Sols & biodiversité

Rencontres de Natureparif

19 et 20 juin 2012 – Paris

île de France

natureparif Agence régionale pour la nature et la biodiversité en Ile-de-France

Les Rencontres de Natureparif ont pour objet d'identifier, valoriser et diffuser les bonnes pratiques en matière de préservation de la nature et de la biodiversité, par la présentation d'expériences ou d'actions exemplaires ou instructives, dans un temps d'échange à destination des acteurs franciliens.

Pour connaître le programme des Rencontres organisées par Natureparif :
consultez **www.natureparif.fr/fr/manifestations/rencontres**
ou inscrivez-vous à notre newsletter **www.natureparif.fr/fr/publications/newsletters**

Retranscription : Laurent Bonnafous | 06 98 51 83 00
Réalisation : Gilles Lecuir
Crédits photos : Natureparif, les intervenants et leur structure (sauf mention)
Directrice de la publication : Stéphanie Lux, Directrice de Natureparif
Paris, janvier 2013.

Photo de couverture : © Sébastien Barot
Réalisation : PPC

Sommaire

Ouverture

© Ophélie Alloiteau

Agence régionale pour la nature et la biodiversité en Île-de-France, Natureparif développe son action à travers trois pôles : l'Observatoire de la biodiversité en Île-de-France, le Forum des Acteurs et le pôle Communication et Pédagogie. Son mode de gouvernance associant toutes les parties prenantes de l'Île-de-France ainsi que l'État permet de réunir et d'accompagner chacun dans ses actions de préservation et de défense de la biodiversité. La question des sols est à cet égard particulièrement cruciale en Île-de-France, où 21 % des surfaces sont artificialisées et où la pression de l'urbanisation continue de s'exercer au détriment des sols agricoles et de fonctions écologiques fondamentales notamment pour la biodiversité et la ressource en eau. Il faut donc mobiliser les acteurs du territoire à partir du savoir scientifique constitué et des bonnes pratiques disponibles.

Liliane PAYS Présidente de Natureparif

Natureparif, agence régionale pour la nature et la biodiversité en Île-de-France, a été créée en 2008 à l'initiative de la Région Île-de-France, elle est en Europe la première structure entièrement dédiée à la biodiversité et à son observation au niveau régional.

Son action s'articule autour de trois pôles :

- l'Observatoire, dont la principale mission consiste à évaluer la santé de la biodiversité en Île-de-France en partenariat étroit avec les associations naturalistes, les scientifiques et les chercheurs ;
- le Forum des Acteurs : il permet d'échanger sur les actions locales et de les accompagner, de mieux identifier les besoins prioritaires, de valoriser les expériences dont l'efficacité a été prouvée et d'élaborer des guides de bonnes pratiques ;
- le pôle Communication et Pédagogie, tourné vers le grand public afin de le sensibiliser aux enjeux de la protection de la biodiversité.

Natureparif possède un mode de gouvernance original. Association de loi 1901, elle est organisée de façon collégiale, son Conseil d'administration comptant sept collèges : Région, État, collectivités, associations, établissements d'enseignement supérieur et de recherche, chambres consulaires et fédérations professionnelles, entreprises. Ces partenaires débattent, échangent et, surtout, agissent pour la biodiversité.

Notre agence a pour mission d'être aux côtés de ses adhérents dans un esprit de co-construction, pour les accompagner dans la conception et la réalisation de leurs projets, en intégrant dès l'origine les enjeux de biodiversité. Cet aspect essentiel de l'action de Natureparif est en lien étroit avec cette rencontre consacrée à la vie des sols organisée le 19 et 20 juin 2012. Nos rencontres visent en effet à identifier, à valoriser et à diffuser les bonnes pratiques, à partir de la présentation et de l'échange autour d'expériences ou d'actions exemplaires à l'attention des acteurs franciliens.

En consacrant cette édition au thème « Sols & biodiversité », nous avons voulu mettre l'accent sur des milieux assurant des fonctions indispensables à la vie. Cette question cruciale se pose avec une acuité plus forte chaque jour, alors que, tous les sept ans la surface d'un département disparaît en France sous l'effet du bétonnage, plus de 70 000 hectares étant chaque année victimes de l'urbanisation. Selon le ministère de l'Écologie, 99 % de l'artificialisation concerne des terres auparavant agricoles. De 1982 à 2003, près de 4 000 hectares d'espaces agricoles ont disparu pour construire des routes, surfaces commerciales, des logements et des équipements divers en Île-de-France, où, selon l'Institut d'aménagement et d'urbanisme d'Île-de-France (IAU), plus de 21 % des sols sont déjà artificialisés.

Ces données montrent quelle est l'urgence de la mobilisation, alors que l'imperméabilisation des sols exerce, avec d'autres facteurs, une pression toujours plus forte sur la biodiversité régionale. L'urbanisation du territoire est en cause : nos villes se renouvellent et s'agrandissent, mais – revers de la médaille – s'étendent jusque dans les zones agricoles et naturelles. Même si elles évoluent, les pratiques agricoles intensives perturbent aussi durablement la vie des sols tout en polluant à long terme la ressource en eau.

Face à la montée des pressions sur les sols, les alertes se multiplient donc. C'est pourquoi cette rencontre a été construite avec des gestionnaires, experts et scientifiques, afin d'échanger sur l'état des lieux et sur les expériences et éclairer, autant que possible, les pratiques et décisions des intervenants publics et privés, et pour ouvrir des espaces de collaboration entre ces différents acteurs.

Vous trouverez dans cet ouvrage la transcription des exposés des intervenants ainsi que quelques-uns des échanges qui ont eu lieu entre les participants.
La première partie est dédiée à la connaissance. Comment fonctionnent les sols ? Quelles espèces abritent-ils ? Quelles sont les caractéristiques physiques, biologiques et chimiques des sols d'Île-de-France ? Après un aperçu des enjeux européens, est abordée la diversité des sols urbains et périurbains constamment remaniés, imperméabilisés, tassés, dégradés, pollués par les effets de l'urbanisation. Mais aussi les sols agricoles, dont la préservation de la richesse doit devenir un enjeu majeur afin de protéger leur fertilité, la qualité des productions et de l'environnement.
La question de la conciliation entre les pratiques sylvicoles et la préservation des propriétés et de la biodiversité des sols forestiers est ensuite abordée. Enfin, les indicateurs de suivi nécessaires pour bien gérer et fournir aux politiques les informations adaptées à la prise de décision sont passés en revue.

En savoir plus : www.natureparif.fr

Connaître pour informer et gérer durablement

La diversité des sols français et franciliens et leurs caractéristiques

Les sols constituent une interface essentielle entre les milieux et sont de nature très diverse en fonction du substrat géologique et des usages. Ils stockent le carbone dans la matière organique et fournissent le substrat à la production de la biomasse. Les sols sont vivants et accueillent une biodiversité extrême, notamment pour les micro-organismes. Les menaces qui pèsent sur eux sont multiples. L'urbanisation concerne principalement les sols agricoles les plus fertiles, notamment en Île-de-France. L'agriculture intensive peut affecter le stockage du carbone et accélérer l'érosion au-delà du seuil de renouvellement naturel. Globalement, la contamination chimique reste modérée en France à l'exception de certaines zones agricoles intensives et de sites anciennement industriels. Les sols urbains restent très mal connus et doivent faire l'objet de recherches afin de mieux cerner leurs fonctions écologiques et de les préserver. La préservation de la matière organique est essentielle pour lutter contre les menaces multiples qui pèsent sur les sols. Les programmes de cartographie demeurent indispensables et sont menés à des échelles variées en France. Le rapport *L'état des sols en France* et sa synthèse proposent une compilation accessible du savoir constitué.

Dominique ARROUAYS INRA Infosol Orléans

Voir sa présentation*

Les sols constituent une interface avec la biosphère, l'atmosphère, la lithosphère et l'hydrosphère, avec lesquels les échanges de flux sont permanents : toute étude systémique doit donc les prendre en compte. Contrairement à l'air ou à l'eau, les sols ne sont pas renouvelables à l'échelle de temps humaine. Or, ils rendent des services multiples : production de biomasse et d'aliments, stockage d'un certain nombre d'éléments, recyclage des déchets, filtration des eaux et transformation des matières.

Les sols forment un habitat et une réserve de ressources génétiques de première importance, et sont primordiaux en tant que patrimoine culturel et en tant que support du bâti. Ces fonctions multiples peuvent être antagoniques. La DG Environnement de la Commission européenne a montré qu'ils étaient soumis à des pressions multiples : augmentation de l'érosion, baisse de la teneur en matières organiques, contaminations, baisse de la biodiversité, tassements, artificialisation, inondations, glissements de terrain et salinisation – même si ce dernier point concerne avant tout les pays d'Europe du sud.

Les sols constituent un énorme puits de CO_2. Ils sont de natures très diverses, y compris en Île-de-France et ce, de l'échelle de la parcelle à celle du continent. C'est pourquoi il faut mettre en place des programmes de cartographie à échelles multiples, qui sont notamment coordonnés par le Groupement d'intérêt scientifique du sol (GIS Sol).

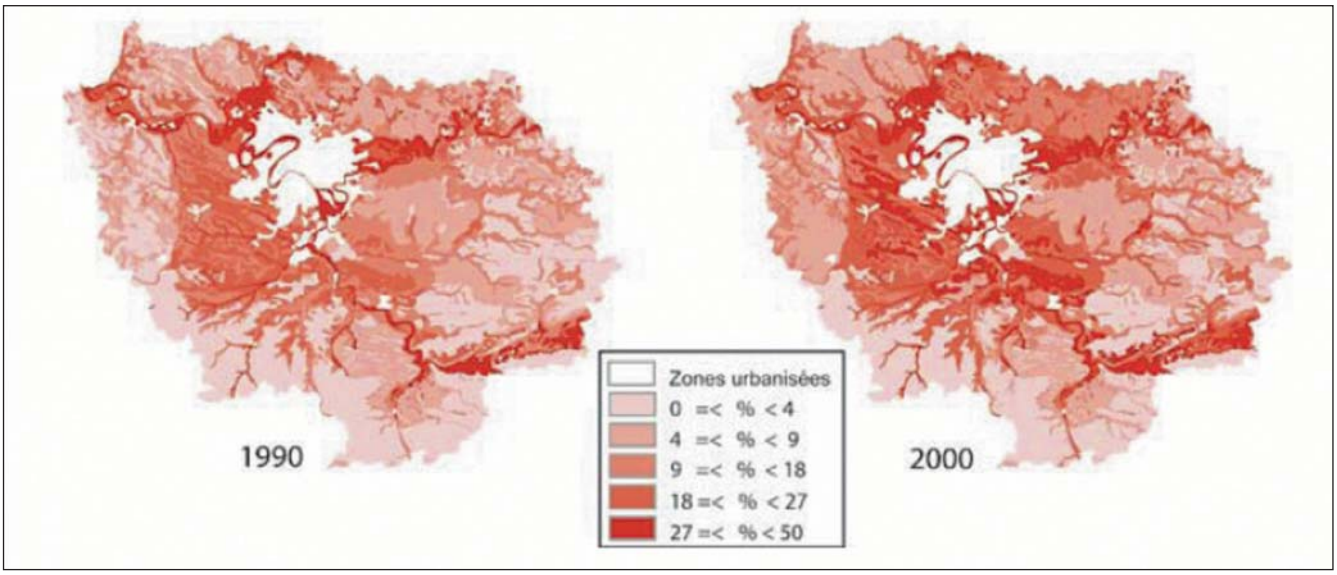
À grande échelle, les types de sols en France dépendent du substrat géologique. Le nord du pays, et le bassin parisien en particulier, est dominé par les sols limoneux. Ils sont très présents sur les plateaux de la Brie, la Beauce étant marquée par les systèmes calcaires. En forêt de Fontainebleau, les profils pédologiques sont très variés. La carte des grands paysages pédologiques de France, établie au 1/250 000e, représente en revanche les zones urbanisées par des zones grises qui n'ont pas été visitées par les pédologues. C'est un des défauts actuels de la science du sol française.

Les sols franciliens sont profondément affectés par une artificialisation accélérée à l'échelle du pays et qui se développe à 90 % aux dépens des terres agricoles. En Île-de-France, ce sont les terres les plus productives qui sont urbanisées. Il faudrait donc prendre en compte les services écosystémiques rendus par les sols lors de la définition des zonages, et maintenir certains d'entre eux en cas d'urbanisation, en maintenant des surfaces où les sols puissent épurer et absorber les eaux tout en stockant du carbone. Il faudrait aussi développer une science des sols artificialisés.

Le stock de carbone contenu dans les 30 premiers centimètres des sols de la France métropolitaine est évalué à 3,2 milliards de tonnes ; cette couche ne représente que 30 % à 40 % du stock total et, s'il était évalué à 50 euros/tonne, celui-ci représenterait le montant du budget annuel de l'État. En Île-de-France, les teneurs moyennes en matières organiques sont plutôt faibles, du fait de la prédominance de l'agriculture intensive. Le stock de carbone présent dans les sols d'Île-de-France représente 30 fois les émissions annuelles de GES de la région.

* *http://www.natureparif.fr/attachments/forumdesacteurs/Rencontres/Sols/1_DARROUAYS_19062012.pdf*

La majorité des cartes et des schémas sont de très faible qualité peu lisibles pour la version Internet, pouvez-vous nous les fournir en HauteDef, merci



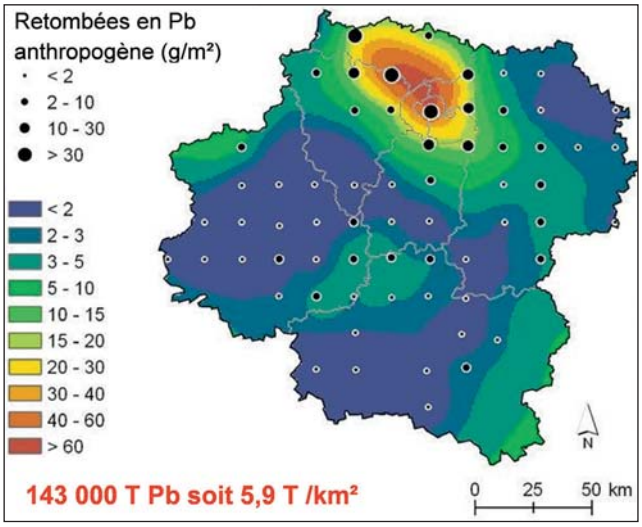
Artificialisation des surfaces de l'Île-de-France entre 1990 et 2000.

La quantité de carbone stocké tendrait aujourd'hui à augmenter légèrement après avoir atteint un point bas, du fait de l'augmentation des rendements et de l'adoption croissante de techniques agricoles de gestion simplifiées du sol. Pour autant, cette teneur diminue dans une région telle que la Franche-Comté depuis 1990, probablement du fait des retournements de prairies et du changement climatique. Il est possible de réduire le mode de travail du sol en faisant appel aux techniques culturales simplifiées, qui permettent de stocker environ 100 à 200 kg de carbone par hectare et par an. La généralisation des cultures intermédiaires, en assurant une couverture permanente du sol, permet de lutter contre l'érosion et de piéger les nitrates. Ces techniques sont recommandées, mais pas toujours adoptées. Il est aussi possible de jouer sur les rotations, ce qui signifie un changement de système de production. Par ailleurs, le retournement d'une prairie permanente signifie une perte d'une tonne de carbone par hectare et par an pendant 20 ans environ.

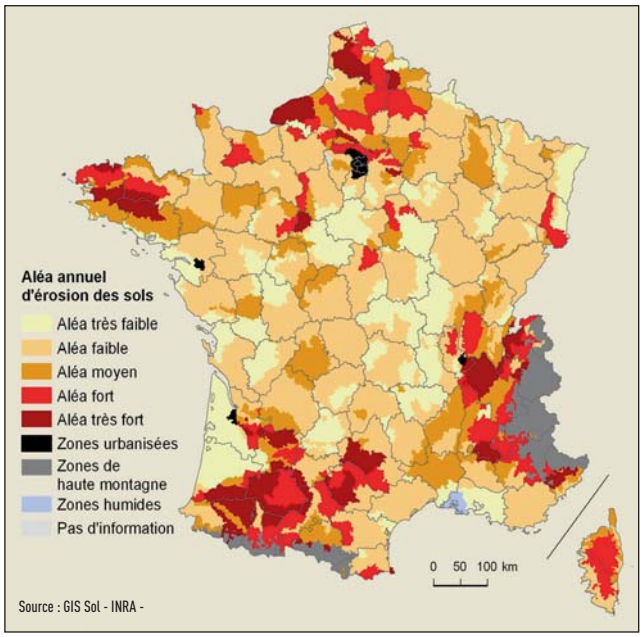
La matière organique structure les sols, les protège de l'érosion et de la battance, constitue un réservoir d'éléments minéraux, augmente la rétention d'eau, diminue la compacité et augmente la biodiversité. Sa préservation ne présente, pour ainsi dire, que des avantages.

La concentration en phosphore est très élevée en Bretagne (en raison de l'élevage intensif) et dans certaines zones du nord et de l'est de la France (en raison d'anciens épandages miniers). Elle se situe dans la moyenne nationale en Île-de-France. La présence du plomb est forte dans le sud du massif central et dans les Pyrénées pour des raisons géologiques, mais est liée à des contaminations d'origine humaine dans les bassins industriels. En Île-de-France, Loiret, Eure-et-Loir, on peut estimer les retombées de plomb à un total de 140 000 tonnes. On constate quelques points de concentrations de plomb, de cadmium et de zinc, probablement en raison d'épandages anciens de gadoues en Île-de-France. La présence de cuivre apparaît très liée à l'épandage de la bouillie bordelaise, mais aussi aux contaminations d'origine industrielle. L'influence des épandages de lisiers est aussi perceptible. Globalement, les teneurs françaises en métaux sont modérées et la situation est moins préoccupante en France que dans d'autres pays d'Europe tels que le Royaume-Uni, l'Allemagne, les Pays-Bas ou certains pays d'Europe de l'est.

L'érosion est un enjeu majeur à très long terme, car au-delà d'une tonne de sol par hectare et par an, la formation naturelle des sols ne peut compenser les pertes. Environ 20 % des sols français dépassent cette valeur. Le phénomène est très marqué principalement dans le sud-ouest du pays, dans les grandes plaines limoneuses du bassin parisien, notamment dans le Vexin Français et le pays de France, mais aussi en Bretagne et en bordure des Alpes. Il menace de faire disparaître les sols et cette menace augmente avec celle de la probabilité des événements extrêmes, un unique orage pouvant emporter plus de sol que la nature ne peut en



Retombées de plomb d'origine humaine en Île-de-France, Loiret et Eure-et-Loir, selon *Saby et al., Science of Total Environment, 2006*.



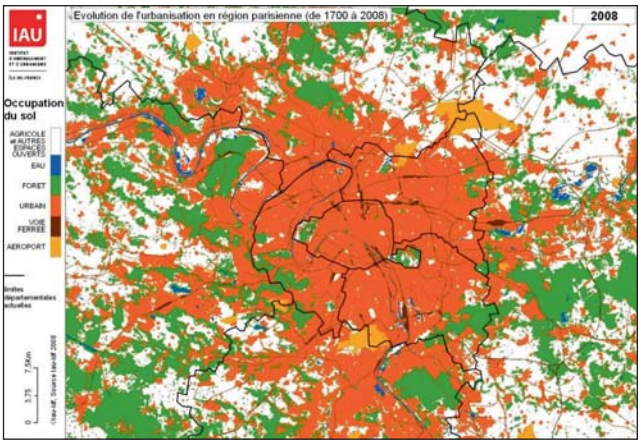
Carte des aléas d'érosion en France. Les pratiques de l'agriculture intensive augmentent notamment les risques d'érosion des terres.

reconstituer en plusieurs années. La lutte contre le ruissellement exige de couvrir le sol en permanence en raisonnant les sens de travail des terres, mais aussi de réaménager les parcelles en réintégrant des fossés, des haies, etc., pour créer des barrières à l'écoulement.

Les sols ne sont pas morts. Ils sont riches en biodiversité : une petite cuillère de sol contient plus de micro-organismes qu'il n'existe d'humains sur la Terre. Cette biodiversité demeure très largement inconnue, puisque l'on estime que seuls 10 % de ces espèces sont identifiées. La biologie moléculaire a donc ouvert un champ de recherche considérable. Il est extrêmement probable que le maintien de cette biodiversité soit essentiel pour la résilience des sols en tant qu'écosystèmes.

Selon une enquête menée auprès de 2 000 agriculteurs en France, plus de 50 % d'entre eux estiment qu'il n'existe aucune menace. Quelques personnes se sont inquiétées de la contamination. La prise de conscience ne concerne qu'environ la moitié des agriculteurs, dont la plupart ignorent totalement les phénomènes de dégradation.

Au niveau français, quelques points apparaissent positifs. La vie des sols est bien développée et demeure fonctionnelle, mais la maîtrise de l'érosion, la gestion du phosphore au niveau national, l'évolution de la biodiversité et des puits et sources de carbone, apparaissent comme des incertitudes, voire des menaces très fortes. L'attention, y compris scientifique, doit être ciblée prioritairement sur les milieux périurbains, qui cumulent la pression d'artificialisation et les



Carte de l'urbanisation du cœur de l'Île-de-France en 2008. Elle témoigne de la fragmentation des types de sols.

contaminations. Car comme l'a écrit Saint-Exupéry, « *Nous n'héritons pas de la Terre de nos ancêtres, nous l'empruntons à nos petits enfants* ». Il faut donc construire des systèmes d'information sur les sols.

