

Avis du conseil scientifique du comité de bassin Seine-Normandie sur le rôle essentiel du sol pour la ressource en eau

Présenté au comité de bassin le 21 juin 2022

Cet avis fait suite à plusieurs demandes du comité de bassin impliquant le sol, notamment l'effet de l'épandage des boues agro-industrielles sur le stockage de carbone, l'impact de différentes pratiques agricoles sur les services écosystémiques, la capacité des sols à dégrader les pesticides ou les effets de l'imperméabilisation... Il est basé sur des références scientifiques et les auditions de neuf chercheurs lors des réunions du conseil scientifique pour lesquelles les références et diaporamas sont accessibles dans l'avis in extenso.

Résumé

Le sol est à la fois un support physique, un réservoir d'éléments nutritifs, d'eau, de carbone, et un milieu vivant et complexe, sans cesse transformé par la vie animale et végétale, dans des rapports étroits de coopération et de compétition entre micro et macro-organismes. Il constitue pour les sociétés une ressource naturelle limitée par sa surface mais aussi, s'il est dégradé, par le temps nécessaire à sa formation, qui peut prendre des dizaines de milliers d'années.

Le sol est important pour l'eau car il est le premier récepteur de l'eau de pluie. Sa couverture, sa structure et sa composition vont déterminer la part de cette eau qui va ruisseler, rester dans les sols à disposition des plantes, ou s'infiltrer vers les nappes. Un des éléments clés du sol est la matière organique qui maintient l'eau du sol, réduit son érosion et nourrit l'activité biologique. De fait, les sols contiennent un quart de la diversité des espèces vivantes connues, quelques animaux (vers, insectes) et de nombreux micro-organismes (bactéries, archées...) et champignons. Cette vie du sol est cruciale, car c'est son activité qui permet **i)** d'améliorer la structure du sol notamment par des réseaux (mycélium des champignons, galeries des vers de terre...) qui facilitent la circulation de l'air et l'eau ; **ii)** de recycler et minéraliser les nutriments, les rendant ainsi de nouveau assimilables notamment par les plantes ; **iii)** de casser les molécules pour y trouver ses aliments, jouant ainsi un rôle épurateur notamment en favorisant la dégradation des polluants, ce qui réduit la dégradation de la qualité des eaux ; **iv)** de limiter le développement de pathogènes via un réseau complexe et plus ou moins stable d'interactions entre les microorganismes. Ainsi, **un sol en bonne santé** combine à la fois une biodiversité du sol abondante, une teneur importante en matière organique, une fertilité chimique équilibrée ainsi qu'une structure du sol stable et fonctionnelle, et enfin une bonne capacité à contenir de l'eau tout en favorisant son infiltration et la dégradation des polluants.

Le sol est menacé par des activités humaines conduisant à son artificialisation, son imperméabilisation, une modification de sa structure (compaction, labour, érosion...) et de sa composition chimique (polluants). Ces pratiques affectent la vie des sols et la complexité des interactions. Les sols urbains sont clairement dégradés (technosols et anthroposols), même si quelques parcelles préservées peuvent avoir des sols en bonne santé. Les sols agricoles affrontent plusieurs menaces. Par définition, ces sols subissent l'export de la production (végétale ou animale), ce qui réduit les apports en matière organique au sol et finit par les appauvrir si des amendements et fertilisations adéquates ne sont pas apportés. De plus, certaines pratiques agricoles dégradent la santé des sols, comme le labour, qui favorise l'aération du sol mais aussi la minéralisation rapide de la matière organique, ou comme l'usage de pesticides qui affecte la vie du sol à des doses plus ou moins élevées.

Les solutions pour favoriser une bonne santé des sols sont néanmoins nombreuses : il faut tout d'abord éviter ou réduire l'imperméabilisation et l'artificialisation, ce qui nécessite d'aller au-delà du zéro artificialisation nette, la pollution des sols (y compris par les pesticides), et le travail du sol. Le non labour présente de nombreux avantages, mais s'accompagne souvent d'un usage important d'herbicides, qui, bien qu'en partie adsorbés par la matière organique dans les premiers centimètres du sol, se retrouvent transférés, ainsi que leurs métabolites, dans les rivières et nappes de façon alors comparable à des sols sous labours.

La présence d'une couverture végétale tout au long de l'année, et de préférence une végétation pérenne, est très favorable au sol. De fait, les couverts arborés, dont les racines favorisent la circulation de l'eau, permettent de réduire le ruissellement et l'érosion tout en présentant l'avantage de réduire également les transferts de polluants. L'agroforesterie, en favorisant l'activité biologique en profondeur, se montre capable de réduire fortement les transferts de pesticides vers le milieu.

Les sols peuvent contribuer à l'atténuation du changement climatique si le taux de carbone stable augmente. Pour cela, il faut alimenter les sols en carbone, ce qui se fait naturellement par la décomposition des plantes. Ainsi, l'idéal est de couvrir les sols de végétaux aux racines profondes. Ce sont en effet les racines qui stockent le plus de carbone, la diversité des types de racines permettant d'explorer différentes profondeurs. L'agroforesterie (qui inclut les haies de bocage) est ainsi à préconiser, dans une perspective intégrée de durabilité écologique, économique et sociale, car elle cumule de nombreux bénéfices notamment sur l'eau, la biodiversité, le carbone. Elle peut de surcroît très bien s'adapter dans le bassin Seine-Normandie car la compétition entre plantes pour la lumière se gère très bien aux latitudes du bassin.

En conclusion, pour préserver/restaurer des sols vivants qui rendent des services écosystémiques au bassin, il importe d'arrêter la dégradation des sols, notamment la destruction de forêts/bosquets et prairies dont les sols sont de bonne qualité, de stopper l'étalement urbain, de végétaliser les villes, de favoriser des sols couverts de végétation en toute saison, de développer l'agroforesterie, de limiter le travail du sol, de favoriser les amendements organiques, de limiter voire de se passer des produits phytosanitaires.

Ainsi, **le conseil scientifique recommande** :

1. de viser le « zéro artificialisation brute »,
2. d'améliorer la mise en œuvre de la compensation écologique,
3. de former les acteurs de l'urbanisme à la connaissance des sols,
4. de réformer la fiscalité sur le foncier non bâti, pour favoriser la conservation des sols agricoles,
5. de revoir les pratiques agricoles et sylvicoles conventionnelles afin d'assurer la pérennité des productions et de reconstituer le stock de carbone dans les sols dans un contexte où l'adaptation au changement climatique devient de plus en plus urgente,
6. de soutenir financièrement les prairies, l'agroforesterie, les haies et l'agriculture biologique, y compris les filières permettant de rentabiliser ces pratiques,
7. d'identifier les sols remarquables pour les sanctuariser tout en développant une agroécologie ambitieuse et variée en milieu rural sur les sols plus banals,

et d'améliorer les connaissances sur :

- a. l'occupation des sols à fine échelle, avec des outils tels que le MOS+ (Mode d'Occupation des Sols précis) développé en Ile-de-France,
- b. les effets des contaminants sur la vie des sols, en particulier les micropolluants organiques et éléments traces métalliques tels que le cadmium et autres métaux, les HAP, les nombreuses molécules associées aux pesticides, les antibiotiques et d'autres médicaments, ainsi que les nanoparticules qui se multiplient, afin d'en extraire des recommandations utiles en termes de gestion,
- c. les plastiques et leurs effets sur les sols,
- d. la salinisation des sols normands liée à la montée du niveau des mers.

Introduction

Cet avis a été préparé grâce à des échanges auprès de neuf chercheurs experts lors des réunions du conseil scientifique, complétés par une analyse bibliographique.

Il se compose en quatre parties : tout d'abord, il explicite en quoi le sol est important pour l'eau, puis il fait le point sur les menaces pesant sur le sol ainsi que sur des solutions pour le préserver, et conclut sur des recommandations.

