme « Horizon 2020 » de l'UE, avec le groupe consultatif pour la recherche agricole internationale (GCRAI ou CGIAR en anglais). De plus, la France et l'Europe ont investi dans de grandes infrastructures de recherche sur l'étude et la surveillance des sols et les échanges de gaz et d'énergie entre les sols et l'atmosphère ou les eaux dans le cadre des changements environnementaux : ICOS (Integrated Carbon Observation System <https://icos-france.fr/>), AnaEE (Analysis And Experimentation On Ecosystems <https://www.anaee-france.fr/>) et OZCAR (Observatoires de la Zone Critique, application et recherche <https://icos-france.fr/>), coordonnées par l'Alliance nationale de recherche pour l'environnement (AllEnv). L'initiative « 4 pour 1 000 » devrait aussi contribuer à ces recherches (cf. <https://www.4p1000.org/fr>).
- (22) Rapport CAPRESE-SOIL (CARbon PREservation and SEquestration in agricultural soils) du JRC (Joint Research Centre) de la Commission européenne, 2013 ; cf. [http://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC88295/caprese\\_final%20report-v2.pdf](http://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC88295/caprese_final%20report-v2.pdf)

---

## *Experts scientifiques consultés*

---

Mme Valérie MASSON-DELMOTTE, directrice de recherche au CEA, membre du GIEC et du conseil scientifique de l'OPECST

M. Philippe MAUGUIN, ingénieur général des ponts, des eaux et des forêts, président-directeur général de l'INRA

M. Jean-François SOUSSANA, vice-président de l'INRA, chargé de la politique internationale, membre du GIEC, conseil scientifique de l'initiative « 4 pour 1000 », coordinateur de l'initiative CIRCASA

Mme Claire CHENU, professeur à AgroParisTech, conseil scientifique de l'initiative « 4 pour 1000 », présidente du conseil scientifique du programme Gessol et ambassadrice de l'année internationale des sols (2015)

M. Thierry CAQUET, directeur scientifique « environnement » de l'INRA

Mme Isabelle FEIX, experte « sol » à l'ADEME

M. Jérôme MOUSSET, chef du service agriculture et forêt à l'ADEME, groupement d'intérêt scientifique Sol (GIS Sol) ;

M. Sylvain PELLERIN, directeur de recherche à l'INRA (Bordeaux), coordinateur de l'étude de l'INRA « Dix mesures pour réduire les GES par les pratiques agricoles »

M. Dominique ARROUAYS, ingénieur de recherche à l'INRA (Orléans), ancien président de l'association française pour l'étude des sols (AFES), expert auprès du GIEC

M. Jean Marc CALLOIS, directeur du département « Territoires » de l'Irstea

M. François LAURENT, responsable du service agronomie-économie-environnement chez ARVALIS – Institut du végétal ;

M. Philippe CIAIS, directeur de recherche au laboratoire des sciences du climat et l'environnement, médaille d'argent du CNRS en 2017

M. Jérôme GAILLARDET, professeur à l'Institut de physique du globe de Paris

Mme Delphine DERRIEN, directrice de recherche à l'INRA (Nancy)

M. Laurent AUGUSTO, directeur de recherche à l'INRA (Bordeaux)

M. Florian CLAEYS, chercheur au Cirad, a représenté M. Hervé Saint Macary, directeur de recherche au Cirad, référent du projet « 4 pour 1000 » au Cirad

M. Michel GRIMALDI, chercheur à l'IRD, a représenté M. Jean-Luc Chotte, directeur de recherche à l'IRD, référent du projet « 4 pour 1000 » à l'IRD

Mme Solène DEMONET, coordinatrice du projet « Protection des sols » de France Nature Environnement, membre de l'association française pour l'étude des sols (AFES)

M. Camille DORIOZ, chargé de mission « agriculture » chez France Nature Environnement

Mmes Virginie MONTAGNE (INRA), Anne BLANCHART (ADEME-Université de Lorraine) et Aurélie CAMBOU (ADEME-AgroCampus d'Angers), M. Colas ROBERT (Centre interprofessionnel technique d'études de la pollution atmosphérique-Citepa), jeunes chercheurs

---

## *Personnes rencontrées*

---

Mme Brigitte ALLAIN, ancienne députée, présidente du Club parlementaire pour la protection et l'étude des sols

### *Ministère de l'Agriculture et de l'alimentation :*

Mme Héloïse PESTEL, sous-directrice en charge de l'international, et sa prédécesseure Mme Marie-Noëlle LE HÉNAFF

Mme Murielle TROUILLET, chargée du suivi de l'initiative « 4 pour 1 000 »

Mme Valérie DERMAUX, chef du bureau de la mondialisation et de la sécurité alimentaire, et son prédécesseur M. Ludovic LARBODIERE

M. Denis GOURDON, chargé de mission « changement climatique » et initiative « 4 pour 1 000 » au bureau de la mondialisation et de la sécurité alimentaire

Mme Marie-Françoise SLAK, chargée de mission « sols » au bureau des sols et de l'eau

### *Ministère de la Transition écologique et solidaire :*

Mme Stéphanie CROGUENNEC, chef du département de lutte contre l'effet de serre, Direction générale de l'énergie et du climat

M. Olivier DE GUIBERT, adjoint au chef du département de lutte contre l'effet de serre

M. Joseph LUNET, chargé de mission « agriculture et forêt » au département de lutte contre l'effet de serre

M. Pascal DOUARD, ingénieur général des ponts, des eaux et des forêts, Conseil général de l'environnement et du développement durable (CGEDD-collège « Énergie et climat »)