Séance du 3 octobre 2023

ACADÉMIE DES TECHNOLOGIES
POUR UN PROGRÈS RAISONNÉ, CHOISI ET PARTAGÉ

Conférence-débat de Claire Chenu avec Bernard Chevassus-au-Louis

LES MULTIPLES ENJEUX DE LA PROTECTION ET DE LA GESTION DURABLE DES SOLS

Le sol est loin d'être la simple surface sur laquelle on marche. Contrairement à la perception qu'on en a longtemps eue, c'est un milieu vivant habité par une très grande diversité d'organismes, qui abrite le quart de la biodiversité du globe terrestre, et assure la quasi-totalité de notre alimentation. En fait, nous dépendons du sol, beaucoup plus qu'on l'imagine. Mais il s'agit d'une ressource limitée : un cinquième des sols de la planète seulement sont cultivables sans contrainte majeure, selon une répartition qui est loin d'être homogène. Si en Europe, nous avons été bien dotés par la nature, nombre de zones géographiques souffrent de sols en pente, de sols exposés à un climat trop froid, ou trop sec, qui ne sont pas cultivables sans une utilisation importante d'intrants ou la fabrication de terrasses. Mais surtout, les sols sont aujourd'hui une ressource extrêmement menacée, dégradée, notamment par l'érosion, l'artificialisation à outrance, la contamination…

Heureusement, une prise de conscience planétaire est en cours. Aujourd'hui une stratégie européenne vise à ce que tous les sols européens soient en bonne santé en 2050. Ce qui sera difficile à réaliser, mais une gestion durable des sols est possible. Cela passe par une compréhension et une surveillance de leur santé, autrement dit leur capacité à fournir les services écosystémiques qu'on attend d'eux, et qui sont propres à chacun. Ce qui ouvre un vaste questionnement pluridisciplinaire et de nouveaux défis scientifiques et technologiques. Comment caractériser les sols, les surveiller, les protéger, les restaurer ? La réflexion et les actions sont en cours pour mieux gérer ce capital vital qui, au même titre que l'eau, mériterait d'être classé « patrimoine commun » de l'humanité.

Claire Chenu. Diplômée de l'École normale supérieure de Fontenay, Claire Chenu est agrégée de sciences naturelles. Elle est directeur de recherches à l'INRAE et professeur consultant à AgroParisTech. Elle a présidé le comité scientifique du programme GESSOL pendant six ans, été vice-présidente du conseil scientifique du ministère de l'écologie, et en 2015, a été nommée ambassadrice de l'Année Internationale des Sols auprès de la FAO. Elle est membre du comité scientifique et technique international de l'initiative 4 pour 1 000, et de l'« International Technical Panel on Soils », comité scientifique du Global Soil Partnership auprès de la FAO. Elle préside le comité scientifique et technique du réseau national d'expertise sur les sols, RNEST Sols, et coordonne pour l'INRAE, depuis 2020, l'European Joint Program SOIL : « Towards climate-smart sustainable management of agricultural soils ». En 2019, elle a reçu le prix de science du sol de la European Geosciences Union et les Lauriers de l'INRAE, grand prix de la recherche agronomique. Elle est membre de l'Académie des technologies.

Bernard Chevassus-au-Louis. Normalien, agrégé de sciences naturelles et docteur en sciences de l'université Paris XI, Bernard Chevassus-au-Louis est inspecteur général honoraire de l'agriculture. Il a été directeur général de l'INRA, président du Museum national d'histoire naturelle. Il est membre du Conseil général de l'alimentation, de l'agriculture et des espaces ruraux (CGAAER), et notamment animateur de deux programmes de l'Agence nationale de la recherche (« Impacts des OGM » et « Agriculture et développement durable »). Il préside l'Association « Humanité et Biodiversité » et est membre de l'Académie des technologies.

Exposé de Claire Chenu **2**
Débats **5**

Introduction par Bernard Chevassus-au-Louis

Le sociologue Bruno Latour aimait dire que le Précambrien avait 150 ans. Il entendait par là qu'en tant qu'objet scientifique, cette période très ancienne n'avait été identifiée et considérée comme devant faire l'objet d'une étude particulière, qu'il y a à peu près cent-cinquante ans. En suivant la même logique, on peut dire que la « pédologie » aussi a à peu près 150 ans, puisqu'elle n'apparaît qu'à la fin du XIX^{e} siècle sous la plume de l'allemand Friedrich Albert Falloux, qui crée ce terme pour désigner l'étude des sols.