1/L'importance du compartiment sol

Si le sol nous apparaît comme un support physique, c'est d'abord un milieu vivant, riche en micro et macro-organismes qui le transforment sans cesse et influencent sa capacité à stocker ou à faire circuler l'eau, les nutriments et le carbone, et dont le bon fonctionnement est essentiel à la vie sur Terre. Il contribue notamment à la purification de l'eau, à la régulation des écoulements (crues, étiages) et à la séquestration du carbone (Figure 1).

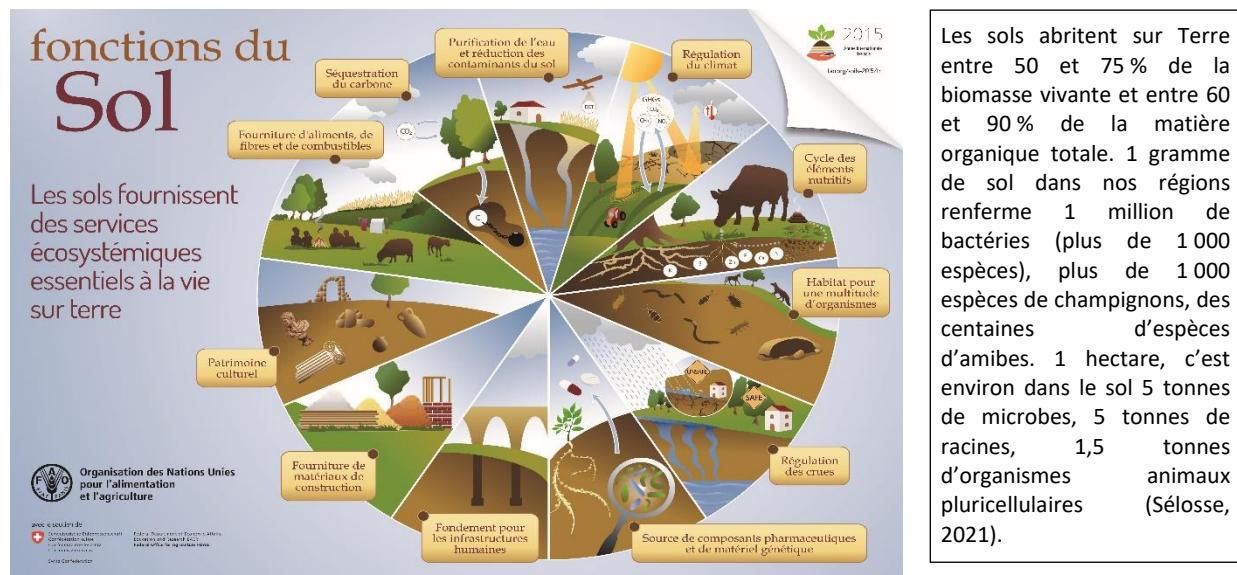


Figure 1 : Fonctions des sols. Source : Organisation des nations unies pour l'alimentation et l'agriculture¹, 2015.

Le sol est la partie altérée de la roche mère, une mince pellicule de l'enveloppe terrestre qui dépasse rarement deux mètres d'épaisseur. Il est composé d'un milieu tri-phasique, avec environ 50 % de phase solide, 25 % d'air et 25 % d'eau². La phase solide est constituée de minéraux, dont la distribution de taille affecte les propriétés hydrodynamiques du sol, mais dont la quantité varie peu dans le temps, et de matière organique, moteur du vivant, dont la quantité peut évoluer. Parmi les composants du sol, on trouve :

- L'eau du sol

L'eau, contenue dans les vides des sols, dépend ainsi de leur porosité, fonction de la taille des grains mais aussi de leur structure. Ses propriétés sont impactées par le vivant des sols qui maintient et connecte ces vides. L'eau est maintenue dans les sols par la pression capillaire, mais aussi par la présence d'éléments hydrophiles, comme la matière organique qui joue également beaucoup sur la structure du sol, et favorise la rétention de l'eau.

Une partie de l'eau du sol, accessible par les plantes, est qualifiée de « réservoir utile ». La présence de cailloux calcaires dans les sols améliore le réservoir utile car l'eau contenue dans ces cailloux peut

¹ <https://www.fao.org/resources/infographics/infographics-details/fr/c/294324/>

² Audition de Christophe Schwartz, 13/10/2020.

être disponible pour les plantes. Pour accroître le réservoir utile, il est préconisé de préférer un enracinement profond des plantes et mieux encore une mixité d'enracinements différents pour accéder à différents horizons du sol (cf exposé I. Cousin).

- La matière organique

La matière organique du sol provient et se nourrit de son activité biologique. En effet, elle provient essentiellement de la biomasse produite dans les racines et au-dessus du sol. Cette biodiversité impacte la fertilité du sol en captant les nutriments et contribue à accroître à la fois son réservoir utile et sa capacité d'infiltration, réduisant ainsi le ruissellement. La matière organique du sol, en alimentant microbes, bactéries et champignons, contribue à la dégradation de certains contaminants et ainsi à l'épuration de l'eau³, améliorant donc sa qualité. De plus, elle constitue un stock de carbone dans le sol. Cependant, dans nos climats, cette matière organique est majoritairement située dans les trente premiers centimètres du sol (cf exposés I. Cousin, Schwartz, Cecillon, Ranjard).

- Les organismes vivants des sols et en particulier les microorganismes

25 % de la biodiversité de la planète est hébergée par les sols, parmi lesquels de nombreux microorganismes (champignons, bactéries) qui dégradent la matière organique et produisent des éléments minéraux assimilables par les plantes. Elle contribue ainsi à la fertilité chimique des sols. Ces éléments minéraux seront mobilisés par les racines des plantes (mycorhizes). La biodiversité facilite l'exploration du sol (prolongement du système racinaire par le mycélium) et la protection des végétaux... Les réseaux d'interactions qui existent entre ces organismes jouent un rôle primordial dans la stabilité de ces fonctions, et notamment dans la protection contre les pathogènes. Plus un réseau est complexe, plus la communauté est stable et fonctionnelle ; les réseaux de microorganismes des sols les plus fonctionnels se trouvent dans les sols forestiers (cf exposé de L. Ranjard).

2/ Les principales menaces qui affectent le sol et leurs impacts

La dégradation des sols, c'est-à-dire leur transformation physique, chimique ou biologique détériorant au moins une de ces fonctions, est continue et concerne aujourd'hui 40 % des terres émergées⁴. Or, la dégradation du sol se produit bien plus rapidement que sa genèse qui peut prendre plusieurs milliers d'années.

2.1 Imperméabilisation et artificialisation

Artificialisation⁵, imperméabilisation⁶, déplacement de terres excavées (dans le cadre des travaux du Grand Paris par exemple) affectent le fonctionnement des sols. Malgré une prise de conscience récente exprimée à l'échelon politique par la notion de « zéro artificialisation nette », l'imperméabilisation et l'artificialisation des sols se poursuivent.

³ La matière organique peut également être source de pollution (lisiers, substances phytosanitaires...).

⁴ Cf Pellerin & al. 2021, rapport United Nation Convention to Combat Desertification <https://www.unccd.int/resources/global-land-outlook/global-land-outlook-2nd-edition>

⁵ Au sens du service statistique du ministère de l'agriculture, il s'agit d'une modification d'usage du sol : passage d'une terre agro-forestière ou en friche à un sol bâti (en majorité des logements), revêtu ou stabilisé (pour l'essentiel des réseaux de transport), enherbé ou nu (jachère, chemin de terre, talus, chantier et carrière, terril, crassier).