Une compilation du savoir constitué est disponible à travers le rapport *L'état des sols en France* et sa synthèse, publiés en 2011 par le GIS Sol[1]. Il est aussi possible de consulter le *Référentiel pédologique régional de l'Île-de-France*. La base de données géographique est disponible sur demande au GIS Sol. Une base de données est disponible pour l'Île-de-France au 1/250 000e, et la Chambre d'agriculture de Seine-et-Marne élabore actuellement une cartographie au 1/50 000e.

En savoir plus :
www.orleans.inra.fr/les_unites/us_infosol

1. www.gissol.fr/RESF/index.php
2. Jacques Roque, Référentiel régional pédologique de l'Île-de-France, Ed. Quae, 2003.

Le fonctionnement écologique des sols

Les sols se développent à partir de la dégradation physique et chimique de la roche-mère et d'apports de matière organique morte. La vie bactérienne, considérable, est essentielle pour la complexification des horizons du sol et la structuration des agrégats. Les végétaux apportent quant à eux la matière organique qui permet en retour le développement de la vie du sol, qui repose sur les organismes de petite taille (bactéries, champignons, nématodes, collemboles), mais aussi sur la macrofaune qui participe à son aération, à son brassage et à la dégradation des matières organiques : les vers de terre jouent ici un rôle crucial. L'ensemble du réseau trophique du sol conduit au recyclage de la matière organique du sol au cours de la minéralisation qui libère du CO_2 et des nutriments minéraux de nouveau disponibles pour les plantes. Les interactions entre la vie du sol et celle de sa surface sont extrêmement complexes et leurs conséquences sont en grande partie inconnues. Leur étude et leur utilisation sont pourtant centrales pour l'intensification écologique de l'agriculture et de nombreuses expériences sont menées en ce sens. La matière organique des sols et sa dynamique jouent aussi un rôle majeur dans le changement climatique, puisque la quantité de carbone qu'elle contient est supérieure, à l'échelle de la planète, à celle contenue dans l'ensemble de l'atmosphère et la biomasse.

Sébastien BAROT IRD – BIOEMCO

Voir sa présentation*

Un sol résulte de l'interaction entre le minéral (la roche mère) et le vivant et constitue un archétype de l'écologie, science des relations entre les organismes vivants et leur environnement physico-chimique. En montagne, le haut des versants est occupé par des éboulis rocheux alors que plus bas on trouve des formations herbacées ou des forêts. Dans le premier cas, le sol est absent. Son épaisseur augmente lorsque l'altitude diminue et qu'une végétation de plus en plus abondante s'est installée. Cet exemple illustre bien que le sol est formé par l'interaction entre la lithosphère, les végétaux et les autres organismes vivants. La production biologique primaire continentale est fondée sur l'existence des sols.

La roche est dégradée par l'action de la pluie et du gel. Les premiers apports organiques sont assurés par le vent et la pluie. La croissance des premières plantes – les lichens étant souvent pionniers – apporte plus de matière organique grâce à la photosynthèse. Cela débouche sur une première ébauche de sol. La croissance des plantes contribue ensuite à la dégradation de la roche qui libère des nutriments minéraux. Le sol, en se développant, se différencie en plusieurs horizons dont les plus superficiels sont les plus riches en matière organique.

Le sol ne forme pas une couche homogène et compacte. Un sol bien développé est structuré en agrégats de différentes tailles et imbriqués, séparés par des espaces libres – de l'air et de l'eau dont les proportions varient selon la pluviométrie. Les agrégats contiennent des débris végétaux, de petites particules minérales et un ciment constitué d'argiles d'acides humiques et de molécules produites par les bactéries (gel bactérien). Ce ciment donne une certaine stabilité aux agrégats, et cette stabilité est importante pour le maintien de la fertilité et de la croissance des plantes.

La production primaire de matière organique est assurée par les végétaux à partir de l'eau, de la lumière et des nutriments minéraux puisés dans le sol. Les plantes ou leur organes (racines, feuilles) meurent, ce qui fournit la litière et la matière organique morte des sols. Cette matière est recyclée au cours de la minéralisation, essentiellement grâce à l'action des micro-organismes (bactéries et champignons). La macrofaune du sol, dont les vers de terre, se nourrit aussi de cette matière organique et libère du carbone sous forme de CO_2, mais aussi des éléments minéraux tels que l'ammonium, le nitrate ou le phosphore rendus de nouveau disponibles pour les plantes.

Au niveau mondial, la matière organique morte des sols contient plus de carbone que l'ensemble du CO_2 de l'atmosphère et de la biomasse. L'avenir du carbone des sols est donc crucial pour le changement climatique. Il est essentiel pour les climatologues de savoir si la décomposition de la matière organique des sols est appelée à accélérer ou à ralentir au niveau mondial.

Les bactéries et les champignons sont des organismes essentiellement détritivores et consommateurs de matière

* *http://www.natureparif.fr/attachments/forumdesacteurs/Rencontres/Sols/2_SBAROT_19062012.pdf*

organique morte. Les régimes alimentaires des nématodes, d'une taille supérieure à ces derniers, sont très variés. Certains se nourrissent de champignons ou de bactéries alors que d'autres sont des parasites des racines des plantes. Les protozoaires sont très nombreux et consomment des bactéries. Une très grande partie des organismes du sol est aquatique et n'est active qu'au-delà d'une certaine teneur en eau. L'activité des nématodes et des autres consommateurs de bactéries au sein des réseaux trophiques des sols stimule la croissance des bactéries, donc la décomposition et la minéralisation. Cela favorise en retour la croissance des plantes.
Les organismes de taille plus importante sont très nombreux. Les collemboles sont des arthropodes dont les plus grands sont visibles à l'œil nu. Ils consomment la litière (feuilles mortes) ou la matière en décomposition. Certains acariens s'alimentent aussi de la litière. D'autres sont prédateurs. Les larves et chenilles d'insectes sont aussi très présentes et consomment très souvent la matière organique.

Le laboratoire BIOEMCO étudie en particulier les vers de terre, dont la biomasse est importante dans tous les sols riches en matière organique. Ils apparaissent comme des ingénieurs des écosystèmes, puisqu'ils modifient beaucoup leur environnement physico-chimique en consommant le sol dans lequel ils creusent leurs galeries. Cela participe à l'aération du sol et à l'infiltration de l'eau. Les turricules, déjections produites par les vers de terre, constituent une part très importante des agrégats du sol. Par l'ensemble de leurs activités, les vers jouent un rôle essentiel dans la bioturbation : ils favorisent le mélange entre les matières minérales et organiques, incorporent la litière au sol, entraînent la matière organique dans l'ensemble du profil de sol.

Un mètre carré de sol peut héberger 65 espèces de nématodes, 68 espèces de protozoaires, une dizaine d'espèces de vers de terre. Le nombre de bactéries par gramme peut atteindre 10^8, leur biomasse pouvant atteindre 200 grammes par m^2 dans des sols riches. La biomasse et la biodiversité des sols sont donc très élevées, même si la prise de conscience des menaces qui pèse sur cette dernière est faible. Dans le monde, quelque 4 000 espèces de vers de terre ont été identifiées, mais on estime que le nombre total doit être proche du double ; 8 000 espèces de collemboles sont connues sur un nombre total évalué à 50 000. La méconnaissance de la biodiversité des sols rend sa protection difficile, par exemple dans le cadre de l'agriculture.

Les plantes relient le sol au milieu aérien situé au-dessus de lui. De nombreux champignons et bactéries vivent en symbiose avec les plantes, qui fournissent de la matière organique aux sols. Certaines bactéries produisent des molécules reconnues en tant que phytohormones par les racines des plantes qui les capturent, ce qui influe sur les parties racinaires ou aériennes, selon des interactions très compliquées qui sont actuellement étudiées notamment dans la perspective de l'amélioration des systèmes de culture. De nombreuses autres interactions sont très complexes. L'attaque de certaines racines par des nématodes influe sur le développement de la plante et sur les caractéristiques chimiques de ses feuilles, ce qui modifie leur taux d'attaque par des chenilles et peut avoir un impact sur leurs prédateurs. À l'inverse, l'action des herbivores modifie la physiologie des plantes, le développement des racines et impacte les apports en matières organiques, ce qui modifie les communautés microbiennes et bactériennes du sol. Ces phénomènes restent très mal connus.

L'agriculture apparaît comme une modalité de gestion des interactions entre le sol et les plantes présentes en surface, qu'il s'agisse de les favoriser ou de les éliminer. Il faut donc gérer la fertilité du sol (notamment la teneur en matière organique). Or, les techniques de l'agriculture moderne – notamment les labours – diminuent le plus souvent cette teneur, provoquent l'érosion et la baisse de la fertilité.

Les engrais azotés sont produits à partir de sources d'énergie non renouvelables alors que les mines de phosphore devraient s'épuiser d'ici à une cinquantaine d'années. Il faut donc renforcer la part de matières organiques pour renforcer la fertilité et pour lutter contre le changement climatique. Pour cela, les nouvelles pratiques à mettre en œuvre devront mieux gérer la relation entre la vie souterraine et les pratiques agricoles, dans une démarche d'intensification ou d'ingénierie écologique. BIOEMCO a ainsi découvert que certaines graminées des savanes africaines inhibent l'action des bactéries qui contrôlent la nitrification, c'est-à-dire de transformation de l'ammonium en nitrate. Or, cette dernière forme d'azote est extrêmement mobile, migre à travers les sols vers les nappes phréatiques et peut être réémise vers l'atmosphère sous forme d'oxyde d'azote au cours de la nitrification. BIOEMCO a montré que ces graminées ont ainsi acquis la faculté de limiter les pertes d'azote par leurs écosystèmes, de favoriser leur propre croissance, et de façon générale, la production primaire. Une équipe japonaise essaye actuellement de produire des céréales inhibitrices de la nitrification, car les variétés actuellement commercialisées ont perdu cette capacité.

D'une manière générale, les vers de terre favorisent la croissance des végétaux. Des expériences ont été menées sur différentes variétés de riz : certaines réagissent plus favorablement à la présence de vers de terre. Il serait donc possible de sélectionner des variétés plus adaptées à des techniques agricoles alternatives s'appuyant sur la faune du sol. D'une manière générale, on pourrait penser à sélectionner de nouvelles variétés de céréales pour leur capacité particulière à interagir favorablement avec les organismes du sol (bactéries, champignons...). Cette capacité a pu être perdue par la sélection des variétés modernes dans des sols appauvris en matière organique et enrichis en nutriments minéraux par les engrais.

En savoir plus : www.biologie.ens.fr/bioemco

Occupation des sols franciliens : évolution et perspectives

L'Île-de-France est une région complexe et variée du point de vue géologique, hydrologique, climatique et biologique. Elle héberge des sols particulièrement fertiles, est soumise à une très forte pression et fragmentation urbaine et connaît une expansion de sa forêt. L'Institut d'aménagement et d'urbanisme d'Île-de-France (IAU) a dans les années 1970 et 1980, dressé des cartes d'aptitudes aux différents usages afin de respecter la destination préférentielle des sols. L'urbanisation de la région, longtemps cantonnée aux vallées, doit tenir compte des risques naturels tels qu'inondations, coulées de boues et retraits d'argile, et l'agriculture doit être spécialisée en fonction des caractéristiques des sols. Globalement, les sols urbains et périurbains doivent être préservés pour limiter ces risques, voire restaurés afin de les rendre à la vie et à la perméabilité et de contribuer à un meilleur approvisionnement en eau. Dans le cadre des trames vertes et bleues, les zones qui présentent les sols les plus remarquables et les plus rares doivent être protégées. Le changement climatique devrait aggraver les tendances actuelles et pousser à accélérer les actions de protection et de restauration des sols de l'Île-de-France, qui est déjà une région sèche.

Christian THIBAULT Institut d'aménagement et d'urbanisme d'Île-de-France (IAU)

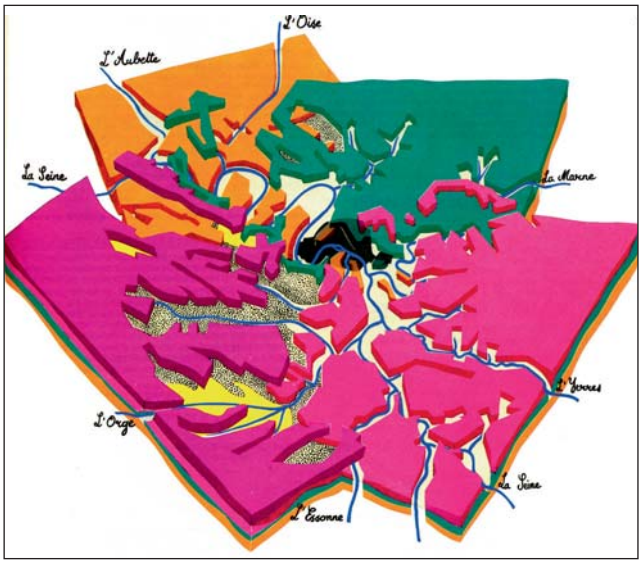
Voir sa présentation*

Le sol est à la fois un socle et un milieu vivant, mais les aménageurs ne le considèrent généralement que selon cette première fonction. Dans une région comptant près de douze millions d'habitants concentrés sur 2 % du territoire national, l'action environnementale de l'IAU vise à conserver la mixité des usages, ainsi que le maintien d'espaces ouverts non imperméabilisés constituant un réseau fonctionnel, ceci en tenant compte du fait que les lieux et les fonctions des milieux ne sont pas interchangeables dans l'espace.

L'IAU intègre depuis toujours le sol à sa réflexion, à travers des cartes d'aptitudes à l'urbanisation, à l'activité agricole, mais aussi à l'ouverture des forêts au public, dressées à partir des années 1970 et 1980. Malheureusement, ces cartes multicritères sont aujourd'hui très peu demandées à l'IAU et la planification de l'urbanisation ne tient pas compte, à l'heure actuelle, des impératifs liés aux sols.

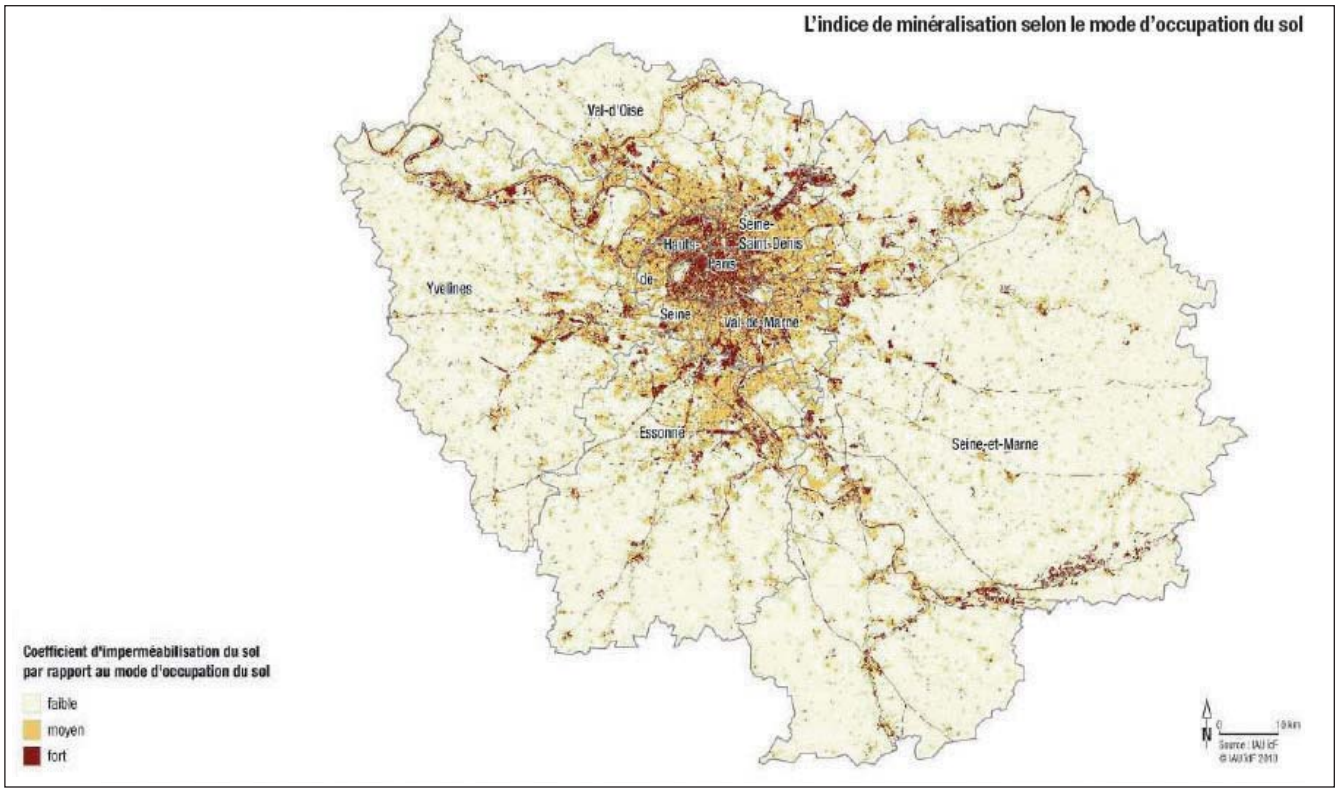
L'Île-de-France est une région de plaine qui reste beaucoup trop considérée comme homogène alors que sa diversité biologique, géologique et hydrologique est importante. Les roches-mères affleurantes sont très variées selon que l'on se trouve dans les plateformes de la Brie, du pays de France, du Vexin et de la Beauce. Paris est un site exceptionnel, car il se situe à leur rencontre. Les sols sont influencés par cette géologie. Le relief francilien n'est pas négligeable. Les expositions variées jouent un rôle important dans la caractérisation des milieux et des microclimats sont aussi liés au régime des pluies : il pleut davantage au Nord-Ouest de la région. L'artificialisation est très importante et atteint 21 % de la surface totale, se partageant en 15 % d'espaces urbains bâtis et 6 % d'espaces urbains ouverts.

Les données du sol doivent être prises en compte par un aménagement qui doit être pensé comme durable. Au-delà de l'urbanisme sur dalle, qui est le cas extrême, il ne faut pas plaquer les aménagements sur les surfaces, notamment

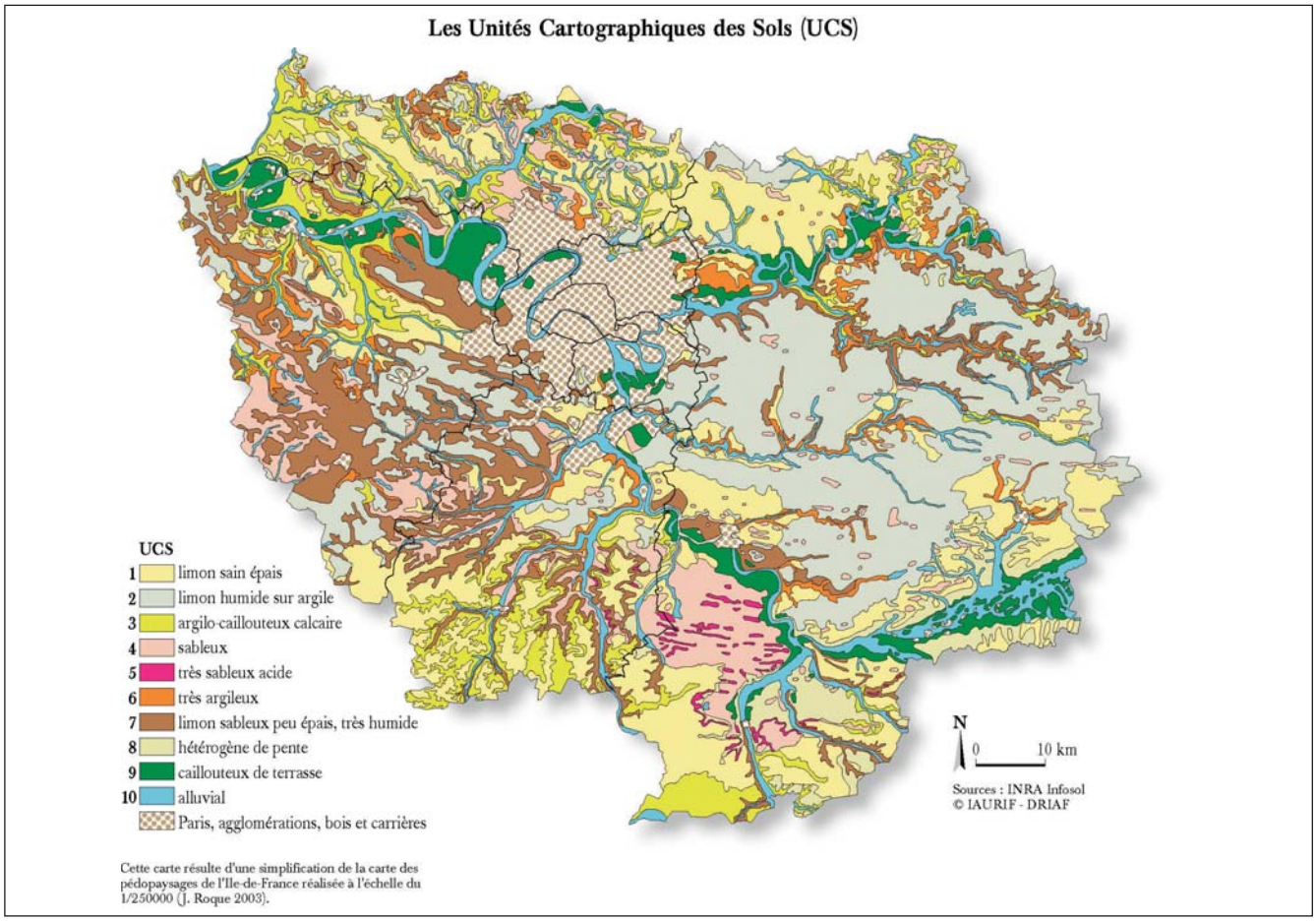


Quatre grandes plateformes géologiques imbriquées comme un escalier à vis constituent le socle de l'Île-de-France. Le réseau hydrographique en s'y imprimant a fait affleurer une grande diversité de couches géologiques (source IAU).