Dans ses débuts, cette science privilégiait un angle essentiellement physico chimique : on étudiait la structure des sols, leurs propriétés de porosité, la cristallographie des argiles…, mais la partie vivante du sol, sa matière organique et les êtres vivants qui l'habitent n'étaient pas vraiment pris en compte. Un bel exemple de surinterprétation de l'histoire des sciences. En effet, très longtemps les pratiques empiriques ont considéré que tous les êtres vivants, pour se nourrir, devaient manger de la matière organique, ce qui est vrai pour les animaux. Mais l'on a cru longtemps que c'était vrai aussi pour les plantes, et que leurs racines devaient trouver dans le sol la matière organique dont elles avaient besoin. Une théorie – « théorie de l'humus » – qui a été déconstruite au cours du XIX^{e} siècle par une cohorte de chimistes prestigieux, à commencer par Lavoisier, qui ont montré que les plantes, en fait, se nourrissent du carbone qu'elles puisent dans l'atmosphère et non pas du carbone du sol. Et peu à peu – c'est pourquoi je parle de surinterprétation – on a estimé qu'on n'avait pas besoin des sols, à part comme support physique, pour que les plantes poussent. Il pouvait suffire, pensait-on, de faire tremper leurs racines dans de l'eau avec des sels minéraux… Sans se rendre compte qu'en fait, dans les sols, ces éléments nutritifs n'étaient pas aussi disponibles que lorsqu'on les met en solution dans l'eau. Mais comme à la même époque, la nutrition minérale des plantes était devenue très facile avec la révolution industrielle qui avait donné accès aux phosphates du Maroc, à la potasse d'Alsace, à la fabrication des engrais azotés de synthèse…, on avait l'impression qu'une conception purement minérale de l'agronomie et de la nutrition des plantes allait suffire. Les seigneurs de la guerre, à l'époque, étaient ceux qui maîtrisaient la cristallographie des argiles, beaucoup plus que la structure de la matière organique, considérée alors, même à l'INRAE, avec une certaine condescendance.

La « pédologie » a fait depuis de grandes avancées. Nous allons voir les grandes lignes de ce que savent aujourd'hui les sciences du sol sur leurs propriétés, leurs fonctions, leurs vulnérabilités. Puis les enjeux que cela soulève d'un point de vue scientifique et technologique pour l'avenir.

Exposé de Claire Chenu

On croit souvent, parce qu'on a l'habitude de marcher dessus, qu'un sol est une surface. Or, c'est bien plus que cela. Un sol est une formation superficielle, certes, mais qui a une épaisseur. Nous, parlons de « profils » des sols pour décrire l'assemblage de particules différentes qui les constitue : du minéral, de l'organique, des pores de différentes tailles. Une organisation complexe, en fait, composée de constituants et d'habitants extrêmement petits, et divers. Contrairement à la perception qu'on en a longtemps eue, le sol est vraiment un milieu vivant, habité par une très grande diversité d'organismes, qui assure un grand nombre de fonctions.

Les sols : une source de services multiples

Des fonctions écosystémiques

Pour commencer, c'est dans le sol que s'ancrent les racines des plantes et qu'elles puisent l'eau et les éléments nutritifs minéraux qui leur sont nécessaires. La production de biomasse est l'une des fonctions des sols, peut-être la plus importante.

C'est sur les sols aussi qu'arrivent les précipitations, et là que se fait le partage entre ce qui va ruisseler et ce qui va s'infiltrer, donc la recharge des nappes. L'eau qui traverse les sols change de composition, elle se charge en éléments ou au contraire en dépose. Elle interagit avec le sol qui joue donc un rôle important dans la régulation et l'épuration de l'eau.

Or, il n'y a pas que les pluies qui arrivent sur les sols, mais de manière générale tous les déchets de nos activités. Une propriété du sol, qui tient à tous les organismes qui y vivent, est de contribuer à l'élimination de ces déchets et au recyclage des éléments nutritifs qu'ils contiennent. Cette transformation par des organismes vivants fait qu'il y a dans le sol de la matière organique composée pour moitié de carbone. Les sols sont donc non seulement un habitat pour la biodiversité mais également un important stock de carbone.