⁶ Attention de ne pas confondre artificialisation et imperméabilisation. Une part de l'imperméabilisation (en zone urbaine) se produit sur des sols déjà artificialisés. Par ailleurs deux modifications sont comptabilisées dans l'artificialisation : les zones industrielles et les plateformes de logistique d'une part, les parcs, jardins et terrain de sport d'autre part. Voir <https://www.inrae.fr/actualites/sols-artificialises-processus-dartificialisation-sols>

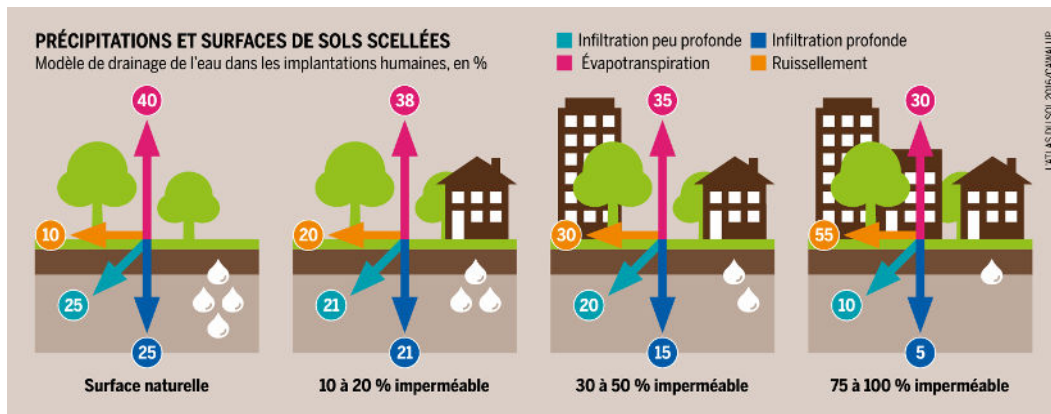


Figure 2 : Impact des surfaces imperméabilisées, issu de « L'atlas du sol », 2016. Les chiffres ne correspondent pas à ceux de la France, où une surface naturelle évapotranspire un peu plus, environ 60% des pluies. Cependant, la partition entre infiltration et ruissellement reste cohérente

L'imperméabilisation et l'artificialisation bouleversent le cycle de l'eau⁷ (Figure 2) en empêchant l'eau de s'infiltrer vers les nappes et en accroissant le ruissellement en surface, induisant potentiellement des inondations, de l'érosion, des coulées de boues et des pollutions. L'imperméabilisation des sols est en grande partie due à la croissance spatiale des agglomérations. Dans l'agglomération parisienne (au sens de la définition INSEE), le taux d'imperméabilisation est passé de 27,4 % en 1982 à 32,7% en 2017 (cf exposé Manuel Pruvost-Bouvattier).

2.2 Dégradation des sols agricoles

Depuis le néolithique, la mise en culture des sols modifie leur fonctionnement naturel. En effet, la mise en culture d'un sol entraîne une perturbation de son équilibre biologique, du fait de l'exportation de la biomasse (qui ne retourne donc pas nourrir le sol) et du travail du sol. Par rapport à des écosystèmes naturels ou semi-naturels comme une forêt ou une prairie permanente, les sols de grandes cultures présentent une quantité globale de biomasse microbienne diminuée et des réseaux de bactéries du sol moins complexes, ce qui peut se traduire par un développement plus important des micro-organismes pathogènes⁸. De plus, quand les sols sont nus, les fortes pluies peuvent favoriser la formation d'une croûte de battance qui facilite le ruissellement et l'érosion. Ainsi, les menaces et pratiques à risques sont :

* **Le labour**, pratique ancienne dont l'objectif est notamment de faciliter le semis suivant en évitant la poussée d'adventices. Le labour fournit aussi au sol un apport de matière organique du fait de l'enfouissement des résidus de récoltes. Cet apport est rapidement consommé du fait d'une bonne aération du sol. Le labour modifie la structure du sol, les mottes créées par le soulèvement étant rendues plus friables par les gelées hivernales. La modification de la structure peut aussi permettre une meilleure évacuation de l'eau des pluies hivernales. Cependant, ces effets bénéfiques sur le court terme s'accompagnent d'effets beaucoup plus négatifs à long terme. En effet, le labour est à l'origine de tassements, les « semelles de labour » nuisibles à la circulation de l'eau et du vivant, racines comprises. Cet effet néfaste était partiellement contrecarré auparavant par la mise en jachère avec des plantes aux racines solides. La disparition des jachères et le poids des tracteurs ont accentué le problème. De plus, en oxygénant la partie remuée du sol, cette pratique conduit à accélérer la décomposition de la matière organique et finalement à appauvrir le sol (Chowaniak et al., 2020). Elle est également moins favorable à la vie du sol : notamment du fait d'une destruction

⁷ Comme confirmé par AESN et DRIEAT, 2016. Mission sur le fonctionnement hydrologique du bassin de la Seine. Rapport au Premier ministre. Accessible [ici](#).

⁸ Voir exposé de Lionel Ranjard, et article Karimi, B., Dequiedt, S., Terrat, S. et al. Biogeography of Soil Bacterial Networks along a Gradient of Cropping Intensity. Sci Rep 9, 3812 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41598-019-40422-y>

de leurs rhizomes, les champs labourés s'appauvrissent en champignons (Selosse, 2021). *In fine*, l'infiltration de l'eau vers les nappes diffère peu en moyenne entre des sols avec et sans labour lorsque les champs restent à nu (Basche and DeLonge, 2019). Le labour favorise l'érosion des sols. À l'inverse, le non labour, c'est-à-dire l'agriculture de conservation, peut poser problème du fait de l'usage d'herbicides⁹. Bien qu'en partie adsorbés par la matière organique alors plus présente dans les premiers centimètres du sol, les pesticides se retrouvent transférés ainsi que leurs métabolites dans les rivières et nappes de façon alors comparable à des sols sous labours (Okada, Costa and Bedmar, 2016).

* **L'érosion** des sols agricoles représente une menace considérable. Dix millions d'hectares de terres arables disparaissent chaque année sur la planète. La sensibilité potentielle à l'érosion découle de la combinaison de plusieurs paramètres : l'occupation du sol, la battance, la pente et l'érodibilité, qui dépend elle-même des caractéristiques physiques, chimiques et biologiques des sols, et notamment de sa teneur en matières organiques. L'augmentation des pluies intenses avec le changement climatique est susceptible d'accroître cet aléa. La Figure 3 représente l'aléa érosion dans le bassin Seine-Normandie d'après une étude de 2005 ; on voit qu'une grande partie des zones présente un aléa d'érosion moyen ou fort.

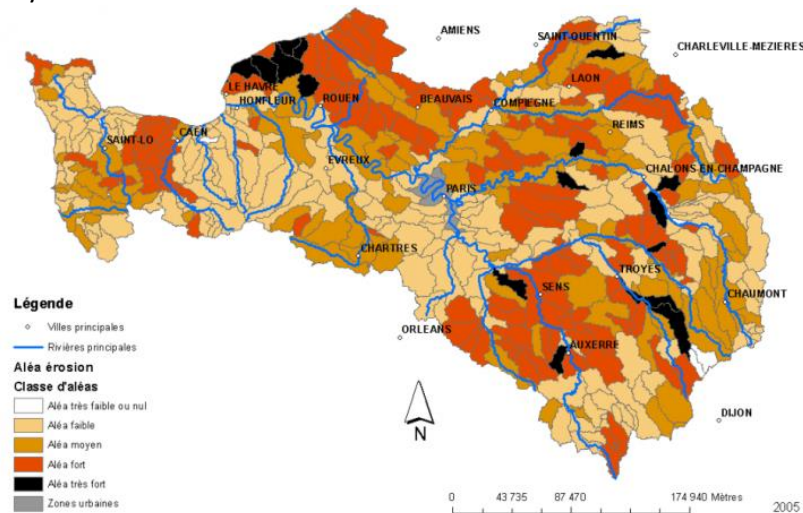


Figure 3: Répartition de l'aléa érosion sur le bassin Seine-Normandie. Source : AESN, 2005.