* *http://www.natureparif.fr/attachments/forumdesacteurs/Rencontres/Sols/3_CTHIBAULT_19062012.pdf*



Une partie importante des sols de l'Île-de-France a été imperméabilisée par l'urbanisation, ce qui a altéré ou bouleversé les sols sous-jacents. L'impact environnemental est d'autant plus fort que l'agglomération centrale coïncide avec la confluence du réseau hydrographique (source IAU).



L'Île-de-France présente une grande diversité de sols pour une région de plaine, reflétant la diversité des affleurements géologiques. Les sols urbains ne sont pas caractérisés (source INRA).

parce que la constitution des sols exige des milliers d'années, alors que leur destruction ne prend que quelques mois.

Comme le montre l'histoire des espaces agricoles et forestiers, les aménagements devraient être résilients et réversibles, ce qui permet de maintenir des espaces ouverts. La conception de l'urbanisme hors sol est liée à celle de l'économie, aussi conçue indépendamment des territoires et appuyée sur une importation massive de matériaux ignorant complètement les productions disponibles ou nécessaires au niveau local. Il est donc essentiel, même dans une région métropolitaine, de reconnecter une part de l'économie avec le sol, et ce, en dehors du seul domaine agricole. Par ailleurs, alors que l'on évoque beaucoup la consommation d'espace, les aménagements bouleversent les espaces au travers de déplacements de terres et les remaniements très importants des sols existants, dont les conséquences peuvent être irréversibles. C'est pourquoi la limitation de l'extension urbaine sur les sols est une des lignes directrices du Schéma directeur de la région Île-de-France (SDRIF), dont la révision reste en cours.

L'agglomération parisienne s'est considérablement étendue de 1700 à aujourd'hui, et de façon accélérée au XXe siècle. Néanmoins, les forêts résistent bien dans la période récente, car elles sont protégées : le scénario catastrophe consisterait donc en l'isolement des massifs boisés rendus non fonctionnels par une urbanisation totale qui, au rythme actuel, serait atteinte en deux siècles seulement.

La fragmentation des espaces et des sols par les infrastructures est de plus en plus évoquée grâce aux trames vertes et bleues et à l'action de Natureparif. L'Île-de-France est une des régions les plus touchées par ce phénomène qui crée des compartiments cloisonnés. Aujourd'hui, un seul de ces compartiments, situé à l'ouest de la forêt de Rambouillet, dépasse une surface continue de 5 000 hectares. L'altération, la pollution, la surexploitation et la surfréquentation des sols sont aussi très répandues en Île-de-France. L'activité industrielle et artisanale présente et passée a pollué une très grande partie du territoire.

La fertilité des sols est fondamentale pour l'agriculture et l'est d'autant plus que l'on souhaite développer des techniques biologiques et raisonnées. Or, ce critère est difficile à prendre en compte en Île-de-France, car les terres y sont globalement de bonne qualité, ce qui rend délicate la formulation de priorités, et parce que depuis les années 1970, les grands projets d'aménagement s'installent surtout sur les meilleures terres.

Historiquement, l'urbanisation s'est concentrée dans les vallées qui constituent des voies de communication. Mais la mise en place des villes nouvelles a rompu avec ce principe, en installant des agglomérations sur les plateaux, ce qui a été amplifié par le développement des aéroports. Les projets d'urbanisation du plateau de Saclay ou du triangle de Gonesse, l'extension de Marne-la-Vallée, etc. poursuivent cette tendance, puisque ces sites concentrent les meilleures terres de la région. Face à ces projets, l'agriculture pèse souvent peu, ce d'autant plus que la plupart de ces projets dérogent aux documents d'urbanisme existants. Cela plaide pour le maintien de leurs orientations dans le temps.

Dans les années 1970, l'IAU a établi des cartes de l'aptitude agronomique des sols pour différentes cultures dans les « zones naturelles d'équilibre » – secteurs ruraux définis à l'époque entre les cinq villes nouvelles d'Île-de-France et pour partie classés en Parcs naturels régionaux aujourd'hui. Les plateaux limoneux sont les plus aptes à la grande culture, alors que d'autres zones sont favorables au maraîchage et à l'agriculture fruitière. Par ailleurs, les sols sont très variés aux portes mêmes de l'agglomération en raison de la géologie et de la géomorphologie. Contrairement à la tendance actuelle, les sols périurbains devraient donc être préservés pour conserver la possibilité de disposer, en Île-de-France, d'une agriculture diversifiée. Un scénario à éviter, pourtant presque réalisé aujourd'hui, serait celui d'une agriculture vouée uniquement aux grandes cultures et confinée sur les plateaux.

Suivant la nature des milieux et des sols, l'aptitude à l'assainissement varie beaucoup, ce dont il faut tenir compte pour répondre aux problèmes quantitatifs et qualitatifs d'approvisionnement en eau de la région francilienne. La carte des arrêtés de catastrophe naturelle pour cause d'inondations ou de coulées de boue montre que le Nord de l'Île-de-France, mais aussi les zones les plus imperméabilisées, sont très soumis à ce risque. Une carte établie en 2001 par l'IAU et la DIREN (actuelle DRIEE) montre par ailleurs que la vulnérabilité aux pesticides varie selon les territoires, ce qui devrait conduire à orienter les pratiques agricoles selon les lieux.

La biodiversité francilienne est très liée aux sols et à la géologie, et c'est pourquoi la définition des trames vertes et bleues devrait s'appuyer sur ce point qui n'est pas suffisamment intégré aux travaux actuels. Car le sol est un intermédiaire privilégié pour la circulation des êtres vivants. C'est pourquoi, il est très important, en dehors des milieux urbanisés et des plateaux limoneux, de cartographier et de protéger les sols rares caractérisés par l'aridité locale, par l'asphyxie (sols humides), par un substrat calcaire et/ou une exposition chaude, par l'acidité ou par l'absence de sol (sables de Fontainebleau et calcaires du Vexin).

La cartographie pédologique disponible (base Donesol de l'INRA) se limite au 1/250 000e, alors que la surface des milieux naturels rares peut être très réduite. Il est néanmoins possible de les approcher grâce au SIG et à une approche multicritères. L'IAU a ainsi établi à titre expérimental, dans la partie nord-ouest de la région, une carte des sols à fort potentiel de biodiversité, et il faudrait désormais enquêter sur la biodiversité réelle de ces milieux pour intervenir là où cela est nécessaire. Le projet pourrait être étendu à l'ensemble de la région au cours des années à venir grâce au partenariat entre l'IAU et Natureparif.

Les sols jouent un rôle essentiel dans la gestion des risques naturels, puisqu'ils résistent plus ou moins à l'érosion ou fixent les polluants, mais peuvent aussi provoquer des mouvements de terrain : en Île-de-France, les retraits d'argile peuvent comporter des risques importants pour l'habitat individuel.

La nature en ville doit aussi être reconnectée aux sols. Le développement des murs végétaux et des terrasses végétalisées, s'il présente des utilités paysagères et bioclimatiques, ne peut pas remplacer la vie des sols de pleine terre. Pour limiter et inverser la compartimentation des sols, il est envisageable de décaper les trottoirs sous les alignements d'arbres de la voirie haussmannienne, pour créer des bandes de sol munies d'une trame de végétation composée de différentes strates. Il est aussi possible d'adapter des plantations aux sols existants (y compris remaniés) afin de limiter les excavations. Il faudrait aussi reconstituer un certain nombre de sols afin de retrouver une riche trame de sols vivants végétalisés et perméables en ville.

Le changement climatique accentue les problèmes existants, et pousse à accélérer l'action. L'Île-de-France est une région sèche et le sera de plus en plus, puisque le climat devrait, en 2050, être comparable à celui de Séville aujourd'hui. Or, la sécheresse est l'un des principaux facteurs de dégradation de la structure des sols. Face à ces risques, le maintien d'un système complexe de surfaces fonctionnelles de pleine terre est la meilleure réponse. Le changement climatique pourrait aussi amener à reconsidérer l'aptitude agronomique des sols en raison de la modification du régime des eaux, ce qui pourrait impliquer de nouveaux travaux d'irrigation, mais aussi de drainage. L'aptitude des sols doit donc être pensée aussi sur le long terme.

En savoir plus : www.iau-idf.fr

La lutte contre l'artificialisation du PNR des Boucles de Seine Normande

Jean-Pierre GIROD
Président du Parc naturel régional (PNR) des Boucles de Seine Normande

« Le PNR des Boucles de Seine Normande est situé en aval de l'agglomération francilienne et est soumis à une partie des pollutions qui en sont issues, notamment sous la forme des boues d'épandage. Il faut insister sur le rôle crucial du maintien des prairies, qui, lorsqu'elles sont labourées, relâchent de fortes quantités de polluants et de carbone atmosphérique. Il faut faire évoluer les systèmes agricoles des cultures, mais aussi faire en sorte de maintenir l'élevage extensif, qui est en difficulté. Par ailleurs, les zones humides font partie des micros-systèmes à défendre, voire à valoriser. Elles demeurent en déclin en dépit d'engagements internationaux forts, notamment au travers du traité RAMSAR.

La lutte contre l'artificialisation réclame des changements de comportements et de conception de l'habitat. Le PNR des Boucles de Seine Normande constate une minéralisation des équipements publics, mais aussi des jardins des particuliers. Il faut proposer des solutions alternatives, notamment pour construire des terrasses végétalisées. Les aménagements publics font eux appel systématiquement à des matériaux tels que le granit, l'ardoise, mais non aux matériaux locaux ou à la terre battue. Comme l'Île-de-France, la Haute-Normandie est durement frappée par l'urbanisation, et ce n'est qu'à l'issue d'un an et demi de débat qu'il a été possible de faire adopter une réduction de plus de 50 % du rythme d'urbanisation sur le territoire du PNR dans les douze années à venir. »

Focus

vers une stratégie et une directive européenne sur les sols

Vers une stratégie et une directive européenne sur les sols

L'état des sols se dégrade partout dans le monde, y compris en Europe, où les phénomènes d'érosion, de contamination, de désertification, de salinisation, d'acidification et de perte de biodiversité, sont très importants, tout comme les dégagements de gaz à effet de serre. Un premier recensement des terrains pollués a été effectué. La Commission européenne a adopté une Stratégie sur les sols et a proposé un projet de directive, car il n'existe actuellement, au niveau européen, que des protections sectorielles. Une communication publiée en 2006 s'appuie sur les principes de sensibilisation, de recherche, d'intégration des politiques et de développement de la directive. La proposition de directive comporte plusieurs thèmes : lutte contre l'imperméabilisation, protection des terres agricoles, identification et traitement des sols pollués. Les États disposeraient de 25 ans pour localiser leurs sols contaminés et devraient se donner les moyens de les assainir. Le texte a reçu un avis positif de la part du Comité des régions, du Conseil économique et social et du Parlement européen, mais reste bloqué par cinq États membres, dont la France.

Alia ATITAR DE LA FUENTE Commission européenne, DG Environnement

Voir sa présentation*

Alors que la directive européenne sur les sols demeure en projet, la Stratégie européenne sur les sols, est, elle, bien en place. La Commission européenne souhaite en effet mettre en place un cadre pour la protection des sols au niveau européen.

Les sols assurent des fonctions fondamentales et apportent des services environnementaux irremplaçables, en particulier pour le cycle de l'eau et le stockage de carbone. Ces services sont effectifs, mais leur valeur, y compris, économique n'est le plus souvent pas prise en compte. Il est d'autant plus nécessaire de protéger les sols, dont l'état se dégrade partout dans le monde. Sur Terre, 1,5 milliard de personnes sont touchées par l'érosion, la sécheresse ou la désertification, qui peuvent conduire à la famine ; 20 % des émissions mondiales de gaz à effet de serre sont dus à la dégradation des sols, dont 800 millions de tonnes du seul fait des conversions de tourbières. La protection des sols doit donc être pensée de façon globale.

L'imperméabilisation et l'artificialisation des sols sont des phénomènes majeurs. Selon l'Agence européenne de l'environnement (AEE), les surfaces imperméabilisées représentent près de 250 m^2 par personne en France, ce qui est proche de la moyenne européenne. Elles dépassent 500 m^2 dans certains pays. Il a été montré que la perte de sols, dans 19 États membres, correspond à la production perdue de 6,1 millions de tonnes de blé par an. Cela permet d'évaluer le coût de l'artificialisation. 20 % de la surface de ces États connaissent des problèmes d'érosion très sévères, c'est-à-dire une perte de sol supérieure à 10 tonnes par hectare et par an, alors que l'érosion est considérée comme irréversible à partir d'une tonne par hectare par an.

En 2006, l'AEE a évalué que la contamination des sols concernait probablement 3,6 millions sites dans l'UE. Il est très difficile de connaître l'étendue du problème puisque la majorité des États membres ne disposent pas d'inventaires exhaustifs. La réalité est donc probablement très défavorable. Les sols sont aussi dégradés par la désertification, la salinisation, l'acidification et la perte de biodiversité, qui sont très importantes.

Face à ces constats, il n'existe pas de réglementation communautaire des sols, contrairement à l'air, la nature ou l'eau. La question des sols est partiellement intégrée dans plusieurs directives qui n'apportent que des protections sectorielles. C'est pourquoi la Commission européenne a proposé une réglementation spécifique à la protection des sols. En 2002, le programme d'action pour l'Environnement de la Commission européenne s'est prononcé pour cette protection. Les travaux préparatoires ont débouché sur la publication d'une communication en 2006. Celle-ci englobe la Stratégie et inclut quatre piliers, dont une proposition de directive spécifique.

Le pilier de la sensibilisation vise à faire connaître les questions du sol et la nécessité de leur protection au grand public. La DG Environnement organise de nombreuses conférences,

* *http://www.natureparif.fr/attachments/forumdesacteurs/Rencontres/Sols/2_SBAROT_19062012.pdf*

dont plusieurs ont eu lieu en 2012. Après Rio + 20, la prochaine portera le 16 novembre 2012 sur la dégradation générale et la désertification. Les événements sont ouverts à tous et leur calendrier peut être consulté sur le site Internet de la DG Environnement[1] . Des documents d'information sont aussi publiés, dont une série d'atlas (*Atlas de la typologie des sols en Europe, Atlas de la biodiversité du sol en Europe, Atlas des sols circumpolaires*). Un atlas de la désertification est en préparation. En 2011, de nombreuses conférences ont été organisées et des brochures ont été publiées sur la biodiversité des sols, l'année 2012 étant consacrée à l'artificialisation, dans la perspective de la publication de lignes directrices.

Le pilier de la recherche a pour objectif de combler les lacunes dans la connaissance des sols : 25 projets ont été menés dans ce cadre.

Le pilier de l'intégration reprend un des principes généraux de la politique environnementale et vise à intégrer la protection des sols dans les autres secteurs. Ainsi, dans le cadre de la révision 2010 de la directive 96/61/CE relative à la prévention et à la réduction intégrées de la pollution, la protection des sols des sites concernés a été renforcée. Les acteurs économiques devront agir, le cas échant, pour décontaminer les sols. Mais cette protection reste sectorielle puisqu'elle concerne seulement certains types d'installations industrielles et ne s'attaque pas au problème des sites industriels pollués dans le passé.

C'est pourquoi la Commission européenne propose une directive européenne Sols, qui doit être coélaborée avec le Parlement et le Conseil européen. Le texte final pourra donc être très différent des propositions successives des différentes présidences du Conseil qui ont échoué à les faire adopter. Le projet identifie toutes les menaces pesant sur le sol : imperméabilisation, perte de matière organique, salinisation, contamination, glissement de terrain, tassement, érosion, afin de disposer d'une vision intégrée de toute la problématique.

La proposition comporte des mesures de prévention, qui sont prioritaires, mais aussi des mesures d'identification des problèmes et d'action. Elle est organisée autour de trois grands thèmes.

En vertu du premier thème, les États membres doivent prendre des mesures contre l'imperméabilisation et l'artificialisation, et, lorsque cela est impossible, prendre des mesures compensatoires. La Commission a publié en 2012 un guide de bonnes pratiques en faisant appel à des experts provenant de tous les États-membres. Les traductions, notamment en français, sont actuellement en voie de publication afin que les autorités régionales puissent diffuser les pratiques.

Le second thème, agricole, englobe les problématiques d'érosion, de matière organique, de tassement, de salinisation et de glissement de terrain. Le projet prévoit que les États effectuent un recensement public des zones à risque sous un délai de cinq ans et adoptent des programmes de mesures pour agir.

Le troisième thème concerne la contamination des sols. Les États devraient réaliser des inventaires publics sous un délai de 25 ans. Les États devraient sous cinq ans avoir réalisé leur inventaire des sites potentiellement contaminés sur la base d'une liste d'activités (débits de carburants, par exemple) dont les États devraient localiser les implantations actuelles et passées avant de réaliser des analyses chimiques. En cas de présence des polluants, il faudrait les compléter par des analyses locales des risques. Les analyses chimiques et des risques seront effectués en parallèle et pendant une période de 25 années : 10 % des sites potentiellement contaminés devront avoir été analysés au bout de 5 ans et 60 % au bout de 15 ans. En cas de péril pour la santé ou l'environnement, les sites seraient classés à l'inventaire. La directive prévoit une obligation d'assainissement des sites contaminés, mais sans délai impératif. Les États devraient néanmoins mettre en place une stratégie nationale garantissant que les sites seront traités – y compris les sites orphelins pour cause de disparition de leurs utilisateurs.

Afin de maîtriser le coût des analyses chimiques, le projet de directive prévoit la réalisation par les acteurs économiques (vendeur ou acheteur) d'un rapport sur l'état du sol lors de la mise en vente d'un site sur lequel est pratiquée une activité potentiellement polluante. Les informations contenues dans ce rapport doivent être transmises aux autorités compétentes pour leur utilisation aux fins d'établir l'inventaire des sites contaminés. Des dispositions similaires existent déjà dans certains états membres, par exemple en Belgique, ou il est obligatoire de réaliser une analyse chimique en cas d'achat de terrain et de l'adresser aux autorités publiques.

L'argument selon lequel l'adoption de la directive serait très coûteuse du fait que l'action de protection et de dépollution des sols est généralement jusqu'à présent très modeste. Or, les problèmes de pollution s'accumulent et il apparaît préférable de s'y attaquer avant qu'ils n'empirent et ne débouchent sur des coûts de dépollution encore plus élevés.

La protection de la biodiversité des sols, telle quelle, n'est pas comprise dans le projet, car en 2006, les données scientifiques en ce domaine étaient rares. La Stratégie comprend donc un axe de renforcement de la recherche sur la biodiversité, car celle-ci est apparue insuffisante. L'année 2011 a été celle de la biodiversité des sols, puisqu'une étude synthétique a permis de rassembler les travaux menés depuis 2006 et de dresser un constat de la dégradation des sols en Europe.

En 2006, la proposition de directive soumise par la Commission européenne a reçu l'avis favorable du Comité des

1. *http://ec.europa.eu/environment/soil/index_en.htm*

régions et du Conseil économique et social européen, tout comme du Parlement européen en première lecture. Les amendements du Parlement européen ont renforcé le texte sur certains points et l'ont affaibli sur d'autres, mais la structure a été respectée et le texte a été renvoyé devant le Conseil, où 22 États membres y sont favorables, mais où d'autres Etats ont constitué une minorité de blocage (France, Allemagne, Royaume-Uni, Pays-Bas et Autriche). Certains estiment que le sol relève de la responsabilité nationale et d'autres soulèvent des arguments de proportionnalité et de coût.

La Commission fera tout son possible pour que la directive soit adoptée. La directive cadre qu'elle propose permet aux États d'appliquer les objectifs désignés de la façon qui leur semble la plus adaptée à leurs réalités. Il faut à présent que les États fassent montre de leur volonté de négocier et de parvenir à résoudre les problèmes soulevés par la directive. Malheureusement, la volonté politique manque toujours dans certains pays, dont la France.