Le recyclage des nutriments contribue, en outre, à la régulation de la protection contre l'érosion : tout ce qui est fourni par le sol n'a pas besoin d'être fourni par des intrants minéraux.

Les propriétés des sols permettent donc de faire des économies en termes d'apport de nutriments comme on pourrait en faire aussi en termes d'épuration de l'eau. Quant au stockage de carbone, il permet de contribuer à l'atténuation du changement climatique, ce qui est un service écosystémique.

Des fonctions pratiques
Le sol est le support de nos infrastructures, de nos habitations, des ouvrages, mais aussi une source de matériaux de construction. Il a également des fonctions culturelles, notamment patrimoniales. Il participe en effet à la définition du terroir et fait partie intégrante de ce que qu'on appelle un paysage. Enfin, il intéresse beaucoup nos collègues archéologues parce que sont préservées dans les sols des traces des activités de nos ancêtres.

Un rôle dans le cycle du carbone global
Quand on considère les principaux stocks et flux de carbone de notre planète, on constate que les sols contiennent trois fois plus de carbone (2 400 milliards de tonnes) que l'atmosphère. On s'aperçoit également qu'il existe des émissions de carbone liées à l'utilisation de carbone fossile, à la déforestation, au feu… Même si les écosystèmes terrestres et marins réabsorbent une partie de ce carbone, il existe un flux net de carbone vers l'atmosphère qui représentait 4,7 milliards de tonnes pour l'estimation 2018 (les chiffres n'ont guère augmenté).

La comparaison de ces ordres de grandeur a permis de se rendre compte que la partie superficielle des sols – qui est celle que l'homme influence le plus – , contient près de 1 000 milliards de tonnes de carbone. Si l'on perdait 4 pour 1 000 de ces stocks annuellement, en aggravant un certain nombre de pratiques et d'usages actuels, on doublerait le flux net de carbone de notre planète vers son atmosphère. Autrement dit, on doublerait l'effet de serre. Mais inversement, si l'on pouvait stocker 4 pour 1 000 par an en plus des stocks actuels, on pourrait réussir à annuler le flux net de carbone vers l'atmosphère.

C'est à partir de ce constat, qu'est née « l'initiative 4 pour 1 000 : les sols pour la sécurité alimentaire et le climat », portée par la France auprès de la FAO (l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture) en 2015. Son objectif : promouvoir la protection et l'augmentation des stocks de carbone des sols du monde. L'idée n'est pas qu'il faut stocker « plus 4 pour 1 000 », ce qui n'est pas possible, mais de donner l'ordre de grandeur. Une toute petite variation de ces stocks, dans un sens ou dans un autre, aurait des conséquences majeures. Donc il faut préserver, améliorer.

Un habitat pour la biodiversité
25 % des espèces de notre planète vivent dans les sols au moins une partie de leur vie. Les sols représentent un réservoir génétique fantastique. Les premiers antibiotiques ont été isolés des micro-organismes du sol et l'on continue à isoler des molécules utilisées dans l'industrie agro-alimentaire comme le glutamate ou le xanthane.

La protection des sols se retrouve donc à la croisée d'enjeux majeurs à l'échelle globale, mais aussi à l'échelle locale : sécurité alimentaire, durabilité énergétique, santé, préservation de la biodiversité, changement climatique, sécurité des ressources en eau.

Le campus AgroParisTech où je travaille, sur le plateau de Saclay, illustre bien ces enjeux. Que faire de ces surfaces qui correspondent à des sols extrêmement fertiles ? Les artificialiser pour permettre le développement d'établissements d'enseignement supérieur, d'instituts, d'entreprises, ou les préserver en termes de sécurité alimentaire ? Tout Plan d'Occupation des Sols pose la question de l'arbitrage entre ces différents enjeux où les sols se retrouvent toujours, plus ou moins explicitement, concernés.