* **Les pesticides et métaux.** Les pesticides utilisés en agriculture ciblent le vivant (plantes, insectes ou champignons) et conservent leurs propriétés en pénétrant dans les sols. La biodiversité des sols est ainsi fortement impactée par la contamination par des pesticides et leurs métabolites y compris par des pesticides interdits depuis des années comme le lindane ou l'atrazine, encore retrouvés aujourd'hui dans les sols, du fait de leur rémanence (Villanneau et al., 2011; Orton et al., 2013). Une récente méta-analyse montre que les indicateurs biologiques du sol sont dégradés d'environ 70 % en agriculture conventionnelle par rapport à l'agriculture biologique (Christel, Maron and Ranjard, 2021), les pesticides et le travail du sol étant identifiés comme les pratiques les plus nuisibles. Le cuivre, largement utilisé en agriculture comme fongicide, impacte directement la biomasse microbienne des sols qui diminue avec l'augmentation de sa concentration. Il n'a en revanche pas d'effets sur la diversité bactérienne et la diversité des champignons. Il est à noter que les doses susceptibles d'impacter les microorganismes des sols sont très supérieures aux limites fixées par le cahier des charges en agricultures biologique et conventionnelle (4 kg/ha/an). Il importe cependant

⁹ L'observatoire OSOLEMI'EAU soutenu par l'agence de l'eau Seine-Normandie entre 2016 et 2020 a montré que son niveau de recours aux fertilisants et pesticides est similaire à celui de l'agriculture conventionnelle, ce qui ne répond pas aux principaux enjeux de qualité de l'eau sur le bassin.

de veiller à ne pas dépasser des cumuls trop importants (au-delà de 200 kg/ha), ce qui dépend de l'historique du sol.

D'autres métaux sont présents dans les sols agricoles. Ainsi, le cadmium, métal lourd toxique, apporté involontairement avec les engrais phosphatés, s'accumule dans les sols avec un potentiel effet toxique sur la vie du sol et un risque potentiel pour la santé humaine.

*** La diminution du stock de carbone (et de matière organique) dans les sols.** La diminution

La matière organique du sol est en fait un *continuum* de composés organiques, évoluant aux différentes étapes de leur biotransformation, depuis les matières organiques particulières (résidus végétaux) jusqu'aux briques élémentaires du vivant (sucres simples, acides organiques...). Les composés les plus aptes à être protégés des dégradations ultérieures, et qui vont donc se stabiliser dans le sol, sont les molécules les plus simples, qui peuvent former des assemblages avec d'autres composés organiques ou avec des minéraux, principalement les argiles.

de la teneur en matière organique résulte du labour profond et/ou de l'insuffisance de restitution de résidus de biomasse aux sols. Le sol contient une fraction de carbone active, utilisable par les microorganismes, et une fraction stable, intéressante du point de vue de la séquestration durable du carbone dans les sols, qui contribue à la régulation du climat. Le carbone actif, consommé par les microorganismes, est stocké sur de courtes périodes, alors que le carbone stable peut être séquestré plus de 1 000 ans. Le stock de carbone dans le sol atteint un équilibre en fonction des conditions climatiques et de l'usage des sols, actuel et passé.

En France, le stock de carbone organique tend à décroître en

grandes cultures. L'intensité de cette évolution dépend beaucoup de l'histoire de la parcelle : sur d'anciennes prairies permanentes récemment retournées, le stock de carbone est encore assez élevé et le déstockage de carbone, très fort. Sur des terres cultivées depuis longtemps en grandes cultures avec exportation des pailles, les stocks de carbone sont très faibles, et peuvent remonter si les restitutions de biomasse reprennent. En moyenne, on estime que les sols de grandes cultures perdent environ 170 kg C/ha/an¹⁰, ce qui induit des problèmes de stabilité structurale et donc une érosion accrue et un tassement des sols, éventuellement accru par le passage d'engins lourds, ce qui perturbe le cycle de l'eau, et peut favoriser des inondations.

Les sols sous forêts et sous prairies anciennes sont les plus riches en carbone. Mais le stockage annuel dépend fortement de l'histoire de l'occupation du sol. Le sol d'une forêt ou d'une prairie implantée sur d'anciennes terres cultivées, donc éloigné de la situation d'équilibre, stocke beaucoup de carbone. À l'inverse, le sol de forêts anciennes (de plus de 150 ans) ou de prairies anciennes et peu exploitées présente un stock de carbone probablement proche de l'équilibre élevé mais qui ne s'accroît plus. Le changement d'occupation des sols à l'équilibre du point de vue du stockage de carbone est à l'inverse susceptible d'induire des relargages de gaz à effet de serre.

*** Le drainage des sols** et des zones humides ainsi **que le retournement de prairies**, qui se poursuivent sur le bassin Seine-Normandie, sont à ce titre des pratiques défavorables tant du point de vue du stockage de carbone que de la biodiversité et des flux de matière (azote en particulier).

2.3 Dégradation des sols urbains et péri-urbains

La pollution peut concerner ponctuellement des sols, en particulier sur des friches industrielles ou ailleurs, lors d'accidents par exemple. La carte des anciens sites industriels et activités de service (CASIAS) répertorie actuellement 322 981 sites potentiellement pollués à l'échelle nationale¹¹. En Île-de-France (près de 40 000 sites), les sites dont la pollution industrielle est connue sont concernés à 61 % par la présence d'hydrocarbures simples, à 47 % par des métaux lourds ou des éléments traces, à 37 % par des composés organiques halogénés volatils, à 24 % par des hydrocarbures aromatiques polycycliques, à 22 % par des BTEX (benzène, toluène, éthylbenzène et xylène)¹². Il apparaît également que près de 40 % des sols des jardins familiaux de grandes métropoles françaises sont contaminés par différents métaux. Dans 10 % des cas, il s'agit d'une situation d'alerte nécessitant de

¹⁰ Initiative 4p1000, Pellerin & al., 2021.

¹¹ <https://www.georisques.gouv.fr/articles-risques/pollutions-sols-sis-anciens-sites-industriels/basias>

¹² Direction régionale et interdépartementale de l'environnement et de l'énergie d'Île-de-France, *Faciliter la reconversion des friches industrielles (...)*, juin 2014, p. 5-6.

décaper les sols contaminés, de les décontaminer ou d'imposer un changement d'usage¹³. Une bonne connaissance de ces sols et des conditions des migrations des polluants est donc nécessaire pour adapter les usages.

2.4 Salinisation des sols

La salinisation des sols est une contamination particulière qui devrait éveiller la vigilance puisqu'elle est susceptible d'affecter la fertilité des sols et de s'accroître avec le changement climatique. Plusieurs territoires en zone littorale présentent des sols en voie de salinisation par surverse directe de la mer qui s'introduit dans certains marais littoraux à la faveur de marées de vives eaux (et pas simplement en tempête désormais). 788 km² de terres agricoles se situent sous le niveau marin actuel en Normandie. C'est le cas des marais d'Asnelles / Ver / Meuvaines et de quelques marais de la côte nord-est de la Manche. Les surverses qui surviennent en période de vives eaux vont être de plus en plus fréquentes dans le futur.

La salinisation ne s'arrête cependant pas au littoral : elle se produit lorsque l'évaporation dépose les sels minéraux à la surface des sols agricoles et que ceux-ci ne sont pas par la suite lessivés par les pluies. C'est un risque amplifié sur des zones irriguées.