En savoir plus :
http://ec.europa.eu/environment/index_fr.htm

La PAC et la protection des sols

Michel VAMPOUILLE
Ancien vice-président à l'Environnement de la Région Île-de-France
« En dehors du projet de directive Sols, d'autres projets européens ont un impact sur les sols. C'est le cas de la politique agricole commune (PAC), notamment. Les objectifs de la directive sont-ils intégrés dans son projet de révision ? Certaines propositions de versions antérieures de la PAC tendaient à favoriser l'agriculture de proximité, mais ce vœu a été contredit par l'action des commissaires européens à la concurrence. Et en pratique, les conditionnalités environnementales de la PAC n'a pas permis de modifier les pratiques agricoles en France. »

Jean-Pierre GIROD
Président du PNR des Boucles de Seine Normande
« La PAC, du fait de son système de subventions, a favorisé les grandes cultures au détriment des prairies. Ses mécanismes de subvention ont aussi entraîné le drainage de zones humides à une certaine période. La PAC ne peut être déconnectée des problématiques de sols et doit être rendue cohérente avec ces derniers. »

Alia ATITAR DE LA FUENTE
Commission européenne
« La Commission européenne a avancé une proposition de révision de la PAC qui doit être discutée par le Parlement et le Conseil européens. Il existe déjà un système de conditionnalité environnementale qui comprend des dispositions sur l'érosion et sur les métaux liés aux activités agricoles. Il existe aussi des guides pour la lutte contre l'érosion et pour la conservation de la matière organique, qui ont apporté une protection minimale. La DG Environnement souhaite que la révision de la PAC comprenne un renforcement de la protection du sol, mais ne dispose pas du pouvoir de décision. Ceci étant, ces mesures viseraient uniquement les terres agricoles incluses dans le système de la PAC. Or, une énorme surface y échappe en Europe, et de façon plus générale, un cadre spécifique de protection de l'ensemble des sols est nécessaire. La PAC ne peut pas s'y substituer. »

Milieux urbains et périurbains

Les enjeux agriculture et sol dans l'élaboration des SCoT (projet AgriSCoT)

Les SCoT sont des documents d'urbanisme dont l'objectif consiste à planifier et à organiser des territoires intercommunaux. Ils devraient couvrir toute la France en 2017. Munis d'une portée juridique, ils mettent en cohérence les politiques territoriales sur une période de 20 ans. Ils sont donc, pour le réseau Terres en Villes et ses partenaires, un outil privilégié pour, dans la concertation, apporter une limite à l'extension urbaine et, alors que la notion d'agriculture de proximité se développe, protéger les terres agricoles durablement. Les tendances peuvent être favorables, puisque la croissance urbaine fléchit dans certains territoires. Terres en Villes considère que les terres agricoles doivent être pensées comme un bien commun et qu'il faut développer des projets territoriaux clairs et lisibles, au travers d'une démarche comprenant les étapes suivantes : sensibiliser les acteurs, élaborer un projet politique, adopter des objectifs de consommation des espaces, cartographier les espaces agricoles à pérenniser, intégrer les mesures aux PLU.

Bruno JULIEN Directeur de la stratégie des territoires à l'Agence d'urbanisme de la région nantaise, membre de la FNAU et partenaire du réseau Terres en Villes.
Voir sa présentation*

Terres en ville est un réseau de 26 grandes collectivités urbaines. Les territoires y sont représentés par des élus et des représentants du monde agricole (chambres d'Agriculture, le plus souvent) afin de promouvoir les espaces agricoles dans les grandes villes, par exemple au travers du projet collectif AgriSCoT mené en collaboration avec l'IAU, la Communauté urbaine de Lille, l'Agence d'urbanisme de la région nantaise, le Certu, la Communauté d'agglomération du Pays voironnais, Rennes Métropole et l'Assemblée permanente des chambres d'Agriculture. Terres en Villes a publié avec le Certu l'ouvrage *Comment prendre en compte l'agriculture et ses espaces dans les ScoT* ainsi que le guide *L'agriculture dans les SCoT*.

Les plus de 400 Schémas de cohérence territoriale (SCoT) existant en France sont des documents d'urbanisme définis par la loi SRU de l'année 2000, et ont pour objectif de planifier et d'organiser les territoires intercommunaux, notamment afin d'appréhender les dynamiques urbaines à l'échelle du bassin de vie. En pratique, leurs périmètres sont assez variables. Certaines zones, telle que le centre de la Bretagne ou l'Île-de-France (en attente du SDRIF) en sont assez dépourvues, mais le législateur a décidé avec le Grenelle de l'Environnement que l'ensemble de la France devra être couvert par un SCoT en 2017. De nombreux territoires se sont donc organisés pour les élaborer.

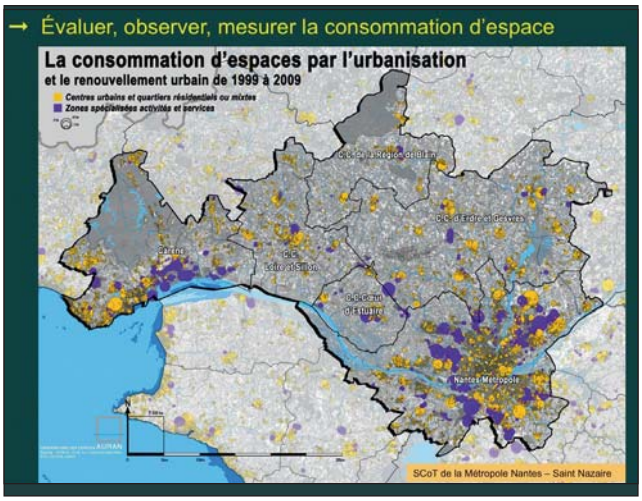
Les SCoT mettent en cohérence les politiques d'habitat, de commerce, d'environnement et d'agriculture, dans le cadre d'un Plan d'aménagement et de développement durable. Il possède une portée politique et juridique. Ces schémas visent souvent un horizon temporel de 20 ans et leur élaboration est très souvent un temps privilégié pour aborder l'ensemble des aspects d'un territoire, dont la question agricole.

La loi d'Orientation foncière de 1967 jetait les bases des Schémas directeurs d'aménagement de d'urbanisme, mais ce n'est qu'aujourd'hui que l'urbanisme rompt avec la notion de ville hors sol pour appréhender la ville dans son site. Pour Terres en Villes et ses partenaires, un espace agricole fort et une activité agricole bien reconnu sont un rempart face à une ville qui s'étend. Le rôle économique des filières agroalimentaires est important alors que la notion de circuits court se développe, et que ces circuits pourraient assurer jusqu'à 20 % de la couverture alimentaire d'une grande ville. L'espace agricole est donc une richesse : ainsi, le territoire de la métropole Nantes-Saint-Nazaire qui accueille 800 000 habitants comprend plus de mille exploitations ; 80 % de sa surface est agricole ou protégée. La protection de l'agriculture concourt à la qualité de vie des citadins et à la préservation des sols vivants et de la biodiversité.

La consommation d'espace reste importante. L'espace urbain de Nantes-Saint-Nazaire a triplé depuis 1960 et l'artificialisation des sols augmente globalement. Cependant, la consommation annuelle d'espace a diminué de 13 % depuis

* http://www.natureparif.fr/attachments/forumdesacteurs/Rencontres/Sols/5_BJULIEN_19062012.pdf

Ville et campagne sont imbriquées sur le territoire de la métropole Nantes-Saint-Nazaire : 80 % de sa surface est agricole ou protégée.



Consommation d'espace par urbanisation dans la communauté urbaine de Nantes-Saint-Nazaire de 1999 à 2009.
La consommation d'espace a diminué de 13 % de 2007 à 2012 par rapport à la période 2001-2006.

5 ans par rapport à la période antérieure. La baisse a été de 30 % pour les zones résidentielles, mais la consommation liée aux activités économiques et commerciales a augmenté. La maîtrise du foncier économique est devenue un fort enjeu.

La démarche promue par Terres en Villes et ses partenaires considère que les espaces agricoles doivent être considérés comme un bien commun, à l'inverse des schémas urbains adoptés à partir des années 1960, qui étaient tracés sur « du blanc », niant les espaces agricoles dans les stratégies d'organisation des territoires. Il convient donc d'inverser notre vision, et de penser le territoire dans son ensemble, à partir de son cadre naturel. Il faut pour cela co-construire une vision stratégique et afficher un projet territorial clair et pédagogique. Ainsi, Rennes Métropole affirme le projet d'une ville dense et compacte en cœur de métropole et autour d'un certain nombre de bourgs, en concevant une « ville archipel ».

Il convient également de prendre en compte la multifonctionnalité des espaces agricoles et de l'ensemble des espaces naturels ouverts (dont les zones humides) pour les protéger.

Les SCoT doivent prendre en compte l'agriculture non seulement au travers des espaces agricoles, mais aussi reconnaître les activités agricoles et les contraintes qui y sont liées.

Pour Terres en Villes, la démarche compte plusieurs étapes successives :

- sensibiliser les acteurs agricoles afin qu'ils deviennent parties prenantes de la planification et organiser la concertation pour construire la gouvernance du territoire. Il faut le plus souvent appréhender l'agriculture à travers un groupe *ad hoc*, et non la rattacher à un groupe Environnement ou Activités économiques ; mener un diagnostic agricole, sachant que le Grenelle de l'Environnement exige de dresser un bilan de la consommation d'espace de la décennie écoulée avant de décider des usages dans le SCoT ;
- élaborer un projet politique intégrant l'agriculture et le traduire dans le SCoT, en assurant la protection des domaines agricoles. Il faut rappeler que le Grenelle de l'Environnement demande de fixer des objectifs de protection des espaces naturels, agricoles et forestiers ;
- adopter des objectifs de consommation des espaces, et le cas échéant afficher des objectifs de surface maximale destinée à l'urbanisation, de densification et de renouvellement urbain ; se donner les moyens de protéger les espaces agricoles, en adoptant par exemple un seuil minimal de surfaces agricoles protégées par commune ;
- cartographier les espaces agricoles devant être pérennisés pour au moins 20 ans, pour répondre à la profession qui réclame une lisibilité en la matière, sur la base d'un travail de concertation, sans descendre nécessairement à l'échelle de la parcelle, qui dépend de la commune. Des frontières nettes peuvent aussi être tracées pour les extensions de l'urbanisation, comme l'a élaboré l'agglomération de Montpellier, ou également le projet de SDRIF ; faire le lien avec des mesures plus précises du type PAEN, qui définissent, à la parcelle, des projets de gestion ;
- mettre en œuvre le SCoT, en assurer le suivi, en intégrant les mesures dans les PLU et en articulant les SCoT avec les projets portés par l'agglomération. Rennes Métropole a ainsi construit un Programme local de l'agriculture ;
- enfin, évaluer le SCoT tous les six ans, notamment en matière de consommation d'espace.

La planification du SCoT a pour but de montrer qu'un certain nombre de terrains ont une vocation agricole sur une durée longue. Le SCoT a une valeur juridique et s'impose aux documents d'urbanisme de rang inférieur (PLU, ZAC, etc.), puisque les documents communaux doivent lui être compatibles. En revanche, le SCoT ne peut pas tout prévoir. Il existe par exemple un projet de LGV qui relierait Nantes et Rennes, dont le tracé est encore inconnu. Si ce projet était réalisé, il impacterait forcément des zones agricoles dites pérennes.

Cela supposerait une DUP et d'autres documents. Le SCoT devrait alors être revu pour intégrer ce projet. Le SCoT annonce des principes en fonction de ses lignes d'horizon, mais ne garantit pas tout. Il doit à la fois afficher un message clair sur l'avenir et conserver une capacité d'adaptation au moyen de révisions.

Enfin, d'autres outils peuvent être utilisés. Par exemple, il est possible lorsque la situation de la zone agricole est tendue de créer des Zones agricoles protégées (ZAP), et, désormais, des périmètres de Protection des espaces agricoles et naturels (PEAN) grâce à la loi d'orientation agricole de 2006. Ainsi l'agglomération de Nantes travaille à la mise en place d'un PEAN de 30 000 hectares autour du projet d'aéroport à Notre-Dame-des-Landes qui risquerait d'attirer un développement de la ville vers le nord si rien n'était fait pour préserver les espaces agricoles. La planification et les outils de maîtrise foncière doivent être complémentaires.

En savoir plus : www.terresenvilles.org

Vers une régénération des sols urbains

Comme l'a souligné **Antonio BISPO**, ADEME, « *il est en général procédé au décapage du sol pour procéder à l'urbanisation et la vie est généralement très pauvre sous la surface urbaine. Les sols transportés, en revanche, conservent une vie microbiologique même s'ils sont perturbés.* »

Mais comme le montre l'expérience de Sol-Paysage, il est possible d'accélérer la régénération des sols urbains. **Pascal SIMONET**, équipe Génomique microbienne environnementale, CNRS Laboratoire Ampère, a noté que « *les micro-organismes possèdent une capacité de résistance considérable, et c'est pourquoi il est difficile de parler de sols morts. Il est plus juste de parler de diminution de la biodiversité en dessous d'un certain seuil de détection plutôt que d'une perte nette de biodiversité. Ces micro-organismes, extrêmement résistants, se redéveloppent dès que les conditions sont favorables. Des travaux sont menés pour vérifier l'hypothèse selon laquelle les éléments vivants présents dans les sols seraient presque partout les mêmes, mais que seules leur distribution et leur abondance varierait en fonction des conditions.* » **Cécile VILLENAVE**, Elisol Environnement, a souligné que « *les expériences menées sur des sols construits montrent qu'une certaine biodiversité des micro-organismes et des nématodes se redéploie très vite, dans un délai de trois ans, dès lors qu'est effectué un apport de terre. Le développement de la macrofaune peut être assisté par l'apport de vers de terre, qui repeuplent alors plus rapidement le milieu, ce d'autant plus qu'il est humide*. »


Béatrice JANNIC

Plusieurs collectivités ont donc ouvert des programmes de désimperméabilisation d'une partie des sols urbains. **Béatrice JANNIC**, Ville de Paris, DEV, Observatoire parisien de la biodiversité, a indiqué que « *la Ville de Paris étudie un certain nombre de projets sur la voirie dans le cadre de son plan Biodiversité. En fonction de l'usage des trottoirs, de la présence éventuelle de stabilisés et de pieds d'arbres, différentes propositions pourront être faites. Des expérimentations différentes seront menées en fonction de la largeur et de la situation géographique des trottoirs.* » **Jocelyne REEKERS**, conseillère municipale de Montreuil, déléguée à l'Environnement et à la nature en ville, a précisé qu'« *il existe en ville des sols non imperméabilisés. Il est aussi possible, en pied d'arbres comme ailleurs, de décaper les sols. Chaque mètre carré compte. Montreuil a dépensé beaucoup d'argent pour construire des bassins de rétention en béton, mais ce n'est qu'en augmentant les surfaces de sol à nu que les précipitations pourront être absorbées*. »

Gestion durable des sols dans les projets urbains

Fondaterra a rejoint le projet D²Sou pour apporter aux acteurs techniques et politiques une meilleure information sur les sols et sous-sols dans le cadre de projets d'aménagement. Pour cela, le consortium D²Sou regroupe des spécialistes des géosciences et de la géomécanique des sols, un laboratoire de sciences économiques et sociales, ainsi que Fondaterra et un club d'urbanistes. Le projet intègre les sciences techniques, humaines et sociales afin de prendre en compte toutes les problématiques du développement durable. Il vise à faire émerger les besoins d'information, les moyens d'y répondre et à intégrer les données du sol et du sous-sol dans les indicateurs des projets. Des territoires et des projets pilotes ont été définis. La méthode INTEGRAAL, en cinq phases, a été mise en œuvre pour évaluer les enjeux multicritères et proposer une évaluation à chaque partie prenante. Une check-list et des fiches de savoir sont en cours d'élaboration à l'attention des responsables de projets et des décideurs. Les sources d'information sont multiples : GRGM, inventaires historiques urbains, services géologiques et archéologiques régionaux, etc. D²Sou sera conclu début 2013 par un atelier de restitution lors duquel des modules de formation libres de droit seront proposés aux acteurs territoriaux.

Mathieu GARNIER Fondaterra, chef de projets Écologie territoriale et Aménagement durable
Voir sa présentation*

Fondaterra est une fondation partenaire de l'université Saint-Quentin-en-Yvelines, et qui vise à accompagner les territoires vers le développement durable. Elle est intervenue dans les territoires des boucles de Chanteloup-les-Vignes et d'Achères pour aborder des problématiques de sols pollués, qui ont manifesté la nécessité d'obtenir plus en amont des projets d'aménagements des informations sur les sols et les sous-sols de la part des instituts d'urbanisme.

C'est pourquoi Fondaterra a rejoint le projet D²Sou initié par le BRGM. Il intègre les sciences techniques et les sciences humaines et sociales. Ce projet ANR Villes durables 2009 a été labélisé par le pôle de compétitivité Advancity et se déroule de 2010 à début 2013. Il vise à prendre en compte les sols et sous-sols dans les projets d'aménagement, car les interviews menées auprès des maîtres d'œuvre et des maîtres d'ouvrage ont montré que l'information technique, y compris en matière de mécanique des sols et de contraintes liées aux pollutions, ne leur étant pas accessibles.

D²Sou porte sur trois projets : le premier à un stade amont, le second en cours et le troisième terminé. Il a pour objectif d'alerter les porteurs de projets d'aménagement de leurs interactions avec les sols et sous-sols et de définir les enjeux exprimés ou non pris en compte par les politiques publiques, ce qui permet de faire émerger les besoins d'information, puis de renseigner les acteurs sur les meilleurs moyens d'y répondre. Le projet vise aussi à intégrer les données sur les sol et sous-sols aux indicateurs multicritères et multi-acteurs de développement durable.

Le consortium comporte des spécialistes des géosciences et de la géomécanique des sols (BRGM, Géocarta et IMM, laboratoire de l'université Bordeaux I). Il comprend aussi REEDS UVSQ dans le domaine des sciences économiques et sociales – REEDS UVSQ étant également chargé de l'intégration des données issues des sciences techniques et des sciences humaines et sociales – ainsi que Fondaterra et le club d'urbanistes D2C. La commune de Pessac et le territoire de la Communauté urbaine de Bordeaux ont été retenus comme territoire pilote. Une évaluation *a posteriori* est effectuée sur un des projets de la Société d'équipement du Poitou et Aménagement 77 a contacté le consortium sur des problématiques de pollution des sols. D'autres acteurs devraient rejoindre le projet afin d'assurer l'ancrage de terrain et d'apporter des terrains d'étude ainsi que leur expérience.

Les outils sont entrés en phase d'expérimentation. La première phase portant sur les enjeux des opérations d'aménagement, menée par Fondaterra et REEDS UVSQ, a fait ressortir trois grandes thématiques génériques : économie des projets, respect de la législation et prise en compte du développement durable. Elle sera suivie d'une phase d'analyse, puis d'une phase de diffusion des résultats au travers d'un atelier.

Pour développer des outils d'aide à la concertation et à la décision, la méthode INTEGRAAL développée par REEDS a

* http://www.natureparif.fr/attachments/forumdesacteurs/Rencontres/Sols/6_MGARNIER_19062012.pdf

été adoptée. Elle permet de partager les enjeux multicritères entre les acteurs impliqués sur le territoire et aboutit à une évaluation de scénarios du point de vue de chaque acteur concerné par l'opération d'aménagement. Le décideur dispose ainsi de tous les avis nécessaires pour agir de la façon la plus éclairée possible. L'intégration de la méthode INTEGRAAL, qui compte cinq phases, a été l'un des axes structurants du projet D^2Sou :

- identification du problème et type d'informations à collecter en fonction de la localisation du projet et de son environnement ;
- structuration de la problématique avec les acteurs impliqués. Ceci a donné lieu à la rédaction d'une *check-list* des bonnes questions à poser sur le sol et le sous-sol, en interaction avec les services techniques et les politiques, afin de constituer une base de données présentant les moyens d'investigation. Ces données possèdent une forte valeur en phase de commercialisation ;
- identification et mobilisation des acteurs aptes à représenter les enjeux du projet. Il s'agit d'utiliser les informations parfois très techniques et de les rendre utilisables au travers d'un « kiosque aux indicateurs » utilisable par tout responsable d'un aménagement soucieux du développement durable ;
- évaluation des enjeux ;
- communication, dissémination des résultats et délibération.

Les moyens d'investigation sont de plusieurs natures. Des informations sont souvent déjà disponibles, notamment grâce aux bases de données du BRGM, aux inventaires historiques urbains, aux services techniques des communes, aux services géologiques et archéologiques régionaux, etc. Il est aussi possible de faire appel à des experts. Les bases de données constituées donnent lieu à des fiches de savoir reliées à la *check-list* ci-dessus et qui permettent aux acteurs de savoir où trouver l'information et comment mutualiser les moyens afin de maîtriser les coûts. Cette démarche permet notamment d'aboutir à la réalisation de cartographies de chaque parcelle des projets. Le laboratoire IMM travaille sur la méthode à employer pour intégrer les informations géotechniques et géophysiques.

À Pessac, le projet est en cours d'aménagement sur quatre parcelles. Une reconnaissance sismique, puis des mesures de résistivité des sols, ont été effectuées. Au-delà de ces aspects techniques, le positionnement des acteurs impliqués au travers des interviews et de la concertation préalable a été étudié et l'évaluation met en jeu des indicateurs élaborés à partir de ces dernières. Elle donne lieu à jugements de valeurs « Bon », « Indifférent » ou « Mauvais », accompagnés de commentaires qualitatifs. Ils permettent de mettre les indicateurs en débat. La *check-list* complète devrait être élaborée fin 2012. Une fiche de savoir correspond aux questions de la *check-list* et une seconde correspondant aux moyens d'investigation disponibles.

Fin 2012, un retour d'expérience sur les outils sera publié. Un atelier de restitution aura lieu début 2013. Les modules de formations seront alors rendus publics et téléchargeables sur le site Internet.