Une ressource limitée, menacée, dégradée

Une ressource limitée et très diverse
On estime que seulement un cinquième des sols de la planète sont cultivables sans contrainte majeure. Une répartition qui n'est pas du tout homogène. En Europe, nous avons été bien dotés par la nature, mais ne sont pas cultivables facilement, par exemple, des sols en pente ou des sols exposés à un climat trop froid, ou trop sec, qui demandent des intrants importants ou la fabrication de terrasses… Cette ressource, de surcroît, est très diverse. Rien qu'en France métropolitaine, les profils de sol ne sont pas homogènes, ce qui signifie des aptitudes, des potentialités différentes.

Une ressource très menacée
À l'échelle mondiale et européenne, les sols sont en premier lieu menacés par l'érosion.

Ensuite, par l'artificialisation (quand on passe d'espaces naturels cultivés et forestiers à des espaces aménagés en zones industrielles, zones commerciales bâties, voire imperméabilisées). Le flux d'artificialisation en France est d'à peu près 300 000 hectares par an. Essentiellement aux dépends des terres agricoles, comme sur le plateau de Saclay.

Autre menace, la contamination : des pollutions diffuses liées aux activités agricoles ou aux activités industrielles.

Et enfin, perte de matière organique, perte de biodiversité, tassement, salinisation, désertification.

D'après les estimations récentes de la Commission européenne – qui travaille à développer des tableaux d'indicateurs – , plus de 61 % des sols européens seraient aujourd'hui dégradés, et ne seraient plus capables de fournir les services écosystémiques que l'on attend d'eux. Le coût direct estimé de cette dégradation serait de plus de 50 milliards par an.

Gestion durable et santé des sols

Dans ce contexte, « protection des sols » signifie les maintenir dans un état satisfaisant, en tout cas dans leur état initial avant le développement de l'érosion, l'artificialisation,… Pour définir la « gestion durable » et la « santé » des sols – un terme que l'on entend de plus en plus – , je parlerai de « qualité » des sols, leur capacité à réaliser des fonctions, à fournir des services écosystémiques évoqués précédemment, qui varient en fonction de leur nature, du climat, de l'usage qu'on en fait… Un sol limoneux profond, par exemple, qui va avoir une très grande réserve en eau et une bonne fertilité chimique, est tout à fait apte à la céréaliculture. Un sol caillouteux peu épais, en revanche, ne serait pas du tout adapté à cela mais certaines cultures s'en accommodent extrêmement bien, comme celle de la vigne.

Tous les sols n'ont pas les mêmes potentiels, on le voit, et leurs capacités actuelles peuvent avoir été affectées du fait d'une dégradation due au changement climatique, ou au changement d'usages. La « gestion durable des sols », telle que l'a définie la FAO, permet de maintenir des sols à leur potentiel de fourniture de services écosystémiques.

Une attention croissante portée aux sols

Très longtemps, comme on l'a vu en introduction, les composantes organiques et biologiques des sols ont été méprisées parce qu'on avait réussi, pendant les Trente Glorieuses, à avoir une agriculture et une foresterie totalement efficaces, à la fois en utilisant le capital sol et en apportant des intrants. Mais aujourd'hui, les sols sont gravement dégradés en France, en Europe, dans le monde. Et on assiste heureusement depuis quelques années à une attention croissante portée au sujet. Notamment avec l'Année Internationale des Sols où des scientifiques du monde entier et des gestionnaires des sols se sont investis pour sensibiliser au problème. Un contexte tout à fait nouveau pour nous. Aujourd'hui la politique des sols est en passe d'aller presque plus vite que la science qui doit fournir des données, des résultats, des concepts très rapidement. Parce qu'il existe une stratégie européenne qui vise à ce que tous les sols européens soient en bonne santé en 2050 - ce qui est excessivement ambitieux -, et depuis le 5 juillet, une proposition de directive cadre pour la surveillance des sols. Mais pour avoir des sols en bonne santé, il faut déjà être capable de les qualifier, et de les surveiller.

Les enjeux technologiques

Pour surveiller les sols, il est primordial de les caractériser. Or, qui dit caractérisation dit besoins de développement, en sciences et techniques : besoin de senseurs, de capteurs *in situ*… On assiste aujourd'hui à un gros développement des spectroscopies infrarouges, des données satellitales, et à des développements technologiques importants liés à l'analyse du vivant, en extrayant et en analysant l'ADN des sols.