Pour conclure cette partie, la dégradation des sols a des effets néfastes sur l'agriculture et sur la sécurité alimentaire. À titre d'exemple, une perte de 30 % de la diversité microbienne entraîne une baisse de 40 % de la minéralisation, de 50 % du développement végétatif chez la luzerne et le blé et de 50 % de la stabilité du sol, tout en augmentant le temps de survie des pathogènes¹⁴.

3/ Quelles actions pour améliorer la qualité des sols ?

Un sol en bonne santé¹⁵, c'est-à-dire combinant à la fois une biodiversité du sol abondante, une teneur importante en matière organique, une fertilité chimique équilibrée ainsi qu'une structure du sol stable et fonctionnelle, est donc favorable à la ressource en eau, tant d'un point de vue quantitatif (réduction des ruissellements, amélioration de l'infiltration) que qualitatif, mais aussi à la biodiversité et au climat. Les actions à mener pour améliorer la santé des sols visent donc à réduire les éléments conduisant à sa dégradation : artificialisation, pollution et à améliorer la vie du sol.

3.1 Limiter les impacts liés à l'artificialisation et l'imperméabilisation

Pour cela, le CS préconise plusieurs actions :

* **Améliorer la connaissance des sols** à une échelle fine avec des outils comme le MOS+ Mode d'Occupation des Sols Ile de France permettant notamment d'identifier et de sanctuariser les sols remarquables.

* **Éviter et réduire les impacts de nouveaux projets d'aménagement.** Cette question est généralement liée à la lutte contre l'étalement urbain, dont le pendant vertueux serait la densification. Les processus d'urbanisation de ces dernières années montrent d'une part que la densification n'a pas forcément endigué l'étalement, d'autre part qu'elle peut conduire à l'artificialisation de sols encore non bâtis en milieu urbain dense. La réflexion sur les formes urbaines (étalement *versus* densification) devrait donc être menée à une échelle plus fine, celle de la morphologie, et conduite à la préservation des sols non bâtis en milieu urbain comme en milieu péri-urbain et ou rural, où se développent massivement de nouveaux usages des sols, notamment à

¹³ Cf présentation de Christophe Schwartz du 13/10/2020.

¹⁴ Cf audition de L. Ranjard 23/11/ 2021 ; P. -A. Maron *et al.*, 2018 ; M. Prudent *et al.*, 2020.

¹⁵ Terminologie employée par la nouvelle stratégie européenne des sols de novembre 2021 avec la définition suivante : "Les sols sont sains lorsqu'ils sont en bon état chimique, biologique et physique, et donc capables de fournir en permanence le plus grand nombre possible des services écosystémiques suivants ...".

travers les infrastructures de mobilité et les plateformes logistiques. Il s'agirait donc d'aller vers un zéro artificialisation brute, plus volontariste que le zéro artificialisation nette, ou, en d'autres termes, de favoriser l'évitement dans l'application de la séquence éviter-réduire-compenser. Une prise en compte plus systématique des friches est aussi à encourager (celle-ci est en cours dans certains territoires, avec la mise en place de plans friches), avec des solutions adaptées au contexte : en milieu urbain dense, la renaturation peut être privilégiée, de façon à permettre la désimperméabilisation, le développement de la trame verte, et de fournir des aménités rares dans ce contexte ; en milieu périurbain, l'aménagement peut dans certains cas être préféré, s'il permet d'éviter l'artificialisation de sols de bonne qualité et la densification périurbaine (qui est un enjeu plus important que celui de la densification de l'urbain déjà dense). Il convient aussi de suivre la mise en œuvre de la résolution du Parlement européen du 28 avril 2021 sur la protection des sols qui devrait donner lieu à une directive cadre (attendue pour 2023).

*** Améliorer la compensation, lorsque l'évitement est impossible.** Le CS considère que la compensation est actuellement inefficace sur le plan écologique. La restauration à l'identique s'avère difficile et incertaine, même lorsque le sol est transféré d'un endroit à un autre¹⁶. Par ailleurs, des études sur la compensation des pertes de biodiversité révèlent des insuffisances dans la mise en œuvre¹⁷ : une minorité de projets d'aménagement fait véritablement l'objet d'une autorisation administrative induisant cette obligation¹⁸ et dans ce cas, une minorité d'espèces inventoriées sur les sites d'emprise des projets font réellement l'objet d'une évaluation des impacts. La mise en œuvre de la compensation présente plusieurs faiblesses. L'obligation de compenser une surface supérieure à celle impactée pourrait pallier la faiblesse du gain par une grande surface.

Compensation : bien souvent, les projets d'aménagements obtiennent leur autorisation sans que les sites de compensation aient été identifiés et sécurisés. Dans la plupart des cas de compensation, celle-ci a eu lieu non pas sur des sites dégradés mais sur des sites déjà naturels à faible potentiel de gains écologiques, donc contrevenant au principe d'équivalence entre les pertes et les gains. Enfin une part des mesures ne sont pas réalisées et d'autres sont effectives mais inefficaces. Du fait des faibles contraintes de la compensation, l'instrument peine à acquérir un pouvoir incitatif en faveur d'aménagements plus vertueux et à produire les effets positifs attendus pour la biodiversité.

Les causes de ces échecs sont identifiées, et ainsi pour améliorer la compensation, il faudrait planifier les restaurations, en :

- Mobilisant de grandes surfaces dégradées à restaurer ;
- Sécurisant le foncier, et en mobilisant l'instrument des obligations réelles environnementales ;
- Harmonisant le suivi et les mesures de l'équivalence ;
- Mobilisant des moyens financiers et humains pour les missions régionales d'autorité environnementale.

*** Modifier la fiscalité du foncier sur le non bâti** car elle n'encourage pas le maintien des espaces naturels et agricoles¹⁹ : même si cette action ne dépend pas uniquement du Comité de Bassin, ses membres peuvent faire pression pour cette modification car :

- la fiscalité des espaces naturels et des prairies n'est pas incitative pour les maintenir en état ;
- les baux ruraux sont très fortement taxés (plus que les autres activités commerciales), ce qui ne favorise pas le maintien des terres agricoles ;
- certaines modalités précises sont insuffisantes et pourraient évoluer, comme le contenu des états des lieux lors d'un bail, aujourd'hui quasiment facultatif, alors que cela pourrait qualifier la qualité du sol et le stockage de carbone.

¹⁶ Audition de Lucas Brunet du 16/03/2021.

¹⁷ Audition de Fanny Guillet du 15/10/2019.

¹⁸ Ce n'est pas le cas pour les habitations et la plupart des zones d'activité

¹⁹ Sainteny G. [Fiscalité et biodiversité](#). Note de la FRB, 2019.

* **Intégrer la maîtrise de l'artificialisation et de l'imperméabilisation dans les PLU**, ce qui est possible à différents niveaux (article V de la loi ELAN) : dès le rapport de présentation, dans le plan d'aménagement et de développement durable (PADD), dans des orientations d'aménagement programmé (OAP), dans le règlement, dans le zonage du PLU... Aujourd'hui, les agences de l'eau sont les principaux financeurs de projets de désimperméabilisation (qui permettent notamment d'améliorer la gestion des eaux pluviales, en particulier de réduire le volume à gérer), mais d'autres projets sont également lancés ou en gestation (sous l'égide de CAUE, de PNR, de régions). Tous les financeurs devraient se mobiliser et se coordonner sur ces enjeux.