En savoir plus : www.d^{2}sou.com

Prise en compte de la biodiversité du sol dans les opérations d'aménagement

Le bureau d'études Sol-Paysage considère que les ressources du sol doivent être protégées et développées, y compris en ville et dans le contexte de projets d'infrastructures. Il met donc en œuvre des techniques de diagnostic environnemental des sols, de conception urbaine locale, ainsi que des solutions concrètes pouvant transformer des sols stériles en sols vivants, tout en participant au renforcement de la connaissance opérationnelle. Les contraintes liées aux sols sont abordées en fonction des risques qu'elles représentent pour les aménageurs. Sol-Paysage caractérise les fonctions agropédologiques à travers cinq axes : l'eau, la pollution, la fertilité, l'énergie et, désormais, la biodiversité. Une expérience d'évaluation de la biodiversité a récemment été menée pour le compte de l'AEV d'Île-de-France sur deux parcelles agricoles et a permis de caractériser leurs différences à travers quatre indicateurs pour lesquels les référentiels doivent être construits : biomasse microbienne, nématodes, collemboles, vers de terre. Sol-Paysage coordonne aussi le projet Union-Biodiv dans un cadre pluridisciplinaire afin de déterminer les objectifs et les méthodes à adopter pour développer la biodiversité – notamment du sol – du projet d'écoquartier de l'Union en périphérie Lilloise.

Xavier MARIÉ
Thomas BUR Sol-Paysage

Voir leur présentation*

Bureau d'études en ingénierie environnementale du sol et du paysage, Sol-Paysage part du constat que les sols vivants assurent des services environnementaux, y compris aux sociétés humaines, ce qui est trop souvent négligé. Ils représentent de forts enjeux dans les territoires et il faut donc préserver et valoriser cette ressource limitée, notamment dans les contextes urbains et périurbains et/ou les projets d'infrastructure.

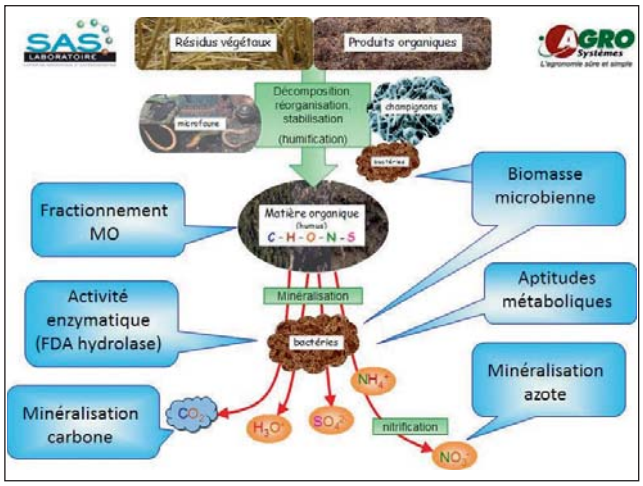
Sol-Paysage participe au développement durable de la ville et du territoire en appliquant un référentiel simple de la qualité environnementale des sols. Il s'agit d'ajuster des programmes de conception urbaine à l'échelle locale et d'apporter des solutions concrètes au cours des processus d'aménagement qui transforment la ville et ses sols, et qui peuvent apporter la vie à des sols rendus stériles par des occupations antérieures. Sol-Paysage participe aussi au développement de la connaissance opérationnelle. L'innovation est fondamentale pour l'entreprise, qui s'attache désormais à prendre en compte la biodiversité dans les sols et à l'évaluer sur des bases objectives.

Le sol est pris en compte, non du point de vue scientifique, mais du point de vue de l'aménageur. C'est pourquoi il est abordé du point de vue des risques de faisabilité technique, mais aussi des risques liés au fait que les sols ont, en milieu urbain, souvent été fortement anthropisés depuis des décennies, voire des siècles. Il en découle un risque sanitaire du fait de l'accumulation des éléments polluants. Il faut aussi prendre en compte la valeur et les risques patrimoniaux, notamment archéologiques, et réaliser les études d'impacts et inventaires liés à la réglementation environnementale.

Sol-Paysage aborde les sols au travers de leur valeur intrinsèque liée aux services qu'ils rendent, et caractérise leurs fonctions agropédologiques. L'impact concret du projet est valorisé du point de vue écologique en tenant compte des contraintes techniques et économiques. Cinq grands axes sont pris en compte :
- l'eau (rétention, filtration, imperméabilisation) ;
- la pollution, afin de restituer des sols indemnes ou, au moins, ne présentant pas de risque pour les usagers et pour la chaîne écologique ;
- la fertilité, qui est à garantir pour les usages agricoles et les espaces verts ;
- l'énergie, du fait que les sols sont évapotranspirants et qu'ils participent au cycle du carbone ;
- la biodiversité, qui appelle des méthodes nouvelles de caractérisation.

Au quotidien, Sol-Paysage est en contact avec des sols préservés, mais aussi à des sols perturbés. Des cartographies sont produites, afin d'identifier les différents matériaux

* http://www.natureparif.fr/attachments/forumdesacteurs/Rencontres/Sols/7_XMARIE_19062012.pdf



Les indicateurs microbiologiques étudiés sont reliés au cycle de la matière organique.

Horizon OH épais. Photo réalisée sur une des placettes expérimentales des forêts dans le PNR Normandie-Maine.

constitutifs des sols, pour engager des systèmes de tri et de valorisation et définir les bonnes solutions à partir des ressources caractérisées. Les travaux sont réalisés avec des engins de terrassement, en travaillant proprement, afin de transformer des sols parfois peu fertiles en sols fertiles, en allant jusqu'à reconstituer des sols urbains parfois très favorables à la biodiversité et approchant le niveau de fonctionnalité des sols naturels.

Dans le cas d'un chantier situé en contexte agricole et mené pour le compte de l'Agence des espaces verts d'Île-de-France, il s'agissait de caractériser la qualité des deux parcelles exploitées par deux agriculteurs différents, en évaluant, au-delà de la fertilité et de valeur foncière, la qualité biologique des sols. Ce premier test devrait être prolongé par un suivi plus régulier des sols agricoles, bien qu'il n'existe aucun référentiel permettant de comparer les valeurs mesurées. Sol-Paysage a choisi de sélectionner quatre indicateurs qui semblaient représenter au mieux la diversité de la pédofaune. Une placette de 20 m x 20 m a fait l'objet de prélèvements à la tarière et en surface, qui ont permis de constituer des échantillons moyens analysés en laboratoire.

- La biomasse microbienne a été mesurée par SAS-Laboratoire au travers du carbone microbien. Les deux parcelles sont assez différentes sous cet aspect, bien que la biomasse microbienne ne soit pas strictement proportionnelle à la matière organique.
- Le nombre de nématodes a été mesuré par le laboratoire Elisol Environnement. Les relevés des différents groupes trophiques montrent de fortes différences selon les parcelles. Les phytoparasites et phytophages sont très abondants sur la première parcelle et sont peu représentés sur la seconde, la densité globale y étant aussi beaucoup plus faible.
- Les collemboles ont été analysés à partir du même échantillon que celui des nématodes. Les deux parcelles sont, là encore, très distinctes.
- Le protocole normé mis en place par l'université de Rennes a été utilisé pour dénombrer les vers de terre, à ceci près que l'utilisation de formol qu'il prévoit a été remplacée par celle de moutarde. Cet irritant stimule en effet les vers de terre et les fait remonter. Les individus remontant à la surface sont prélevés, et complétés par ceux découverts lors du grattage de la surface et de l'excavation d'un petit volume de terre, qui permettent d'évaluer le nombre de vers de terre par mètre carré. Les anéciques, endogés (2 à 10 cm de profondeur) et épigés (surface) ont été relevés et il apparaît que la diversité et l'abondance est plus importante dans une des deux parcelles.

Toutes ces valeurs peuvent être suivies dans le temps.

Dans le contexte du projet d'aménagement urbain de l'éco-quartier de l'Union, situé au nord de Lille et couvrant environ

L'observation terrain est un outil indispensable pour comprendre le contexte de l'analyse de terre.

Le carbone organique total se dose par colorimétrie : l'intensité de la coloration renseigne sur la teneur en carbone organique.

Le sol est un milieu vivant : un gramme de sol contient plus d'un milliard de micro-organismes.

80 hectares, Sol-Paysage coordonne le projet Union-Biodiv, qui vise à évaluer la biodiversité au travers d'une méthode pluridisciplinaire mettant en jeu des approches écologiques et sociologiques, ce qui est indispensable pour tenir compte des usages récréatifs et éducatifs et des critères retenus par la population. La friche urbaine actuelle recouvre d'anciennes activités industrielles textiles et de traitement du charbon, parfois très polluantes, et doit évoluer vers le projet du paysagiste.

Les deux évaluations écologiques et sociologiques sont portées par deux thèses encadrées au sein du consortium, afin de savoir si le projet a une influence positive ou négative sur le site et d'évaluer des fonctions telles que la cinétique des populations et les fonctions sociales, pour formuler des préconisations pour les prochaines opérations de ce type. Le site comprend un corridor écologique constitué par la haie d'une voie ferrée, et le projet vise à savoir si cette dernière conduit les échanges de la pédofaune. Sol-Paysage construit des placettes de sols reconstitués sur le site et vérifie si les organismes présents dans le corridor migrent vers celles-ci. L'évaluation sociologique de la biodiversité est réalisée par le laboratoire LGCgE et l'association Entrelianes, qui organisent des visites participatives en mobilisant des volontaires pour réaliser une évaluation profane avant et après aménagement.

Sol-Paysage est actuellement dans une phase d'exploration de ces nouveaux indicateurs du sol au-delà des classiques analyses agronomiques. Les analyses permettent de donner du sens à la vie des organismes du sol pour les gestionnaires et demain, sans doute, par les aménageurs dans le cadre de l'évaluation des résultats et des objectifs fixés par les politiques.

En savoir plus : www.solpaysage.fr

Milieux ruraux et agricoles

Présentation de l'Atlas pédologique de Seine-et-Marne et de ses usages

Afin de pouvoir apporter de meilleurs conseils agronomiques, mais aussi en gestion de l'eau et en biodiversité, la Chambre d'Agriculture de Seine-et-Marne a commencé à établir l'Atlas géologique de la Seine-et-Marne au 1/50 000e sur la base du découpage en coupons du BRGM. Environ la moitié du département est à présent couverte sur la base méthodologique mise en œuvre par l'INRA dans le cadre du projet CPF. Des sondages à la tarière manuelle et par fosse sont réalisés avec l'accord des agriculteurs. Les résultats sont intégrés à la cartographie classique et au SIG, les cartes étant accompagnées de notices portant sur chaque fosse. Les résultats sont extrapolés à partir des données surfaciques. Ils sont mis en relation avec la caractérisation des sols et de leur comportement, la carte permettant de calculer des rendements potentiels, de caractériser, entre autres, l'hydromorphie et les réserves utiles.

Lolita GILLES Chambre d'Agriculture de Seine-et-Marne
Voir sa présentation*

L'Atlas pédologique de la Seine-et-Marne a d'abord été dressé au 1/50 000e pour disposer d'une visibilité globale du territoire sur la base du découpage du BRGM dont les coupons ont été adaptés en certains lieux pour intégrer certains des petits périmètres adjacents. Il s'agissait de disposer de données scientifiques sur les sols pour apporter de meilleurs conseils et une meilleure politique en matière agronomique et d'aménagement, mais aussi de gestion de la qualité de l'eau, de biodiversité (jachères fleuries, plantation de haies, zones humides) ou d'irrigation.

Dans cette optique, la Chambre d'Agriculture de Seine-et-Marne s'est engagée en 2006 dans la réalisation de l'Atlas pédologique de Seine-et-Marne et de ses usages, en partenariat avec le Conseil général, le Conseil régional d'Île-de-France et l'agence de l'Eau Seine-Normandie. Jusqu'alors, seul le référentiel régional pédologique de l'Île-de-France, au 1/250 000e, était disponible. L'ensemble du territoire doit être couvert fin 2015. En juin 2012, environ 50 % du territoire était cartographié au 1/50 000e : il s'agit des coupons de Nangy, Melun, Brie-Comte-Robert, Étampe (rattaché à Melun), Rosay-en-Brie, Fontainebleau-Malesherbes, celui de Château-Landon étant en cours d'achèvement.

L'INRA intervient scientifiquement dans le cadre du projet Connaissance pédologique de la France (CPF), qui dresse des cartes au 1/50 000e et 1/100 000e au niveau national. Les données sont intégrées à la base DoneSol de l'INRA. Le guide méthodologique du projet s'appuie sur la méthodologie de l'INRA et en détaille toutes les étapes concrètes et techniques, la méthode étant améliorée au fil du recensement des coupons.

La réalisation, sur un coupon, prend une année. Les agriculteurs du territoire sont d'abord invités à une réunion d'information. Une cartographie géomorphologique est ensuite dressée pour décider de la localisation de sondages effectués par tranche de 25 hectares en moyenne en plaine. Ceux-ci sont réalisés à la tarière manuelle et par creusement de fosses. Les sondages de l'IFN sont utilisés dans les parcelles forestières afin de compléter la carte. En tenant compte des souhaits des agriculteurs, une fosse est en moyenne creusée par tranche de 600 hectares. D'une surface de 2 m x 2,5 m, leur profondeur varie selon la géologie. Après analyse des horizons décrits, les résultats sont saisis dans la base de données.

Après établissement de la cartographie manuelle, les résultats sont intégrés au SIG. De la même façon que les cartes géologiques, la carte est accompagnée des notices écrites portant sur chaque fosse et comportant des photographies, l'observation des racines, la texture, la couleur et les résultats des analyses. Les données sont ensuite extrapolées à l'échelle du polygone à partir des données surfaciques, ce qui permet de reconstituer une vue en 3D des types de sols. Les résultats des sondages et la carte de leurs parcelles sont restitués aux agriculteurs qui en font la demande.

Les données pédologiques ont été mises en relation avec la caractérisation des sols agronomiques et de leur comporte-

* http://www.natureparif.fr/attachments/forumdesacteurs/Rencontres/Sols/8_LGILLES_19062012.pdf

ment par la Chambre d'Agriculture. Une fonction Pédotransfert a été créée pour calculer la résistivité des sols. La biodiversité est approchée à travers la présence de haies. Une action est en cours pour que les PLU intègrent les caractéristiques des sols.

Sur les coupons traités et cartographiés, le travail effectué permet par exemple de calculer les potentiels de rendement de l'orge de printemps, mais aussi d'indiquer leur hydromorphie et les réserves utiles. Les zones de plateau sont sur ce dernier point plus riches que les bords de cours d'eau. Les cartes permettent d'identifier le type de sols qui sont le plus favorables à l'implantation d'espèces intégrables dans les haies (cassis et framboisiers, par exemple).

En savoir plus : www.ile-de-france.chambagri.fr

Droit de préemption et protection des sols agricoles

Stéphanie LUX
Natureparif
« En Île-de-France, les pouvoirs publics se préoccupent de l'urbanisation et de l'étalement urbain depuis de longues années, puisque la création de l'AEV date de 1976. Cet outil permet à la Région d'acquérir des terres pour maintenir leurs usages forestiers ou agricoles. Malgré cet investissement, le maintien des terres agricoles n'est pas facile. Les contestations peuvent venir de l'État, mais aussi des agriculteurs, qui peuvent être tentés de vendre. Quels outils faut-il déployer face à ces pressions ? »

François HUART
AEV d'Île-de-France
« Acquérir n'est pas un but en soi, mais un moyen pour pérenniser la destination des terres. L'AEV a acheté en tout 13 000 hectares à dominante forestière depuis 1976. L'approche était au départ quantitative dans le cadre d'un régime réglementaire faible soumis à une urbanisation forte, et est à présent de plus en plus qualitative, s'appuyant notamment sur la qualité des sols. Cette démarche a été entreprise car le Code rural se borne à indiquer que l'exploitant doit gérer ses terres "en bon père de famille", ce qui est une notion sans teneur précise. L'expérience montre qu'il s'agit surtout d'éviter le développement des ligneux et de maintenir la mise en culture. Rien n'est précisé du point de vue agronomique, à tel point que l'exploitation conventionnelle, très peu soucieuse des qualités du sol, respecte la prescription du Code. L'AEV s'est préoccupée, lorsqu'elle reprend des beaux ruraux, d'établir un état des lieux, d'effectuer un suivi de l'évolution, le locataire de longue durée devant pouvoir bénéficier d'une indemnité de départ s'il a amélioré la qualité du sol, puisqu'il a valorisé le foncier qu'il a exploité. Il faut apporter une sanction positive. »

Bruno JULIEN
Agence d'urbanisme de la région nantaise et réseau Terres en Villes
« Les premiers PEAN commencent à être mis en place et ne possèdent pas de durée limitée dans le temps. C'est le cas à Saint-Chamond, où le SCOT n'était pas très virulent sur la question agricole. Un droit de préemption par le Conseil général est alors créé, mais le principal mérite est de pérenniser des espaces agricoles par ces mesures. »

Prise en compte de la biodiversité du sol pour la fertilisation

SAS Laboratoire est spécialisé dans l'analyse de la fertilité des sols et commence à intégrer des indicateurs biologiques à ses tests aux côtés des classiques indicateurs physico-chimiques. Alors qu'il était uniquement possible, jusqu'en 2000 environ, de mesurer la teneur en éléments organiques et le rapport C/N, l'intérêt des agriculteurs pour les données biologiques augmente, même si leurs demandes restent souvent peu précises. La plupart des indicateurs biologiques utilisés ne peuvent être interprétés indépendamment en l'absence de référentiels stabilisés et du fait de l'importance de facteurs conjoints (types de sols, climat, systèmes de culture). Les indicateurs retenus mesurent l'abondance et l'activité des micro-organismes du sol, le type de matières organiques, le fractionnement des types de matières organiques et les produits de dégradation de ces dernières. Il est envisageable à terme d'intégrer des tests de génomique microbienne. Si certains de ces indicateurs transmettent des données incontestables sur la vie du sol, ils doivent toujours être intégrés dans une batterie plus large dans le cadre du conseil en fertilisation et ne peuvent se substituer aux analyses classiques et aux observations de terrains, qu'ils complètent. Ils encouragent cependant fortement le dialogue sur les pratiques culturales

Matthieu VALÉ SAS Laboratoire

Voir sa présentation*

SAS Laboratoire est spécialisé dans l'analyse de la fertilité des sols. Il s'agit de les caractériser en termes physico-chimiques afin d'apporter des conseils en fertilisation, mais aussi pour les plans d'épandage de boues de stations d'épuration, ce qui implique des analyses organiques et d'innocuité des boues et composts. Des analyses de végétaux et d'eau sont aussi conduites.

La fertilité des sols est envisagée sous la notion d'aptitude culturale, puisque l'objectif est d'atteindre les rendements escomptés. Pour cela, l'observation de terrain permet d'évaluer les caractéristiques physiques de la structure des sols, le cœur de métier de SAS Laboratoire consistant à analyser la texture, le pH et les éléments minéraux, qui permettent d'évaluer la capacité nutritive.

En termes de qualité biologique, il était uniquement possible jusqu'en 2000 environ de mesurer la teneur totale en éléments organiques (carbone et azote) et le rapport C/N. SAS Laboratoire a donc commencé à travailler sur la vulgarisation d'autres analyses, portant sur la productivité, l'état sanitaire et les externalités environnementales, qui intéressent de plus en plus les agriculteurs en raison de la réglementation sur les rejets dans l'eau et dans l'air. La connaissance des données biologiques est aussi nécessaire pour évaluer la résilience des sols.

Le programme Bio-Indicateurs de l'ADEME a débouché sur l'identification de nombreux indicateurs de la vie de la microfaune des sols. Ils doivent cependant être interprétés et les référentiels permettant de faire le lien entre ces données et la fertilité des sols n'existent pas encore, contrairement aux éléments physico-chimiques tels que le pH. En effet, la réponse des paramètres biologiques intègre l'effet de nombreux facteurs et il n'est, par exemple, pas possible d'établir un rapport direct entre la biomasse microbienne du sol et le rendement de la culture implantée sur ce sol. Il faut donc construire des référentiels d'interprétation en lien avec d'autres éléments (types de sols, climat, systèmes de culture) pour pouvoir interpréter les analyses.

Les analyses biologiques sont utilisées différemment selon le type d'acteurs. Les organismes de recherches les utilisent pour paramétrer des modèles prenant en compte différents compartiments de la vie des sols. Après entretien avec une centaine d'agriculteurs ayant commandé des analyses biologiques, il est apparu que les attentes des agriculteurs vis-à-vis de ces indicateurs de la qualité microbiologique des sols étaient assez vagues, l'objectif le plus souvent mentionné étant « faire le point sur la biologie du sol ». La seconde cause mentionnée consistait à rechercher les causes d'un problème de production. Le troisième motif visait à vérifier l'effet de l'usage de produits de tous types sur la biologie du sol.

Face à ces demandes, les indicateurs sont plus ou moins opérationnels. Les indicateurs de recherches doivent uniquement être sensibles aux phénomènes étudiés. Les indicateurs dits de diagnostic, en revanche, doivent permettre de détecter les problèmes et de proposer des solutions

* http://www.natureparif.fr/attachments/forumdesacteurs/Rencontres/Sols/9_MVALE_19062012.pdf

pratiques, ce qui nécessite de disposer d'expérimentations et de références nombreuses.