Mais on a besoin aussi, pour comprendre les sols et prévoir leur évolution, de modélisation, comme pour tout système complexe.

Enfin, pour les restaurer, il existe aujourd'hui tout un ensemble de secteurs d'activité qui relèvent de technologies de la dépollution, de technologies de la décompaction…, de ce qu'on pourrait appeler un génie écologique. Enfin un autre secteur en plein développement : celui de la création de sols.

La mise en œuvre de techniques de caractérisation et de compréhension des sols doit permettre, au bout du compte, une gestion différenciée des sols, une agriculture et une foresterie de précision.

Deux exemples

Le *carbon farming* : cela consiste à gérer les stocks et les flux de carbone, d'azote et de gaz à effet de serre à l'échelle de la ferme, pour contribuer à l'atténuation du changement climatique ou éviter une aggravation. Mais c'est également rétribuer les agriculteurs pour la quantité de carbone qu'ils stockent en plus dans les sols. Il faut donc pouvoir mesurer, vérifier. Ce qui est beaucoup plus compliqué qu'on l'imagine. Il existe actuellement tout un pan dans la R&D qui réfléchit aux moyens de mettre en place des systèmes de mesure et de vérification permettant aux entreprises privées ou entités publiques de contractualiser avec des agriculteurs, ou encore des travaux de recherche sur l'amélioration, le développement d'algorithmes d'échantillonnage et l'amélioration des techniques d'échantillonnage… Il est nécessaire de combiner différentes technologies et d'allier développements scientifiques et méthodologiques.

La création de « techno sols » : c'est-à-dire des sols fabriqués à partir de différents matériaux, qui ne sont pas de « vrais » sols mais qui fournissent des services écosystémiques. En mimant les sols naturels, on crée une couche appelée « squelette » dans laquelle l'eau circule bien et où les racines peuvent se développer, à base de briques et tuiles concassées, ou bien de bois broyé. Ensuite, pour fournir des éléments minéraux nutritifs, il faut une couche fertile, par exemple à base de déchets disponibles localement (déchets d'espaces verts, du bâtiment, déchets ménagers…). Et en une dizaine d'années, on peut quantifier une production tout à fait satisfaisante d'un certain nombre de végétaux et d'aliments de qualité. On peut également observer une régulation intéressante des flux d'eau, et un stockage de carbone au moins cinq fois plus élevé que dans les sols les plus riches, soit les sols de prairies permanentes. Ainsi qu'une certaine biodiversité qui se réinstalle petit à petit.
Toute une ingénierie prometteuse, donc, est en train de se développer. Il ne s'agit pas de voir là de simples mesures de compensation. C'est un véritable « plus » sur des surfaces artificialisées.

Débats

Bernard Chevassus-au-Louis : Est-ce qu'aujourd'hui la formation des sols est encore un processus actif ou n'existe-t-il que des sols fossiles ?

Claire Chenu : Oui, il y a toujours formation des sols. Parce que les sols se forment sous l'action du climat, de l'activité biologique principalement. Par exemple, les sols limoneux des grands plateaux et plaines françaises qui ont fait une partie de notre richesse agricole, notamment en Ile-de-France, se sont développés sur des lœss du quaternaire, mais ils continuent à s'approfondir petit à petit. Mais ce qu'il faut savoir, c'est qu'il faut à peu près un millénaire pour fabriquer dix centimètres de sol qui peuvent disparaître en quelques jours à cause d'un phénomène d'érosion.

Bernard Chevassus-au-Louis : On a défini depuis plus de trente ans les eaux douces comme « patrimoine commun de la nation », et donc mis en place des politiques extrêmement ambitieuses avec les agences de l'eau dont l'objectif était de reconquérir le bon état écologique et chimique des masses d'eau. Mais les sols ne sont pas encore reconnus « patrimoine commun de la nation ». Transposer aux sols ce qu'on a fait avec un certain succès sur la politique de l'eau ne risque-t-il pas de buter un peu sur ce manque de reconnaissance ?