* **Prioriser les actions** : une meilleure intégration de l'eau dans les aménagements est nécessaire. Les zonages pluviaux²⁰ pourraient à ce titre faire le lien entre urbanisme et gestion de l'eau, en allant plus loin qu'une simple limitation du ruissellement, et tenir compte des usages de l'eau : infiltration vers les nappes, ou soutien d'une végétalisation des villes. Des liens devraient être développés avec les planifications liées aux SCoT et aux SAGE. L'articulation entre les institutions et documents d'urbanisme d'une part, les institutions et les documents de planification de l'eau d'autre part, devrait être renforcée. L'enjeu devrait être avant tout de protéger les espaces en fixant concrètement, à l'échelle des territoires, des objectifs d'artificialisation/aménagements assortis de limites, et en réalisant des choix réfléchis sur les zones à protéger, au-delà de ce qui existe déjà.

* **Améliorer la formation** : il y a un enjeu à former les urbanistes, les aménageurs, les professionnels et les bureaux d'études pour faire reconnaître que les sols ne sont pas de simples supports physiques mais des milieux vivants dont le bon fonctionnement rend de nombreux services.

3.2 Favoriser les pratiques agricoles préservant les sols et le climat

* **Favoriser la couverture végétale du sol** : La présence d'une couverture végétale tout au long de l'année, et de préférence une végétation pérenne, est très favorable au sol. La Figure 5 montre que l'infiltration est plus forte dans des sols couverts par des plantes à racines de tailles diverses et notamment par des arbres, que dans des sols en monoculture annuelle.

Il est également intéressant de mettre en place des rotations culturales longues, avec plus de 2 cultures en alternance²¹. De plus, entre ces cultures, la présence d'un couvert intermédiaire est favorable au sol, et même à la disponibilité de la ressource en eau si ce couvert croît avec les pluies d'automne puis est coupé et maintenu comme couverture passive afin de ne pas gêner la recharge de la nappe, jusqu'à la mise en place de la culture de rente (cf présentation Isabelle Cousin).

²⁰ Le zonage pluvial est un outil qui permet aux collectivités de formaliser leurs politiques de gestion des eaux pluviales et du ruissellement, et peut être intégré dans les documents d'urbanisme. Il vise à mieux respecter le cycle de l'eau dans les projets d'aménagement et à améliorer la gestion des eaux pluviales.

²¹ [Présentation d'Isabelle Cousin et méta analyse sur les bénéfices de la diversification https://doi.org/10.1111/gcb.15747](https://doi.org/10.1111/gcb.15747).

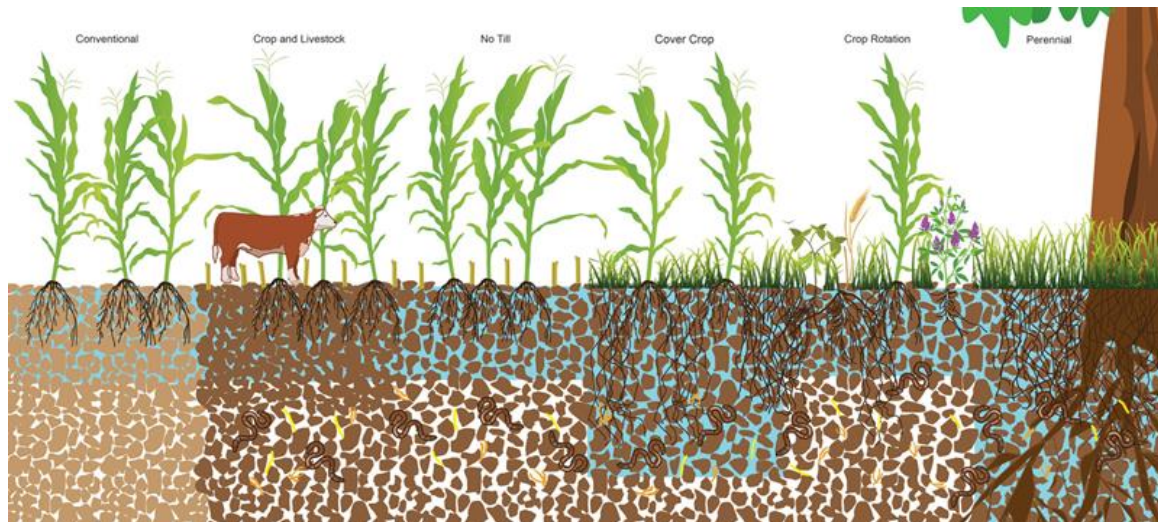


Figure 4: Impacts des pratiques agricoles sur les flux d'eau du sol. Source : Basche & Delonge, 2019.

De gauche à droite agriculture conventionnelle, présence de bétail, de résidus de culture, de racines végétales continues et de diversité des cultures. Les taux d'infiltration sont modifiés par des processus physiques représentés par des différences de porosité, de compactage et d'agrégation (cf taille et distribution des agrégats du sol), chimiques via l'ajout de carbone représenté dans la coloration du sol, ou biologiques représentés par l'ajout de bactéries et de champignons (représentés par des symboles jaunes et orange). La profondeur du mouvement de l'eau est représentée en bleu et indique une augmentation significative sous couverture végétales vivaces.

* **Favoriser la fertilisation organique** : l'apport de fertilisation organique est bénéfique pour permettre à l'eau de pénétrer dans le sol, d'y être stockée, puis restituée aux cultures. L'effet de l'épandage des boues²² d'épuration dépend de leur composition (teneurs en matière sèche, en matière organique ou carbone organique), de la fréquence des apports mais aussi des cultures sur lesquelles elles sont apportées, selon le Pôle Sciences du sol de l'INRAe.

* **Favoriser un stockage additionnel de carbone** : il est plus efficace d'augmenter les entrées de carbone (apport de compost, fumier, restitution de résidus de récolte, agroforesterie, enherbement, cultures intermédiaires, ajustement du chargement en pâture) et de réduire l'érosion, que de vouloir réduire la minéralisation du carbone organique par une baisse du travail du sol. Par ailleurs, la minéralisation du carbone organique est un processus qui permet de nourrir les plantes en produisant des substances fertilisantes qu'elles peuvent assimiler²³. Pour stocker du carbone de manière efficace il faut privilégier les cultures de racines profondes, pérennes, et diversifiées pour explorer différents horizons. Cela joue également dans le sens de l'adaptation. Au vue de son efficacité, on préconise l'extension de prairies qui permettent de stocker du carbone à bas prix, avec cependant un potentiel de stockage relativement bas.

Une politique de séquestration du carbone dans les sols est nécessaire mais très insuffisante pour neutraliser les émissions de gaz à effet de serre d'origine agricole²⁴.

* **Éviter le travail des sols et l'usage de pesticides**, puisque ces pratiques ont des effets néfastes sur les sols.

²² Échanges afin de préciser la question avec Sabine Houot, directrice de recherche : Produits résiduaux organiques, compostage, matières organiques, Inrae.

²³ Intervention de Claire Chenu https://www.youtube.com/watch?v=nHGQge9_7GM

²⁴ Bamière, L., Jayet, P.-A., Kahindo S. et Martin E. Carbon sequestration in French agricultural soils : A spatial economic evaluation. Agricultural Economics 2021 ;52 :301-316.

4/ Recommandations

En conclusion, le CS recommande de privilégier les prairies, l'agriculture biologique et l'agroforesterie.

Le CS a particulièrement investigué l'intérêt de l'agroforesterie²⁵ qui présente de nombreux co-bénéfices (Figure 5) mais reste encore mal implantée.