SAS Laboratoire a retenu plusieurs indicateurs liés à la transformation des matières organiques et à l'activité microbiologique dans les sols. Les mesures effectuées portent sur ce dernier point, en privilégiant les tests disposant d'une méthode reconnue et standardisée (méthode normalisée par exemple). Des tests comme le comptage de vers de terre ou collemboles n'ont pas été retenus, car ces tests de terrains ne peuvent pas être réalisés sur des prélèvements de sol classiques, comme cela est le cas pour les indicateurs microbiologiques.

Afin de savoir si les critères biologiques varient selon les pratiques culturales, ARVALIS Institut du Végétal a mis en place des essais de longue période permettant d'évaluer à travers différents paramètres l'impact de certaines pratiques telles que l'apport de produits résiduels organiques sur des sites différents (absence d'apport de compost, apport annuel, bisannuel). Des mesures de longue durée ont aussi été effectuées sur des essais de cultures intermédiaires pièges à nitrates (CIPAN) et, depuis 40 ans, sur des modalités de travail du sol (labour, travail simplifié, autres pratiques). Quelques essais ont été menés sur dix ans en agriculture biologique, et sur des niveaux d'intensification variés (usage optimum, pression d'intrants divisée par deux, suppression des intrants). Ces protocoles permettent de commencer à construire des référentiels.

Les indicateurs retenus caractérisent l'abondance de micro-organismes du sol, le type de matière organique, le fractionnement des catégories de matières organiques, les produits de dégradation des micro-organismes. Leur activité est évaluée par le biais de la dégradation de la matière organique (activité enzymatique), selon une approche fonctionnelle. Les analyses sont effectuées par SAS Laboratoire et par le laboratoire SEMSE.

L'analyse de la biomasse microbienne est normalisée et évalue la quantité de carbone microbien en pourcentage de la matière organique globale. Cet indicateur varie selon le type de sol, le climat et l'apport récent de matière organique. Il faut donc connaître ces variables pour interpréter le résultat et prodiguer des conseils. Cette variable influe positivement la stabilité des agrégats de sols. L'indicateur est adapté à la recherche et au suivi d'expérimentations, mais ne permet pas de délivrer une interprétation immédiate pour cause de référentiels insuffisants.

La caractérisation de la matière organique distingue des compartiments possédant des fonctions différentes dans la vie du sol. Les essais montrent que la fraction active est plus importante dans les terres ayant reçues des apports de produits organiques que dans celles ayant fait l'objet de fertilisation minérale, et que cet effet perdure.

L'activité microbienne caractérisée notamment par la mesure de la dégradation du carbone et de l'azote est intéressante pour la recherche et pour l'expérimentation, car cette dégradation est essentiellement le fait des micro-organismes. L'indicateur peut être utilisé directement dans le cadre de conseils sur la fertilisation azotée, car elle permet de préciser la fourniture d'azote minéral par le sol.

Un indicateur en cours de développement permet de tester les fonctions de dégradation assurées par les micro-organismes. Le test des aptitudes métaboliques utilise une plaque comptant 96 puits contenant des substrats différents (carbonés, azotés, phosphatés, etc.) qui sont ensemencés avec la suspension de sol. Les réactions colorées manifestent la présence de l'enzyme spécifique à la dégradation des substrats présents dans les puits. Cet indicateur différencie bien les pratiques culturales. L'indicateur est très démonstratif pour évaluer la vie du sol, même s'il ne permet pas de déboucher sur des conseils.

Les indicateurs portant sur les vers de terre permettent de démontrer l'impact positif de l'apport de compost ou d'autres pratiques. Les tests de génomique microbienne (quantification d'ADN microbien) sont en cours de stabilisation, même si d'importants travaux restent à mener pour démontrer le lien entre les diversités génétiques et fonctionnelles.

L'évaluation des différentes fonctions du sol s'appuie en pratique sur une batterie d'indicateurs. Ces nouveaux outils peuvent contribuer à raisonner la fertilisation sans, pour le moment, révolutionner les pratiques, car il faut apprécier les aptitudes culturales des sols dans leur ensemble, les analyses classiques et les observations de terrain constituant toujours les éléments fondamentaux sur lesquels s'appuie le conseil. Il faut dans tous les cas choisir les indicateurs en fonction des questions posées.

Ces indicateurs ne peuvent à eux seuls orienter un conseil, mais ils participent au dialogue sur le choix des pratiques culturales (rotation, introduction de couverts variés, etc.), notamment compte tenu d'un temps de retour plus rapide que celui des indicateurs physico-chimiques, et peuvent participer à l'élaboration de choix plus pertinent pour l'agriculteur et pour la biodiversité.

Enfin, contrairement à certaines informations alarmistes, les sols d'Île-de-France ne sont pas morts. Néanmoins, certaines pratiques culturales favorisent certaines communautés microbiennes. Il faut donc agir sur ces pratiques pour apporter de la matière organique de façon adaptée afin de favoriser la fertilité agricole au travers de l'activité microbienne. Les types de travail du sol sont aussi déterminants pour cette activité qui pâtit du tassement. Ces aspects doivent être saisis de façon conjointe. Les pratiques actuelles, en France, ne provoquent pas de dégradation massive de la fertilité au niveau de l'exploitation et il n'y a pas lieu de céder au catastrophisme. Elles ont en revanche d'autres impacts environnementaux du fait de la circulation des flux et des matières dans les écosystèmes. Les systèmes céréaliers sont parvenus à un niveau stable, car assez bas, en matières organiques. La réglementation favorisant le couvert devrait néanmoins apporter une amélioration.

En savoir plus : www.saslaboratoire.com

Gestion et conservation de l'état organique des sols

L'association régionale Agro-Transfert Ressources et Territoires (RT) a été créée en Picardie afin de transférer sur le terrain les résultats de la recherche agronomique permettant de proposer des solutions aux problèmes concrets rencontrés par les agriculteurs. La fertilité d'un sol est définie en fonction de la production attendue et des facteurs de production que sont les caractéristiques physiques, chimiques et biologiques intrinsèques de ce sol et les pratiques culturales qui lui sont appliquées. Les pratiques adoptées depuis l'après-guerre recourent très largement aux intrants chimiques. Il faut à présent en limiter l'usage en renforçant le rôle essentiel des qualités du sol. L'état organique des sols a une place centrale à cet égard. Or, les impacts à long terme des pratiques culturales sur cet état sont difficiles à prédire. Un des projets d'Agro-Transfert RT vise à lutter contre les risques de baisse des taux de matières organiques des sols cultivés en Picardie, en apportant des connaissances et des outils d'aide à la décision aux agriculteurs et aux conseillers agricoles. Un outil de simulation de l'effet des pratiques culturales sur l'état organique du sol à long terme a été mis au point à partir du modèle AMG développé par l'INRA de Laon. Ce modèle simple permet de réaliser les simulations à partir de données disponibles sur l'exploitation. L'outil fournit en sortie les comparaisons des courbes d'évolution des teneurs et des stocks de carbone organique correspondant aux différentes hypothèses de gestion testées.

Annie DUPARQUE Agro-Transfert Ressources et Territoires

Voir sa présentation*

Crée à l'initiative de Jean Boiffin, alors directeur de l'INRA de Laon, des Chambres d'Agriculture et du Conseil régional, Agro-Transfert RT est une association régionale née en 1990 en Picardie. Cette plateforme de conduite de projets de Recherche et Développement vise à faire le lien entre le travail des chercheurs en agronomie et celui des conseillers agricoles des chambres d'Agriculture et d'autres acteurs de terrain, notamment pour traiter des problématiques environnementales typiques de la région Picardie et qui n'étaient pas à l'origine traitées par les Instituts techniques agricoles.

Les projets de transfert conduits par l'association sont toujours montés en réponse à des demandes issues de la profession agricole locale (agriculteurs et/ou élus agricoles). Ils ont d'une durée de 5 à 7 ans et sont construits à partir d'une étude de faisabilité instruite à partir des besoins exprimés. Les réponses éventuellement disponibles à partir des connaissances issues de la recherche sont alors élaborées dans la perspective du développement d'outils d'aide à la décision, de référentiels et de supports en formation. Le lancement des projets est décidé par le Conseil d'administration de l'association, qui comprend trois collèges : recherche-formation-transfert ; acteurs économiques ; personnalités qualifiées de la société civile.

Les projets sont classés en trois grands pôles. Le premier, « Gérer et préserver les ressources naturelles », pilote trois projets portant sur la gestion de l'état organique des sols, sur la fertilité physique et biologique des sols, et sur la biodiversité en systèmes de grande culture. Le deuxième, « Systèmes de culture innovants » travaille sur l'intensification agronomique visant à limiter les intrants de tous types, notamment dans le cadre du plan Ecophyto 2018. Le troisième, « Voies alternatives de valorisation des productions agricoles », travaille en particulier en lien avec le pôle de compétitivité Industrie et Agro-Ressources, qui s'intéresse à la production d'énergies renouvelables à partir de ressources agricoles. Un centre de compétences valorise et suit les outils lancés dans le cadre des projets de transfert et développe des outils et méthodes spécifiques de diagnostic environnementaux (diagnostic agro-environnemental et analyse de cycle de vie).

La fertilité des sols est une notion agronomique qui ne se limite pas à la qualité des sols (caractéristiques physiques, chimiques et biologiques), mais qui intègre aussi la prise en compte des moyens mis en œuvre pour atteindre le niveau et la qualité de la production attendus.

La composante physique de la fertilité d'un sol agricole peut être évaluée, notamment, au travers de sa stabilité structurale (aptitude du sol à résister à une modification de sa structure physique). De cette aptitude, dépend en particulier la capacité du sol à résister à la battance (formation d'une croûte de surface sous l'effet de la pluie), qui peut être responsable de problèmes de levée des cultures et de phénomènes de ruissellement et d'érosion. La couverture des sols, l'enrichissement en matières organiques, la réduction du travail du sol et l'adaptation de la profondeur des

* http://www.natureparif.fr/attachments/forumdesacteurs/Rencontres/Sols/10_ADUPARQUE_19062012.pdf

labours sont des moyens pour lutter efficacement contre ces risques. La lutte contre le tassement est également un enjeu important de préservation de la fertilité physique des sols cultivés. L'augmentation des risques est liée notamment à l'augmentation du poids des machines. Des facteurs biologiques (lombrics, effets des racines) permettent de restructurer les sols lorsqu'ils ne sont plus travaillés. Mais leurs actions sont lentes. La prévention des risques de tassement est donc particulièrement importante dans les systèmes de culture sans labour.

La fertilité chimique des sols se mesure à sa richesse en éléments minéraux. Elle est alimentée par l'apport d'engrais minéraux mais également par celui de produits organiques qui libèrent des minéraux sous l'action des micro-organismes. La fertilité chimique d'un sol est aussi entretenue par l'apport d'amendements basiques (produits calci-magnésiens) qui permettent d'ajuster l'état acido-basique du sol aux exigences des cultures.

Depuis l'après-guerre, l'amélioration de la fertilité des sols agricoles a été obtenue essentiellement par un recours croissant aux intrants (chimiques en particulier), en négligeant la ressource que représente leur fertilité intrinsèque. Compte tenu des forts impacts environnementaux, la tendance actuelle est à un recours à l'agronomie afin de limiter les apports d'intrants. Les matières organiques sont au cœur de la fertilité des sols. La gestion de l'état organique des sols doit tenir compte de leur nature complexe et compartimentée. Or, le taux d'humus mesuré par les analyses de terre ne reflète pas la partie vivante de la matière organique du sol (5 à 10 % du total des matières organiques).

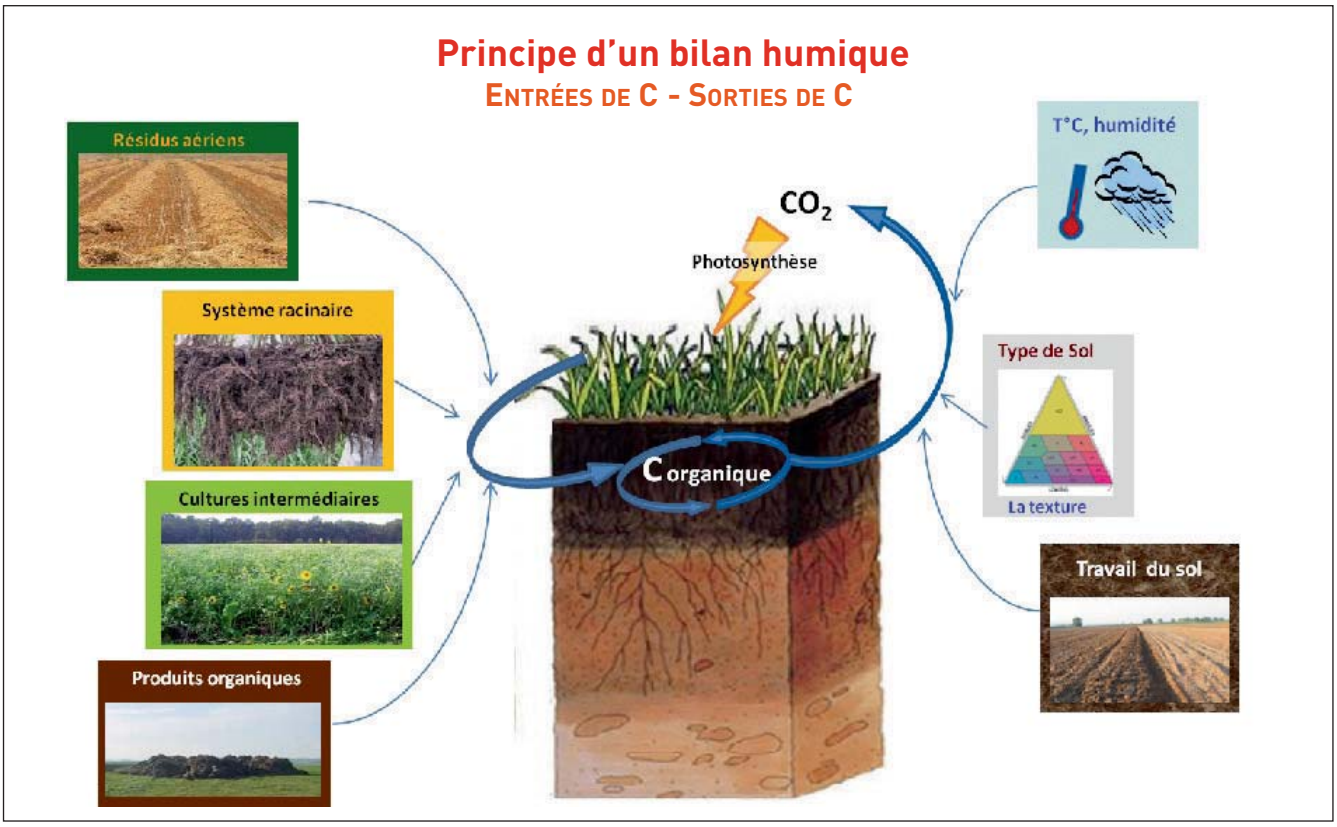
Cette matière organique contient du carbone ainsi que de nombreux éléments minéraux à partir desquels se nourrissent en partie les plantes. Les matières organiques jouent un rôle dans les qualités physico-chimiques et biologiques des sols. Elles interviennent aussi indirectement, par leur rôle de tampon, dans les mécanismes qui conditionnent la qualité des eaux. Elles sont également au cœur de la question du stockage du CO_2 par les sols.

Diagnostic de fertilité d'un sol par un conseiller agricole avec l'agriculteur dans le cadre d'un programme Agro-Tranfert RT.

Tas de compost. Des produits organiques de différentes origines permettent d'entretenir l'état organique des sols agricoles.

En 2004, à la demande des Chambres d'Agriculture inquiètes de l'impact de la faiblesse et de la baisse du taux de matière organique des sols sur la fertilité, un projet a été lancé par Agro-Transfert RT avec l'INRA Agro-Impact de Laon-Mons, le Laboratoire d'Analyses et de Recherche de l'Aisne, l'enseignement supérieur agricole (Institut Lasalle Beauvais), la Fédération Régionale des Coopératives Agricoles, ainsi qu'avec des experts fonciers. Des études préalables ont montré la vulnérabilité d'un certain nombre de sols cultivés de façon intensive et/ou fragiles et pauvres en argiles.

Les intérêts des parties prenantes ont été intégrés pour analyser la situation. Les agriculteurs sont les acteurs qui gèrent directement l'état organique des sols cultivés. Ils ont pour objectif d'assurer un niveau et une qualité optimale de leurs productions tout en maintenant la matière organique du sol et la valeur de leurs terres. Les intérêts des acteurs de la société civile (associations, ministères, Union européenne, etc.) au maintien du patrimoine commun que sont les sols ont aussi été formulés, tout comme ceux du secteur marchand. La société civile est préoccupée par la lutte contre les risques environnementaux. Il faut en particulier tenir compte des usages énergétiques d'une partie de la biomasse qui ne sera pas enfouie sous la forme de résidus de culture. Les problématiques de gestion des déchets urbains doivent aussi être intégrées (la Picardie a été durant des années un lieu privilégié d'épandage des boues de la station d'épuration d'Achères) alors que les chartes des industriels de l'agro-alimentaire interdisent leur usage pour les productions de légumes de plein champ. Le secteur marchand favorise le développement de filières de valorisation industrielle de la biomasse agricole et apporte aux agriculteurs des services variés mettant en jeu la gestion des matières organiques des sols, dont la qualité et l'opportunité sont parfois discutables.



Le bilan humique établit le solde des entrées et sorties de carbone organique du sol. Dans la plupart des situations, une bonne gestion doit au moins permettre de préserver l'équilibre du bilan à long terme.

Un seuil minimal de matières organiques ?

Michel VAMPOUILLE – Ancien vice-président à l'Environnement de la Région Île-de-France

« Les sols céréaliers ne perdent plus de carbone, car ils ont atteint un niveau très bas. Comment faire à présent pour agir alors que la demande de biomasse agricole et forestière va augmenter pour les usages industriels, énergétiques et pour apporter des agro-matériaux ? Il est préférable de restocker du carbone dans le sol que de procéder un stockage géologique du CO_2, qui n'apparaît pas sûr, ce d'autant plus que l'amélioration organique des sols concourra à la bonne gestion de la qualité de l'eau. »

Alain BRÊTHES – ONF

« Il semble que le seuil minimal en matière organique d'un sol puisse être déterminé par le niveau en dessous duquel sa structure est déstabilisée, soit une teneur de 2 % à 3 %. Or, de nombreux sols limoneux de la Beauce ou du Vexin contiennent moins de 1 % de matière organique. »

Annie DUPARQUE – Agro-Transfert RT

« Cette question s'est posée au cours d'un des projets d'Agro-Transfert et a été adressée aux chercheurs, car les agriculteurs ont demandé quel devait être l'objectif à viser. La littérature internationale ne permet pas de déterminer un tel niveau. Mais dans nos régions, proposer le critère de stabilité structurale et de résistance à la battance peut sembler pertinent. Dans ce cas, il faut tenir compte des possibilités économiques, et du fait que les sols dont le taux de matière organique est passé sous un seuil de 1,5 % ne se redressent que très lentement par apport de matières organiques. Lorsque cela est possible, la réduction de la profondeur du travail ou la suppression du labour sont favorables, car elles concentrent la matière apportée par les résidus en surface, ce qui est l'objectif recherché. Le développement de la couverture des sols par les engrais verts et des cultures intermédiaires sont aussi des moyens très adaptés. »

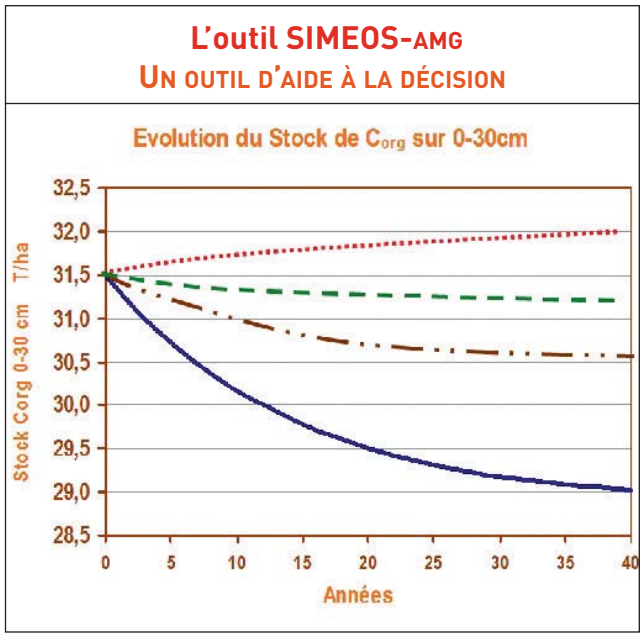
La question de l'apport de matières organiques dans les terres agricoles mobilise donc un vaste tissu d'acteurs dont le point de vue doit être intégré à la démarche de conseil.

Le projet vise à apporter des connaissances sur la matière organique aux agriculteurs et à leur fournir des outils d'aide à la décision. L'apport de connaissances est traduit sous forme de supports de formation et de sensibilisation (dont le mémento « Sols & matières organiques »), créés à l'attention des conseillers agricoles qui interviennent auprès des agriculteurs.

Les outils concernent, d'une part, l'établissement d'une procédure améliorée de prélèvement de terre pour diagnostiquer l'état organique du sol d'une parcelle et suivre son évolution au cours du temps, et d'autre part, la mise au point d'un outil informatisé de simulation, SIMEOS-AMG permettant d'évaluer l'impact des différentes pratiques de gestion sur l'évolution à long terme de l'état organique des sols cultivés.