Claire Chenu : Effectivement c'est un élément qui coince. Le sol n'est pas un patrimoine commun et il n'y a pas de protection des sols comme il y a une protection de l'eau et de l'air. La difficulté sous-jacente, en fait, c'est la propriété privée. Le sol est propriété soit de l'État, soit d'individus, soit d'entreprises. C'est ce qui freine très fortement. Maintenant des juristes de l'environnement se sont penchés sur la question et ont des propositions qui pour le moment apparemment, n'ont pas réussi à infléchir le processus. Mais on pourrait suivre l'exemple des monuments historiques : si vous êtes propriétaire d'un château, vous restez propriétaire mais vous avez des contraintes sur la manière de le gérer. C'est peut-être dans ce sens-là qu'il faudrait aller pour les sols.

Dans l'auditoire : Le sujet de la désimperméabilisation revient beaucoup dans les conférences, avec des discours sur la ville « perméable », la ville « éponge », qui sont des idées plus ou moins réalistes quand on en parle à Paris. À Paris, quand on fait une zone végétalisée, il y a une chape en béton à cause du métro, et on crée juste 60 cm de terre pour des plans qui ont du mal à survivre. Est-ce qu'il n'y aurait pas intérêt à hiérarchiser les sols prioritaires à désimperméabiliser ?

Claire Chenu : Oui, assurément. Cela veut dire, dans une opération d'aménagement, se poser la question de ce qu'on attend de cette désimperméabilisation. Ne serait-ce que pour l'infiltration de l'eau, toutes les surfaces ne sont pas équivalentes. L'épaisseur à excaver non plus n'est pas la même partout. Tout ce qu'il y a « en dessous » n'est pas équivalent. Donc il est évident qu'il faut hiérarchiser. Mais la question est : quelles sont les fonctions qu'on attend ensuite de la surface poreuse qu'on va créer ? Selon moi, c'est vraiment le miroir d'une réflexion qu'il faut avoir de plus en plus et un certain nombre de collectivités territoriales y sont tout à fait sensibles. Mais cela commence à peine. Et il faut reconnaître que les praticiens dans ces domaines manquent d'outils de qualification des sols.

Dans l'auditoire : Y a-t-il des indicateurs absolus de la santé des sols ? Est-ce la biodiversité ? Le carbone stocké ? Est-ce que c'est mesurable ?

Claire Chenu : Il y a beaucoup de recherches dans ce domaine, et oui, nous avons un certain nombre d'indicateurs. Par exemple sur l'activité biologique, la respiration du sol, sur la biodiversité, l'analyse de l'ADN avec une quantification de la richesse des communautés du sol. Sur l'érosion, des modèles permettent de prévoir, en fonction des caractéristiques du sol, combien de tonnes de sol sont susceptibles de disparaître. Sur l'infiltration de l'eau dans le sol, on a des mesures à très bas coût, qui sont réalisables très simplement.
Aujourd'hui, ce qui est limitant, c'est finalement de devoir choisir, dans tout ce panel, ce qui est le plus robuste et qui coûte le moins cher, pour pouvoir le déployer à grande échelle. Et ce qui est encore le plus critique, c'est de définir des valeurs seuils : quand est-ce qu'on dit que « ça va » ? Et à partir de quel moment « ça ne va pas » ? Parce que les sols sont tous différents, les usages aussi… Donc il faudrait des valeurs de référence en fonction du contexte et cela devient compliqué.

Mots clés : artificialisation, carbon farming, contamination des sols, érosion, gestion durable des sols, pédologie, santé des sols, techno-sols, 4 pour 1000

Citation : Claire Chenu & Bernard Chevassus-au-Louis. (2023). *Les multiples enjeux de la protection et de la gestion durable des sols.* Les soirées de l'Académie des technologies. @

Retrouvez les autres parutions des séances thématiques de l'Académie des technologies sur notre site

Académie des technologies. Le Ponant, 19 rue Leblanc, 75015 Paris. 01 53 85 44 44. academie-technologies.fr
Production du comité des travaux. Directeur de la publication : Denis Ranque. Rédacteur en chef de la série : Hélène Louvel. Auteurs : Claire Chenu & Bernard Chevassus-au-Louis. n° ISSN : XXXX.

Les propos retranscrits ici ne constituent pas une position de l'Académie des technologies et ils ne relèvent pas, à sa connaissance, de liens d'intérêts. Chaque intervenant a validé la transcription de sa contribution, les autres participants (questions posées) ne sont pas cités nominativement pour favoriser la liberté des échanges.