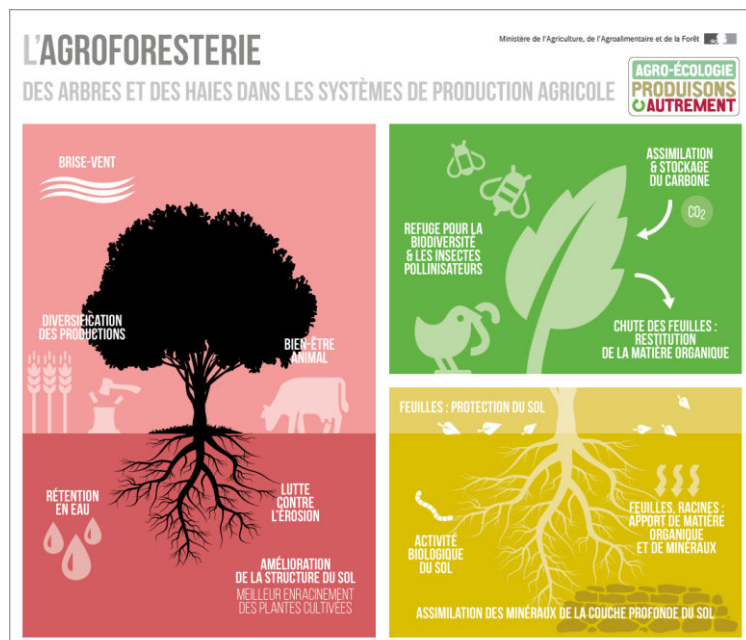


Figure 5 : Infographie sur l'agroforesterie du ministère de l'agriculture.

L'agroforesterie comprend une variété de pratiques associant des arbres et des cultures et/ou des prairies et animaux. Depuis peu, le 6^{ème} rapport du GIEC considère l'agroforesterie comme particulièrement prometteuse pour l'alimentation, pour l'eau, notamment en favorisant son infiltration dans les sols et en réduisant ruissellement et érosion, pour l'atténuation du changement climatique, du fait d'un fort potentiel de séquestration du carbone, et pour l'adaptation à celui-ci.

Les pratiques agroforestières permettent de réduire environ de moitié le ruissellement, l'érosion hydrique les transferts d'herbicides et les pertes en nutriments²⁶. Par exemple, sur une parcelle sylvoarable de 14 ans en France associant noyers hybrides et blé dur fertilisé, les prélèvements à 2 mètres de profondeur ont montré que l'agroforesterie est plus proche d'un système forestier que des parcelles sans arbre, avec des teneurs en nitrate beaucoup plus faibles²⁷.

Il peut y avoir compétition pour l'eau mais cela varie selon les sols, la densité, les essences et la gestion des arbres. L'arbre peut jouer un rôle d'ascenseur hydraulique et remonter de l'eau des horizons profonds humides vers les horizons de surface plus secs, s'il y a un bon accès à l'eau en profondeur.

L'ascenseur hydraulique est un mouvement de l'eau à travers les racines des arbres. Une partie de l'eau est relâchée la nuit via l'exsudation des racines. Ainsi l'eau voyage d'horizons profonds et humides vers ceux plus secs en surface. Les quantités d'eau remontées de façon passive peuvent être très élevées (14 à 33 % de l'évapotranspiration journalière, voire jusqu'à 50 ou 100 %) et jouent un rôle très important dans les écosystèmes arides. Ce phénomène peut intéresser les climats tempérés en cas de sécheresse, et peut être considéré comme un système de « bioirrigation ».

²⁵ Cf la présentation de R.Cardinael du 6 juillet 2021 pour la plupart des références.

²⁶ Zhu & al., 2020 utilisant 83 études dans 33 pays.

²⁷ Andrianarisoa & al., 2016.

L'agroforesterie permet d'augmenter la porosité des sols et la quantité d'eau à la capacité au champ, par rapport à des parcelles sans arbre²⁸. Cela s'explique par des changements de structures et de faune du sol. La présence permanente d'arbres permet également d'augmenter l'activité biologique des sols, et d'absorber les nitrates en excès.

L'agroforesterie est la deuxième pratique en termes de potentiel de stockage additionnel, après l'extension des cultures intermédiaires (l'agroforesterie intraparcellaire dans les grandes cultures permettrait de stocker plus d'1 MtC/an à l'échelle de la France entière contre 2 MtC/an pour l'extension des cultures intermédiaires. À l'hectare, elle est même plus efficace en moyenne que l'extension de cultures intermédiaires). Elle est cependant l'une des plus coûteuses à mettre en place (118 €/ha/an en moyenne au niveau national²⁹).

L'agroforesterie est faisable et semble rentable y compris dans les régions tempérées comme le bassin de la Seine, où elle était historiquement très présente, mais a régressé avec l'extension de l'agriculture conventionnelle. Son développement implique un accompagnement financier (notamment en termes d'investissement) et technique. Certains agriculteurs sont visiblement intéressés, notamment par son impact sur la fertilité et la vie du sol, l'ombrage et le fourrage pour le bétail.

De plus, **le CS recommande d'approfondir les connaissances** sur :

- Les sols : la France a fortement investi dans l'observation de la qualité des sols, notamment avec le réseau de mesures de la qualité des sols (RMQS) qui a déjà permis d'obtenir des cartes de biomasse moléculaire microbienne et de diversité bactérienne, mais qui pourrait encore s'enrichir, notamment en explorant les horizons plus profonds. Il conviendrait de développer une cartographie de l'occupation des sols à fine échelle sur l'ensemble du bassin, avec des outils tels que le MOS+ (Mode d'Occupation des Sols précis) développé en Ile de France ;
- Les effets toxiques sur la vie du sol de certaines substances : cadmium, éléments/adjuvants liés à l'apport des produits phytosanitaires, des HAP (ubiquistes en France), des résidus médicamenteux dans les lisiers et les boues de STEP (y compris les antibiotiques et éventuels problèmes d'antibiorésistance) ;
- La présence dans et sur les sols des déchets plastiques émanant de diverses activités, y compris agricoles (leurs effets sur les organismes aquatiques étant avérés, ils ont probablement des effets sur la vie du sol ; les additifs dans les plastiques peuvent être plus toxiques que le plastique lui-même).

Enfin, **le CS recommande de former et sensibiliser sur le sol, en :**

- Renforçant les actions de sensibilisation dans les lycées agricoles et en formation continue ;
- Rencontrant les écoles de formation des acteurs de l'urbanisme (aménageurs, bureaux d'études, services de l'urbanisme...) sur les sols ;
- Sensibilisant les habitants du bassin sur les plastiques dans l'environnement ;
- Sensibilisant les agriculteurs aux pratiques agricoles les plus bénéfiques à la fois du point de vue de la vie des sols et de la protection de l'eau, tel que le semis sous couvert sans herbicide ou l'agroforesterie.

²⁸ Basche & Delonge 2017 utilisant 93 observations appariées.

²⁹ Pellerin, Baumièr et al., 2021.

Sources

Experts auditionnés par le CS en lien avec cet avis (lien vers les vidéos des auditions, l'exposé, et/ou les bèves) :

- Fanny Guillet (socio-politologue, Centre d'écologie des sciences et de la conservation), le 15/10/2019 : [brève](#), [exposé](#)
- Vincent Bretagnolle (directeur de recherches au Centre d'études biologiques de Chizé (CNRS), La Rochelle université), le 14/01/2020 : [brève](#), [exposé](#)
- Christophe Schwartz (professeur à l'Université de Lorraine UMR 1120 Université de Lorraine-INRA (LSE) en sciences du sol), le 13/10/2020 : [brève](#), [exposé](#)
- Lauric Cécillon (Inrae, Laboratoire de Géologie (ENS, Paris), ECODIV (Univ. Normandie, Rouen), le 13/10/2020 : [brève](#), [exposé](#)
- Thomas Cormier (chargé d'études à la Mission Planification, Institut Paris Région) et Manuel Pruvost-Bouvattier (urbaniste et ingénieur, Institut Paris Région), le 16/03/2021 : [audition](#), [exposé](#)
- Lucas Brunet (sociologue, Université de Munich), le 16/03/2021 : [brève](#), [exposé](#)
- Rémi Cardinael (agroforesterie, Cirad), le 06/07/2021 : [audition](#), [exposé](#)
- Lionel Ranjard (directeur de recherche Inrae en écologie microbienne du sol), le 23/11/2021 : [audition](#), [exposé](#)
- Isabelle Cousin (directrice de recherche Inrae sur les sols), le 23/11/2021 : [audition](#), [exposé](#)

Experts consultés de manière complémentaire :

- Harold Levrel (économiste de l'environnement, professeur à l'Institut des sciences et industries du vivant et de l'environnement/AgroParisTech et chercheur en économie écologique au Centre international de recherche sur l'environnement et le développement (Cired)) ;
- Claire Chenu (directrice de recherche Inrae en science du sol, biogéochimie, matières organiques) ;
- Isabelle Feix (experte national sol à l'Ademe) ;
- Sabine Houot (directrice de recherche à l'Inrae sur les produits résiduels organiques, compostage, matières organiques) ;
- Frédéric Gresselin (Service du Management des Connaissances et de l'Appui au Projet. Changement climatique et côte ouest de la Manche).