L'outil SIMEOS-AMG intègre le modèle AMG développé par l'INRA de Laon, qui effectue des bilans humiques en calculant la différence entre les entrées de carbone (humification des résidus de cultures et des produits organiques) dans la partie active des matières organiques du sol, et les sorties de carbone liées à la minéralisation de ce compartiment des matières organiques du sol par les micro-organismes.

Les variations des stocks et des teneurs en carbone ou en matières organiques des sols en fonction des pratiques culturales ne sont sensibles que sur des périodes de plus de 10 ans. Afin de ne pas avoir à attendre les détériorations pour corriger les pratiques, l'outil SIMEOS-AMG permet d'établir des bilans sur dix ans, vingt ans ou plus et ainsi de comparer les effets de différents scénarios de pratiques de gestion, pour sélectionner le plus adapté aux caractéristiques et à la conduite technique et économique recherchée sur la parcelle. Le modèle AMG peut être alimenté par des informations disponibles sur l'exploitation (successions culturales, rendements des cultures, type de travail du sol, analyses de terre, données climatiques de base). L'agriculteur décrit son système de culture et apporte son analyse de terre, puis prend connaissance du résultat de la simulation. Les comparaisons de scénarios testés montrent par exemple que les systèmes intensifs conduisent à la baisse des stocks de matière organique et qu'il est possible d'agir et d'apporter des conseils individuels après avoir identifié les sources du déséquilibre du bilan humique et les marges de manœuvre mobilisables. L'outil SIMEOS-AMG a aussi été utilisé dans le cadre de projets industriels mobilisant les pailles afin de déterminer les niveaux d'exportation compatibles avec une gestion durable de l'état organique des sols. À cette fin, sur la base d'un travail de typologie des systèmes de production réalisé par le groupe de travail régional Sols et matières organiques des Chambres d'agriculture de Picardie, Agro-Transfert RT a créé une gamme de cas types de systèmes de culture, qui tient compte, d'une part, de la quantité de biomasse pouvant être intégrée aux sols en fonction de l'importance des céréales et du colza dans les rotations et, d'autre part, des facteurs de ralentissement de la minéralisation que sont les teneurs en argile et en calcaire des sols. Des conseils types ont été formulés. En particulier, des guides de décision indiquant les niveaux d'exportation possible des pailles par cas-type ont été publiés. Cette approche pourrait aussi être utilisée pour évaluer les zones nécessitant des apports de matière organique provenant de l'élevage ou des déchets urbains.



L'outil SIMEOS-AMG simule l'évolution du stock de carbone organique du sol en fonction de ses caractéristiques, de celles du climat et des pratiques culturales.
En bleu continu : le résultat pour le système de culture initial.
En pointillés : les résultats pour plusieurs scénarios de changements des pratiques.

L'expérience acquise a aussi permis de collaborer avec les chercheurs pour améliorer le modèle opérationnel AMG. Par ailleurs, une thèse est en cours de réalisation sur la base de la plaine de Versailles : il s'agit notamment d'utiliser AMG afin de savoir comment optimiser la répartition des épandages de produits organiques. Le modèle AMG a été associé à une démarche de normalisation des produits agricoles (norme ISMO sur l'indice de stabilité des matières organiques). AMG sera aussi utilisé dans le cadre du projet ABC'Terre pour établir un diagnostic sur les stocks de carbone agricole à l'échelle d'un territoire, et sur les émissions de gaz à effet de serre, intégrant le bilan carbone du sol. Entre autres projets, Agro-Transfert RT travaille actuellement à l'amélioration de méthodes d'analyse du cycle de vie agricoles développées en interne. La mise au point de ces méthodes d'évaluation multicritères sont indispensables pour progresser vers des filières durables utiles à toute la société.

En savoir plus : www.agro-transfert-rt.org

Milieux forestiers

Les catalogues des stations forestières en Île-de-France

Les catalogues des stations forestières constituent la base de l'intervention sur les milieux forestiers et sont désormais disponibles, aux côtés des études techniques et des guides, en téléchargement. Ils correspondent à des régions naturelles définies en fonction de leur mésoclimat et de la cohérence des stations. Celles-ci distinguent principalement les stations de plateau, de versant et de fond de vallons, prennent compte les découpages géologiques, les essences de peuplement, les variables pédologiques et la végétation spontanée. La constitution des catalogues se fonde sur l'évaluation des besoins de gestion et sur les relevés de terrain, qui donnent lieu à une formulation des stations provisoire, puis définitive. Chaque fiche de station précise sa caractérisation écologique, sa localisation, ses peuplements et son éventuel intérêt patrimonial. Elle détaille ensuite sa variabilité, sa fertilité et les préconisations sylvicoles, avant de présenter un ou plusieurs exemples de sites mentionnant la description de la flore et la description du sol établie sur fosse et à partir d'analyses. Les principaux catalogues de l'Île-de-France ont d'ores et déjà été publiés.

Jean-Paul PARTY Sol Conseil
Voir sa présentation*

Les catalogues de stations forestières, en Île-de-France, ont été élaborés durant les vingt dernières années et constituent la base de l'intervention sur les milieux forestiers. Ces stations sont définies comme des étendues de terrain de superficie variable possédant des caractéristiques physiques et biologiques homogènes. Elles tiennent compte du mésoclimat propre aux régions naturelles du territoire français, mais aussi des caractères topologiques et géologiques, des variables pédologiques et de la structure des formations végétales spontanées.

Un certain nombre de catalogues présentent des blocs-diagrammes distinguant les stations de plateau, les stations de versants et les stations de fond de vallon, découpage auquel est adjoint le découpage géologique. On peut ainsi caractériser, par exemple, les chênaies calcaricoles thermophiles de versant sud, très présentes en Île-de-France, comme le sont, en plateau, les chênaies acidophiles sèches. Les catalogues sont établis par régions naturelles et établissent en principe un inventaire quasi-exhaustif des stations, même si certaines contingences ne permettent pas en pratique de décrire, le plus souvent, plus de 90 % des stations du territoire. Chaque station est décrite par des critères simples pour faciliter la reconnaissance sur le terrain à travers une clé de détermination.

Les catalogues proposent des synthèses écologiques à l'échelle des paysages forestiers des régions naturelles, identifient les lois de répartition des stations et proposent parfois une cartographie des stations au 1/10 000e de massifs forestiers tests. Ces données devraient logiquement pouvoir être mises en cohérence avec le SIG. Les catalogues sont établis sous l'autorité d'un comité de pilotage de 6 à 12 personnes, où sont représentées des personnes ressources possédant une bonne connaissance de la région, et qui possèdent une spécialité botanique, géologique, pédologique, etc. En Île-de-France, Alain Brêthes a ainsi apporté son expertise de la pédologie régionale des forêts publiques, alors que Gérard Arnal apportait les éléments d'écologie des milieux naturels en général. Des techniciens forestiers de la forêt privée et d'autres spécialistes siègent également dans ces comités.

Le démarrage de l'élaboration des catalogues se fonde sur l'évaluation des besoins de gestion forestière et sur la détermination de la région forestière pertinente. Les propositions de l'opérateur expert sont discutées par le comité en particulier selon les documents existants avant la collecte et le choix des données. L'étape suivante est celle des relevés de terrain, qui font l'objet de nouveaux échanges. La première version des stations est élaborée sur cette base, tout comme les groupes écologiques. Une clé de reconnaissance est construite et testée sur différents massifs afin d'être adaptée au vu des retours. Les fiches et les généralités préalables sont enfin rédigés.

Le cœur des catalogues est constitué des fiches de station. Chaque fiche comporte deux, voire trois pages :
- la première présente la caractérisation écologique, la localisation, les peuplements forestiers correspondants

* http://www.natureparif.fr/attachments/forumdesacteurs/Rencontres/Sols/11_JPPARTY_20062012.pdf

et l'intérêt patrimonial éventuel. Une carte schématique situe les stations, un diagramme écologique situant les stations par rapport à un pôle d'acidité et d'humidité (la chênaie mixte acidophile à molinie est ainsi relativement acide et mésohygrophile). Le bloc-diagramme identifie les différents types de station qui peuvent être rencontrés sur la région, la station se situant plutôt sur les plateaux en forme de dépression ;

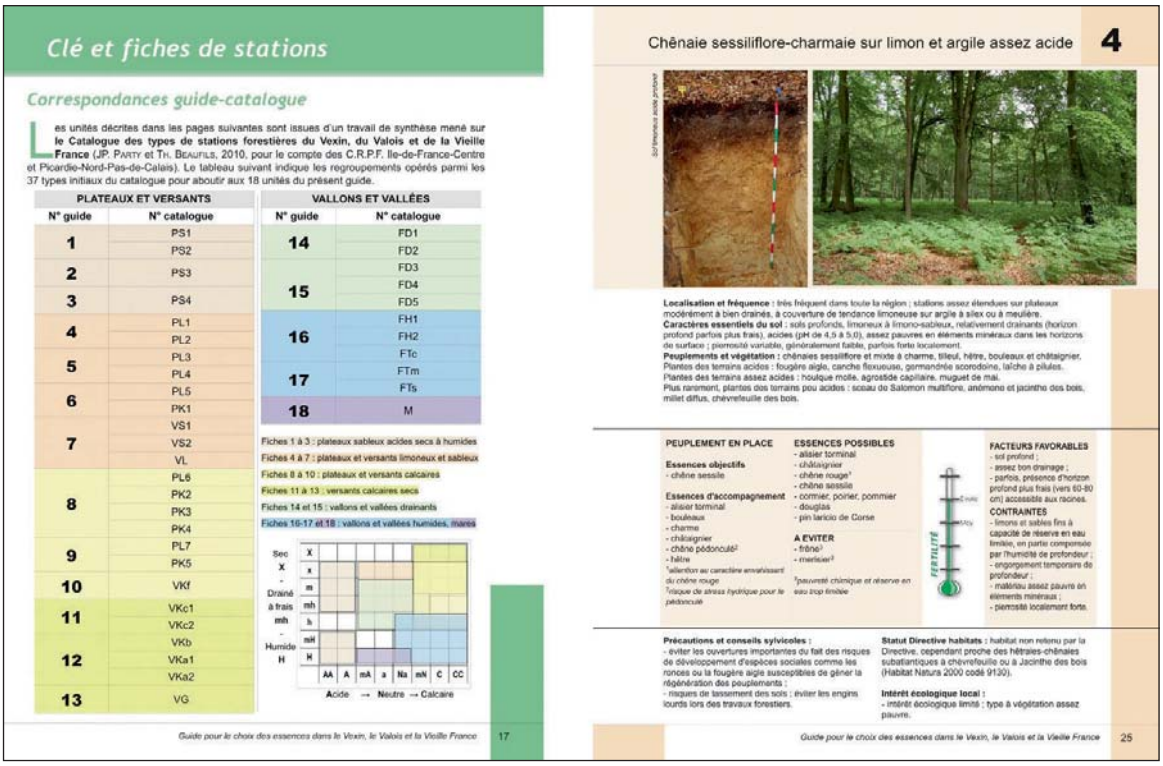
– la deuxième page complète la première en décrivant la variabilité de la station, sa fertilité, ainsi que le choix des essences et les préconisations sylvicoles. Les variations peuvent être représentées sous la forme d'une topo-séquence ;
– la troisième page présente un ou plusieurs exemples types de sites, comprenant le relevé de la flore et la description du sol établie sur fosse et à partir des analyses réalisées en laboratoire.

Les fiches de certains catalogues réunissent les deux premières pages et ne comprennent ainsi que deux pages. Par ailleurs, le catalogue des stations forestières du Vexin, du Val-d'Oise et de la Vieille France (les trois régions ont été regroupées en raison de leur cohérence géologique et forestière) comporte par exemple un relevé tous les 200 hectares et un exemple type tous les 2 000 hectares, compte 250 pages et pèse plus d'un kilogramme. Ces documents de références sont donc destinés à rester au bureau. Des guides simplifiés sont issus de ces catalogues et recourent à des photographies alors que d'autres proposent des schémas. Des formats intermédiaires ont aussi parfois été publiés : ces catalogues simplifiés atteignent une centaine de pages. Ces guides comprennent des clés de détermination faisant appel à la morphologie des lieux, aux essences et aux humus, ainsi qu'un bloc-diagramme.

Afin de simplifier l'approche de catalogues qui peuvent être difficiles à aborder, des guides de stations forestières ont été élaborés en les prenant pour base. Ces guides opérationnels de terrain de moins de 50 pages et de moins de 100 grammes ne requièrent que peu de compétences botaniques ou pédologiques et synthétisent les types les plus importants de la région en utilisant uniquement des notions scientifiques simplifiées et des informations concrètes. Ils proposent une correspondance avec les stations du catalogue et une vingtaine de fiches d'une seule double-page pouvant regrouper plusieurs stations en une seule unité stationnelle, qui effectue une synthèse des informations contenues dans le catalogue – y compris des préconisations.

Les catalogues des stations d'Île-de-France sont aujourd'hui terminés. Les 4 catalogues du Vexin-Valois-Vieille-France, des Yvelines et de l'Essonne, de la Brie francilienne et de Fontainebleau ont été publiés au cours des 20 dernières années. Une partie de la Brie a été regroupée avec le Tardenois.

Les trois principaux catalogues franciliens privilégient les essences autochtones et les préconisations sylvicoles qui les favorisent. Ces catalogues établissent aussi un lien avec les spécifications de l'*Association for Temperate Agroforestry* et les espèces patrimoniales. Les catalogues Yvelines et Essonne et Vexin-Valois-Vieille-France précisent aussi le statut de protection et le niveau d'intérêt. L'iconographie des guides qui en sont dérivés a été particulièrement


Clé et fiches de stations

Correspondances guide-catalogue

Les unités décrites dans les pages suivantes sont issues d'un travail de synthèse mené sur **le Catalogue des types de stations forestières du Vexin, du Valois et de la Vieille France** (JP. Party et Th. Beaufils, 2010, pour le compte des C.R.P.F. Ile-de-France-Centre et Picardie-Nord-Pas-de-Calais). Le tableau suivant indique les regroupements opérés parmi les 37 types initiaux du catalogue pour aboutir aux 18 unités du présent guide.

PLATEAUX ET VERSANTS	
N° guide	N° catalogue
1	PS1
	PS2
2	PS3
3	PS4
4	PL1
	PL2
5	PL3
	PL4
6	PL5
	PK1
7	VS1
	VS2
	VL
8	PL6
	PK2
	PK3
	PK4
9	PL7
	PK5
10	VKf
11	VKc1
	VKc2
	VKb
12	VKa1
	VKa2
13	VG

VALLONS ET VALLÉES	
N° guide	N° catalogue
14	FD1
	FD2
15	FD3
	FD4
	FD5
16	FH1
	FH2
	FTc
17	FTm
	FTs
18	M

Fiches 1 à 3 : plateaux sableux acides secs à humides
Fiches 4 à 7 : plateaux et versants limoneux et sableux
Fiches 8 à 10 : plateaux et versants calcaires
Fiches 11 à 13 : versants calcaires secs
Fiches 14 et 15 : vallons et vallées drainants
Fiches 16-17 et 18 : vallons et vallées humides, marais

Sec X - Drainé à frais mh - Humide H
X, x, m, mh, h, mH, H
AA A mA a Na mN C CC
Acide → Neutre → Calcaire

Guide pour le choix des essences dans le Vexin, le Valois et la Vieille France 17

Chênaie sessiliflore-charmaie sur limon et argile assez acide 4

Sol limoneux assez profond

Localisation et fréquence : très fréquent dans toute la région ; stations assez étendues sur plateaux modérément à bien drainés, à couverture de tendance limoneuse sur argile à silex ou à meulière.
Caractères essentiels du sol : sols profonds, limoneux à limono-sableux, relativement drainants (horizon profond parfois plus frais), acides (pH de 4,5 à 5,0), assez pauvres en éléments minéraux dans les horizons de surface ; pierrosité variable, généralement faible, parfois forte localement.
Peuplements et végétation : chênaies sessiliflore et mixte à charme, tilleul, hêtre, bouleaux et châtaignier. Plantes des terrains acides : fougère aigle, canche flexueuse, germandrée scorodoine, laîche à pilules. Plantes des terrains assez acides : houlque molle, agrostide capillaire, muguet de mai. Plus rarement, plantes des terrains peu acides : sceau de Salomon multiflore, anémone et jacinthe des bois, millet diffus, chèvrefeuille des bois.

PEUPLEMENT EN PLACE
Essences objectifs
- chêne sessile

Essences d'accompagnement
- alisier terminal
- bouleaux
- charme
- châtaignier
- chêne pédonculé[2]
- hêtre

[1]attention au caractère envahissant du chêne rouge
[2]risque de stress hydrique pour le pédonculé

ESSENCES POSSIBLES
- alisier terminal
- châtaignier
- chêne rouge[1]
- chêne sessile
- cormier, poirier, pommier
- douglas
- pin laricio de Corse

A ÉVITER
- frêne[2]
- merisier[2]

[2]pauvreté chimique et réserve en eau trop limitée

FERTILITÉ

FACTEURS FAVORABLES
- sol profond ;
- assez bon drainage ;
- parfois, présence d'horizon profond plus frais (vers 60-80 cm) accessible aux racines.

CONTRAINTES
- limons et sables fins à capacité de réserve en eau limitée, en partie compensée par l'humidité de profondeur ;
- engorgement temporaire de profondeur ;
- matériau assez pauvre en éléments minéraux ;
- pierrosité localement forte.

Précautions et conseils sylvicoles :
- éviter les ouvertures importantes du fait des risques de développement d'espèces sociales comme les ronces ou la fougère aigle susceptibles de gêner la régénération des peuplements ;
- risques de tassement des sols ; éviter les engins lourds lors des travaux forestiers.

Statut Directive habitats : habitat non retenu par la Directive, cependant proche des hêtraies-chênaies subatlantiques à chèvrefeuille ou à jacinthe des bois (Habitat Natura 2000 codé 9130).

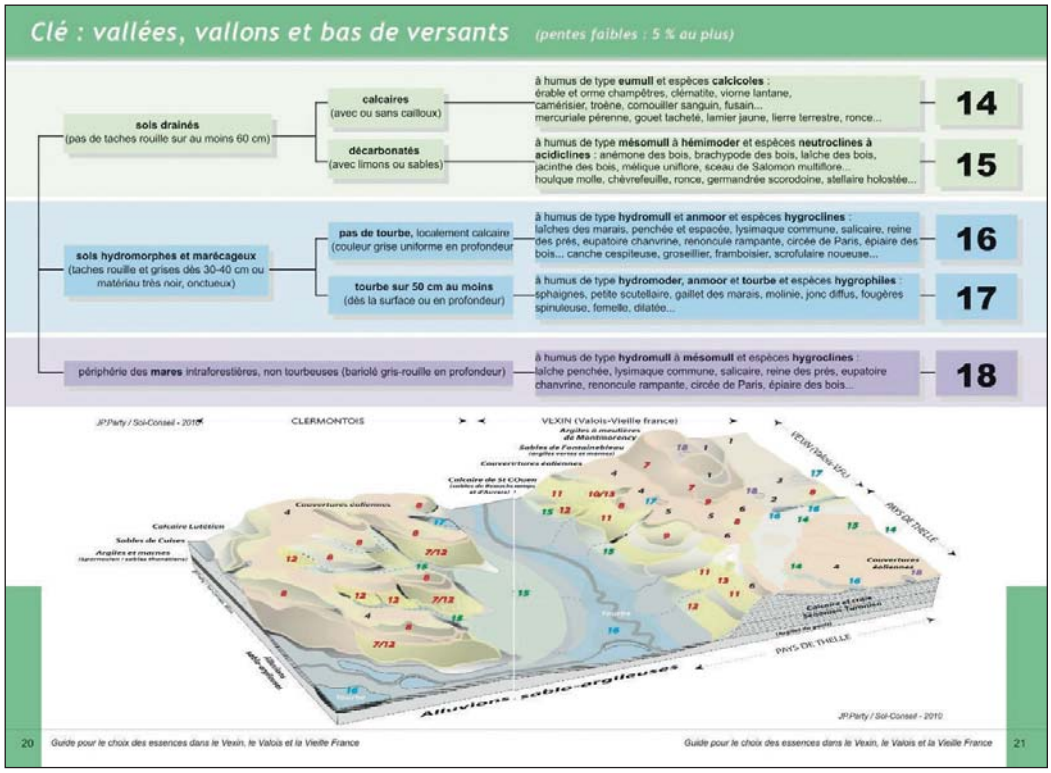
Intérêt écologique local :
- intérêt écologique limité ; type à végétation assez pauvre.