Références :

- Andrianarisoa, K.S., Dufour, L., Bienaimé, S., Zeller, B., Dupraz, C. *The introduction of hybrid walnut trees (Juglans nigra × regia cv. NG23) into cropland reduces soil mineral N content in autumn in southern France*. *Agroforestry Systems*, 2016, 90, 193–205, <https://doi.org/10.1007/s10457-015-9845-3>
- Bamière, L., Jayet, P.-A., Kahindo, S., Martin, E. *Carbon sequestration in French agricultural soils: A spatial economic evaluation*. *Agricultural Economics*, 2021, 52, 301-316. <https://doi.org/10.1111/agec.12619>
- Basche, A.D., DeLonge, M.S. *The Impact of Continuous Living Cover on Soil Hydrologic Properties : A Meta-Analysis*. *Soil Science Society of America Journal*, 2017, 81, 1179–1190. <https://doi.org/10.2136/sssaj2017.03.0077>
- Basche, A.D., DeLonge, M.S. *Comparing infiltration rates in soils managed with conventional and alternative farming methods: A meta-analysis*. *PLOS ONE*, 2019, 14(9): e0215702. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0215702>
- Christel, A., Maron, P.A. & Ranjard, L. *Impact of farming systems on soil ecological quality: a meta-analysis*. *Environmental Chemistry Letters*, 2021, 19, 4603–4625. <https://doi.org/10.1007/s10311-021-01302-y>
- Chowaniak, M., Glab, T., Klima, K., Niemiec, M., Zaleski, T., Zuzek, D. *Effect of tillage and crop management on runoff, soil erosion and organic carbon loss*. *Soil Use and Management*, 2020, 36(4), 581–593. doi: [10.1111/sum.12606](https://doi.org/10.1111/sum.12606)
- Karimi, B., Masson, V., Guillaud, C. *et al. Ecotoxicity of copper input and accumulation for soil biodiversity in vineyards*. *Environmental Chemistry Letters*, 2021, 19, 2013–2030. <https://doi.org/10.1007/s10311-020-01155-x>

- Maron, P.-A., Sarr, A., Kaisermann, A., Lévêque, J., Mathieu, O., Guigue, J., Karimi, B., Bernard, L., Dequiedt, S., Terrat, S., Chabbi, A., Ranjard, L. *High microbial diversity promotes soil ecosystem functioning*. Applied and Environmental Microbiology, 2018, 84, e02738-17, <https://doi.org/10.1128/AEM.02738-17>
- Okada, E., Costa, J. L., Bedmar, F. Adsorption and mobility of glyphosate in different soils under no-till and conventional tillage, Geoderma, 2016, 263, 78–85. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.09.009>
- Orton, T.G., Saby, N.P.A., Arrouays, D., Jolivet, C.C., Villanneau, E.J., Marchant, B.P., Caria, G., Barriuso, E., Bispo, A., & Briand, O. *Spatial distribution of Lindane concentration in topsoil across France*, Science of The Total Environment, 2013 ; 443: 338-350. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.10.103>
- Pellerin, S., Bamière, L., et al. *Stocker du carbone dans les sols français – Quel potentiel et à quel coût ?* Edition Quae, 2021. Résumé : <https://www.territoires-climat.ademe.fr/download/24/ressource-document>
- Prudent, M., Dequiedt, S., Sorin, C., et al. *The diversity of soil microbial communities matters when legumes face drought*. Plant, Cell & Environment, 2020, 43, 1023–1035. <https://doi.org/10.1111/pce.13712>
- Sainteny, G. *Fiscalité et biodiversité*. Note de la FRB, 2019, [accès web](#)
- Selosse, M.A. 2021. L'origine du Monde. Actes sud. Available at: <https://www.actes-sud.fr/catalogue/sciences-humaines-et-sociales-sciences/lorigine-du-monde>.
- Villanneau, E.J. et al. *Which persistent organic pollutants can we map in soil using a large spacing systematic soil monitoring design? A case study in Northern France*, Science of the Total Environment, 2011, 409(19), 3719–3731. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2011.05.048>
- Zhu, X., Liu, W., Chen, J., Bruijnzeel, L.A., Mao, Z. et al. *Reductions in water, soil and nutrient losses and pesticide pollution in agroforestry practices: a review of evidence and processes*. Plant and Soil, 2020, 453, 45–86. <https://doi.org/10.1007/s11104-019-04377-3>

Autres références :

- Abbadie, L. *Fertilité des sols : la qualité par la vie*. Annales des Mines - Responsabilité et environnement, 2018, 91, 10-12, [accès web](#).
- Antoni, V., et al., *L'état des sols en France*, 2011, Gis Sol, [accès web](#).
- Bossio, D.A., Cook-Patton, S.C., Ellis, P.W., Fargione, J., Sanderman, J., Smith, P. et al. *The role of soil carbon in natural climate solutions*. Nature Sustainability, 2020, 3, 391–398. <https://doi.org/10.1038/s41893-020-0491-z>
- Costanza, R., et al. *The value of the world's ecosystem services and natural capital*. Nature, 1997, 387(6630), 253-260. <https://doi.org/10.1038/387253a0>
- Derrien, D., Dignac M-F., Basile-Doelsh, I., Barot, S., Cécillon, L., Chenu, C., Chevallier, T., Freschet, G.T., Garnier, P., Guenet, B., Hedde, M., Klumpp, K., Lashermes, G., Maron, P.-A., Nunan, N., Roumet, C., Barré, P. *Stocker du C dans les sols : Quels mécanismes, quelles pratiques agricoles, quels indicateurs ?* Etudes et Gestion des Sols, 2016, 23, 193-223, [accès web](#)
- Lemmel, F., Maunoury-Danger, F., Fanesi, A. et al. *Soil Properties and Multi-Pollution Affect Taxonomic and Functional Bacterial Diversity in a Range of French Soils Displaying an Anthropisation Gradient*. Microbial Ecology, 2019, 77, 993–1013. <https://doi.org/10.1007/s00248-018-1297-7>
- Pavlidis, G., Karasali, H., Vassilios, A. *Pesticide and Fertilizer Pollution Reduction in Two Alley Cropping Agroforestry Cultivating Systems*. Water, Air, & Soil Pollution, 2020, 231, 1–23. <https://doi.org/10.1007/s11270-020-04590-2>
- Shi, L., Feng, W., Xu, J., Kuzyakov, Y. *Agroforestry systems: Meta-analysis of soil carbon stocks, sequestration processes, and future potentials*. Land Degradation & Development, 2018, 29, 3886–3897. <https://doi.org/10.1002/ldr.3136>

Webinaires consultés:

- Intervention de Claire Chenu sur le Stockage de la matière organique dans les sols agricoles, dans le cadre de Ver de terre production : <https://www.youtube.com/watch?v=QHHoMogyGfg>