Guide pour le choix des essences dans le Vexin, le Valois et la Vieille France 25

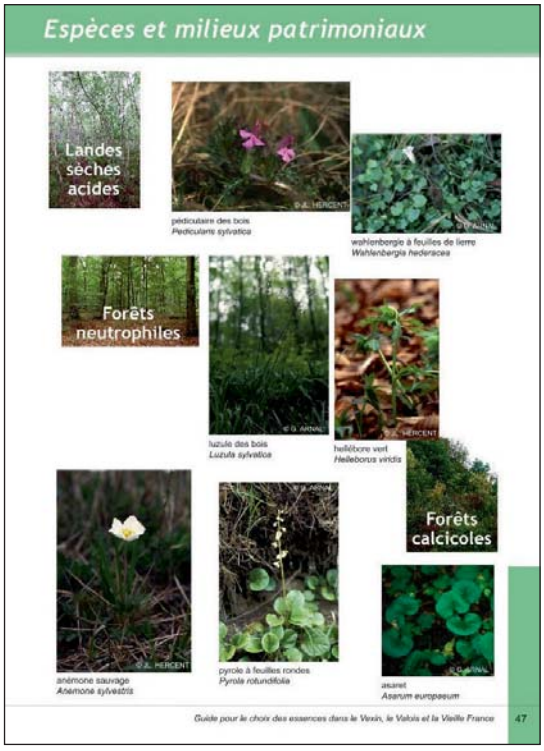
Les catalogues forestiers établissent une correspondance entre stations et fiches pour les milieux forestiers de production.

soignée. Il est précisé que des stations telles que les chênaies pubescentes, par exemple, ne doivent pas faire l'objet de boisements, mais plutôt d'une protection, et une fiche est dédiée aux mares et marécages. Les catalogues comprennent enfin un mémento des espèces et des milieux patrimoniaux les plus emblématiques de la région forestière. À l'exception de la Normandie et du Poitou-Charentes, la France est quasiment entièrement couverte par les catalogues, les guides et les études forestières. Pour aller plus loin, il est possible d'utiliser les outils d'aide et de reconnaissance des stations forestières et de télécharger toutes les données de base sur la rubrique Stations forestières du site de l'IFN, qui vient d'être rattaché à l'IGN.

Pour en savoir plus : www.ifn.fr

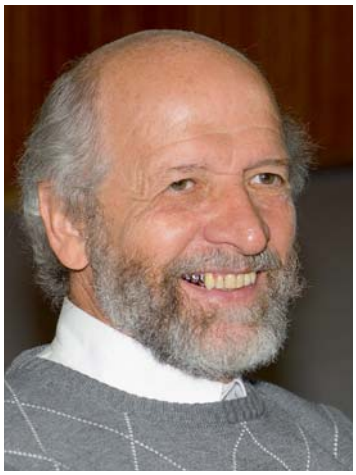


Clé de reconnaissance des unités stationnelles et situation paysagère schématique issues d'un catalogue forestier.



Les catalogues forestiers proposent aussi une illustration des espèces patrimoniales et de leurs milieux.

Pratiques sylvicoles et pédologie en milieu forestier



La fertilité des sols forestiers dépend du bilan hydrique et de la fertilité minérale. Le bilan hydrique est fonction du climat, de la situation topographique, des obstacles absolus et relatifs, des possibilités de remontée capillaire, etc. La part d'eau exploitable par l'arbre dépend de l'eau effectivement retenue dans le sol, donc de sa granulométrie, de sa charge en éléments grossiers et surtout de la profondeur prospectable par les racines. Les nappes d'eau permanentes constituent un obstacle absolu car la plupart des racines ne peuvent vivre dans un milieu asphyxiant. Les niveaux compacts de certains matériaux et les nappes d'eau temporaires restreignent la croissance des racines et constituent des obstacles relatifs. Le tassement des sols (notamment du fait des engins de plus en plus lourds) s'oppose aussi à l'installation du système racinaire donc à la croissance des plants, voire à la survie des arbres en place. La fertilité minérale – azote exclu – dépend du matériau parental, de l'évolution pédologique fonction du peuplement, de la végétation et de la forme d'humus. L'activité de ce dernier dépend de la durée de la saison de végétation, donc du climat. Pour autant, la plupart des essences forestières majeures (hêtre, chênes, pins, etc.) sont indifférentes à la richesse minérale des sols, le facteur déterminant étant de bilan hydrique.

Alain BRÊTHES pédologue, Office National des Forêts
Voir sa présentation*

L'analyse des sols forestiers vise principalement à rechercher les caractéristiques conditionnant la place des essences et plus généralement la gestion forestière. Contrairement à l'agriculture, il s'agit de s'adapter au milieu et non d'apporter des éléments fertilisants en fonction de la culture envisagée. Selon les besoins de l'arbre, ce sont essentiellement l'alimentation en eau, la fertilité minérale et les capacités de respiration des racines qui sont étudiées. Pour cela, la texture (granulométrie), la charge en éléments grossiers (« cailloux »), la fertilité minérale, la vitesse de décomposition de la matière organique, la profondeur accessible aux racines sont analysées. Dans le cadre du changement climatique, l'influence du climat et les variations de la pluviométrie et de la température sont aussi déterminantes.

Deux critères essentiels conditionnent la place ou le choix des essences : le bilan hydrique et la fertilité minérale du sol.

Le bilan hydrique est fonction du climat, de la position topographique et de la nature du sol. Les plateaux sont uniquement alimentés par la pluie alors les vallons bénéficient de plus du drainage latéral ou profond et des apports. La texture et la charge en éléments grossiers impactent aussi ce bilan. Généralement (hormis les calcaires poreux, la craie et certains grès), il est considéré que les « cailloux » n'apportent pas d'eau au sol. Or, il a été montré en Petite Beauce que la transpiration des plantes pouvait être supérieure de plus de 30 % à la réserve en eau de la terre fine, une part de cette eau provient donc des éléments grossiers (calcaire dur). La profondeur accessible aux racines est limitée par les obstacles relatifs et surtout absolus. Les remontées capillaires provenant des horizons profonds ou d'une nappe jouent aussi un rôle à prendre en compte. Ainsi, il a été montré dans l'est du Bassin parisien que ces remontées (à partir de la nappe de la craie) pouvaient dépasser 10 mètres.

Une partie de l'eau retenue dans le sol est non utilisable par la plupart des végétaux car trop fortement fixée. Sur les sols sableux, le drainage est important (sols dits « séchards »). L'eau y est peu retenue. Au contraire, les teneurs en eau sont très fortes dans les sols argileux mais cette eau est en partie peu utilisable, car trop fortement fixée.

L'alimentation en eau dépend également de la profondeur prospectée par les racines. La capacité exploitable sera calculée pour la partie du sol située au dessus de l'obstacle absolu. En l'absence d'obstacle absolu, il est de tradition d'effectuer ce calcul sur une épaisseur de 1,20 m environ (soit la longueur de la tarière pédologique). Des observations effectués en forêts d'Amboise et de Villandry sur des fosses profondes ont montré que les racines des chênes étaient encore présentes entre 3 et 5 m de profondeur : ces dernières constituent des racines dites « de survie » permettant à un arbre de ne pas dépérir en période sèche. Mais c'est en général le mètre superficiel qui sert à la production de l'arbre. Les dalles rocheuses continues constituent un obstacle absolu, tout comme les nappes permanentes stagnantes car la plupart des racines ne peuvent vivre dans

* http://www.natureparif.fr/attachments/forumdesacteurs/Rencontres/Sols/12_ABRETHES_20062012.pdf

les milieux asphyxiants. Les obstacles relatifs – compacité des sols fortement argileux, nappe d'eau temporaire, par exemple – limitent la croissance des racines dans des proportions variables.

Chaque sol est donc caractérisé par une capacité maximale de rétention en eau. Les experts du changement climatique indiquent qu'il pourrait pleuvoir plus en hiver et moins en été. Mais si le sol possède une capacité de stockage de 200 mm, il ne pourra stocker au maximum que cette quantité d'eau. Les précipitations supplémentaires iront rejoindre les nappes et les cours d'eau.

Des travaux ont montré que la profondeur des dégâts dépend de la charge à la roue et non de la pression de contact souvent mise en avant par les constructeurs. Les doubles pneus, les pneus basse pression et les tracks (chenilles) n'ont d'intérêt que si l'on n'augmente pas le poids des engins en parallèle. De même, il a été montré qu'au-delà de trois passages au même endroit le maximum des dégâts est fait et qu'au-delà de sept passages, il n'existe plus de porosité à supprimer. Ces dégâts perdurent plus de 30 ans après le passage des engins et ceci sur plus de 50 cm de profondeur. Une étude conduite en Allemagne a montré que le sol commençait à récupérer sa porosité à partir de 15 ans. Or les exploitations forestières courantes se traduisent par des passages espacés de 3 à 10 ans. En Lorraine, il a été montré que seuls les 5 premiers cm du sol sont susceptibles de se restaurer en 5 ans. Il ne faut donc pas compter sur le temps pour améliorer les sols. De plus, les dégâts sont cumulatifs.

Pour toutes ces raisons, il est préférable de concentrer les passages d'engins sur les mêmes itinéraires au fil des années, en respectant le principe de cloisonnements que ne doivent pas quitter les engins d'exploitation, et d'interdire l'entrée des engins dans la parcelle proprement dite. Beaucoup d'exploitants assimilent l'absence d'ornière à l'absence de dégâts, ce qui est faux. Néanmoins, l'orniérage est pire que le tassement puisqu'il y ajoute un déplacement de matière. Le tassement peut compromettre les croissance des semis par défaut d'enracinement et provoquer le dépérissement des arbres en place du fait de la compression et/ou du cisaillement des racines, mais aussi par défaut de respiration – en raison de l'enrichissement en CO_2 dans le sol causé par la rupture des échanges gazeux entre atmosphère au dessus du sol et atmosphère dans le sol. Ainsi, des dépérissements de hêtres ont été signalés en forêt de Lyons après une exploitation. Le cloisonnement doit aussi rester en bon état : il est nécessaire d'éviter des ornières profondes et de limiter au maximum les opérations dans les parcelles.

Chênaie à molinie développée sur sol d'argile en forêt de Bommiers (Indre).

Plant de chêne provenant de la forêt des Hauts-Bois (Haute-Saône). La déformation du système racinaire est due à la situation dans la placette expérimentale « tassement ».

Fasse au tassement, la restauration naturelle s'opère surtout grâce aux vers de terre anéciques, qui structurent les sols en profondeur. Les sangliers ne retournent les sols que sur 20 ou 30 cm au maximum. Leur efficacité est donc limitée. Intervenir artificiellement pour décompacter les sols signifie avoir recours au sous-solage, ce qui est extrêmement difficile en forêt, où les racines sont très nombreuses. Ces travaux ne peuvent concrètement n'être réalisés qu'au stade de la régénération. Mais dans tous les cas, leur efficacité reste limitée et ils sont très coûteux.

La fertilité minérale dépend beaucoup du matériau parental qui influe sur le stock d'éléments présents, hormis l'azote, qui est produit par la végétation et par l'évolution pédogénétique. Elle est évaluée principalement à partir de la végétation et de la forme d'humus. Chaque espèce végétale possède des exigences écologiques qui permettent d'estimer la fertilité minérale du milieu. La podzolisation (présence d'un horizon brun chocolat ou, pire, d'un horizon cendreux) est un indicateur d'acidité, car ces phénomènes ne se développent pas dans des sols biologiquement actifs. Pour un

Profil de sol hydromorphe (Luvisol-Rédoxisol) sur limon.

climat et une période de végétation donnés, l'activité biologique est d'autant plus faible que le sol est chimiquement pauvre, ce qui affecte la forme de l'humus.
La fertilité des sols forestiers peut être partiellement améliorée par des amendements qui favorisent l'activité biologique du sol. Il ne s'agit pas, comme en agriculture, d'apporter des éléments nutritifs dont aurait besoin l'essence. À l'exception de quelques essences exigeantes comme le merisier, la plupart des arbres forestiers majeurs – hêtre, chênes, pins – sont relativement indifférents à la richesse chimique du sol. Seul le bilan hydrique est alors déterminant pour estimer la capacité d'un sol à porter une forêt.

Pour en savoir plus : www.onf.fr

Les bio-indicateurs

Des indicateurs pour évaluer la qualité des sols et éclairer les décisions de gestion

Les indicateurs de qualité du sol sont examinés par les agriculteurs depuis des temps immémoriaux. Au-delà des indicateurs physiques et chimiques, le programme Bio-indicateurs de qualité des sols de l'ADEME vise à développer et à discriminer des indicateurs biologiques dont les variations naturelles sont connues, qui sont sensibles à la gestion, mais aussi peu onéreux, stables, simples et robustes. Les 40 indicateurs testés sur 13 sites-ateliers restent assez peu utilisés en Europe et intègrent les ingénieurs du sol (vers de terre), la diversité et l'activité microbienne responsable des différents cycles chimiques ainsi que la mesure des collemboles, des acariens et des nématodes qui régulent les populations microbiennes. Ces indicateurs, combinés ou isolés, sont sensibles au travail du sol, aux modes culturaux, aux amendements organiques, aux traitements pesticides et à la gestion forestière. Des escargots et des plantes ont également été utilisés pour mesurer le passage des contaminants vers la chaîne trophique depuis les sols pollués. Ces outils sont déjà disponibles et des référentiels nécessaires pour les interpréter seront rendus publics lors d'une rencontre de restitution. De nouvelles approches d'identification moléculaire ou fonctionnelles en sont au stade de la recherche dans le cadre d'autres programmes tels que GESSOL ou ÉcoFinders.

Antonio BISPO ADEME

Voir sa présentation*

Le programme Bio-indicateurs de qualité des sols est co-animé par le service Agriculture et Forêts de l'ADEME. Les définitions de la qualité des sols sont multiples et donnent lieu en anglais aux notions de *soil quality*, voire de *soil health.* L'une d'elle retient pour critère « *la capacité d'un sol à fonctionner au sein d'un écosystème pour un usage permettant la production biologique, le maintien de la qualité de l'environnement et de la préservation de la santé des plantes, des animaux et de l'homme* », alors que d'autres sont uniquement centrées sur la production agricole.

Les qualités du sol sont multiples et leur définition dépend de l'usage attendu : réserve en eau pour la forêt, fertilité et réserve en eau pour l'agriculture, portance pour les usages urbains. Les indicateurs sont donc différents selon ces usages, les notions de durabilité et de services et fonctions assurés par les sols étant de plus en plus mises en avant dans le souci d'éviter de compromettre les usages futurs des sols. L'usage du sol en tant que réservoir de carbone a notamment émergé depuis cinq ans environ et doit désormais être pris en compte.

Pour discriminer quelques paramètres clés afin de mesurer la vie des milieux complexes que sont les sols, il faut choisir des indicateurs dont les variations naturelles sont connues et qui sont sensibles à la gestion. Idéalement, la méthode de mesure doit être peu onéreuse, simple, stable et robuste, partagée par tous (voire normalisée), et aboutir à des données interprétables. Les indicateurs doivent, si possible, être présents dans des bases de données de long terme.

Les indicateurs de la qualité des sols sont étudiés depuis des temps immémoriaux. Selon une étude en éthnopédologie consacrée à des populations d'Afrique ou d'Amérique du Sud et publiée dans la revue Geoderma, les indicateurs traditionnels utilisés pour déterminer les cultures sont la texture, la couleur, l'humidité, le taux de matière organique et la fertilité constatée. Nombre d'agriculteurs à travers le monde continuent à utiliser ces indicateurs rustiques.

Les indicateurs plus technologiques regroupent différents domaines. Les données physiques portent par exemple sur la porosité, la masse volumique, la résistance à la compression, la structure, la texture et la couleur. Les paramètres chimiques comprennent entres autres le pH, la matière organique, la teneur en azote, etc. Depuis quelques années sont apparus des paramètres environnementaux (contaminations en métaux, en pesticides, en polluants organiques). Les indicateurs biologiques portent sur la microflore (bactéries et champignons) et sur la faune. Dans les systèmes agricoles, la flore n'est pas utilisée en tant qu'indicateur, mais elle l'est pour les prairies, les friches ou les forêts.

Le réseau de mesure de la qualité des sols (RMQS[1]) a été présenté ci-dessus par Dominique Arrouays (page 6), ainsi que l'atlas qui en est issu à partir de mesures physico-

* http://www.natureparif.fr/attachments/forumdesacteurs/Rencontres/Sols/13_ABISPO_20062012.pdf

1. http://www.gissol.fr/programme/rmqs/rmqs.php

© A. Bispo – ADEME

Prélèvement de faune du sol (ver de terre).

© A. Bispo – ADEME

Identification des organismes au laboratoire.

chimiques utilisées en routine et constituant des bases de données accessibles sur Internet.

Le programme européen EU ENVASSO[1], qui a pris fin en 2008, a permis de savoir si les pays de l'Union européenne disposaient de réseaux de surveillance de la qualité des sols, de connaître quels étaient les paramètres utilisés et finalement de dresser une carte de la fréquence d'utilisation de ces indicateurs. Le pH est mesuré presque partout, alors que seuls l'Allemagne, les Pays-Bas (et à un moindre degré la France) utilisent des mesures des populations de vers de terre. Les indicateurs biologiques sont de façon générale sous-utilisés. Il est donc apparu qu'il fallait développer et valider ces outils.

Les possibilités sont nombreuses et apparaissent sur le site Internet du programme GESSOL (www.gessol.fr). Il a été décidé de choisir les indicateurs en fonction de leurs rôles : ceux qui structurent les sols (ingénieurs physiques, tels que les vers de terre), mais aussi ceux qui convertissent la matière organique des sols (ingénieurs chimistes, comme les bactéries) et ceux qui régulent les populations (comme les collemboles et les nématodes). Il fallait aussi que les protocoles existent, qu'ils soient validés (ou en cours de validation) et qu'ils disposent de premiers référentiels. La plupart des laboratoires français travaillant dans ces domaines ont été impliqués.

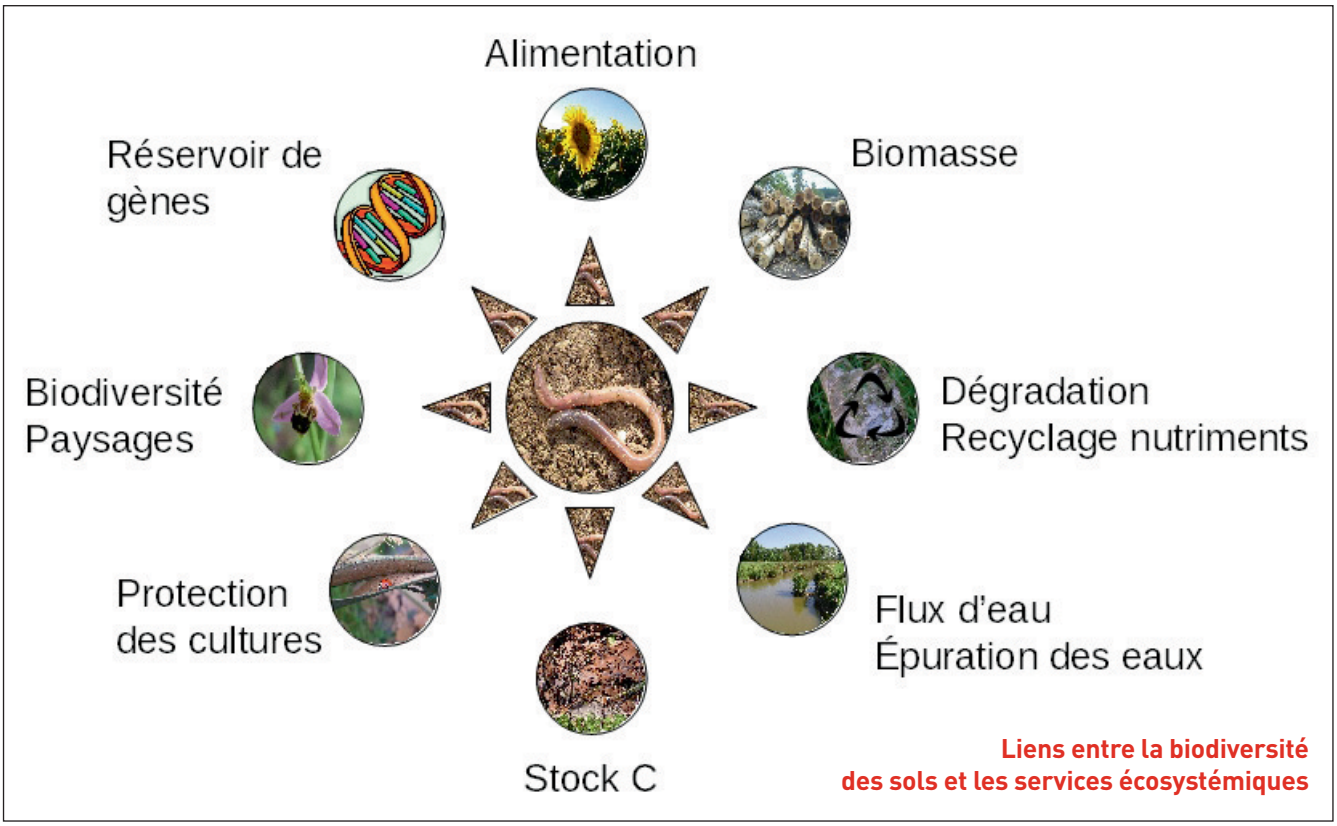
Cette batterie de quelque 40 indicateurs a été testée sur 13 sites-ateliers intégrant des sols agricoles, contaminés et forestiers. Le programme de prélèvement, étalé sur trois ans, et la conception de la base de données ont été coordonnés par Guénola Pérès de l'Université de Rennes I. Le traitement des données a pour objectif de proposer des indicateurs et un référentiel d'interprétation durant la journée de restitution du 16 octobre 2012[2].

1. http://eusoils.jrc.ec.europa.eu/projects/envasso/
2. Les fiches décrivant les indicateurs sont téléchargeables sur le site de l'ADEME : http://www2.ademe.fr/servlet/getDoc?id=81046 &cid=96&m=3& p1=3&ref=17205

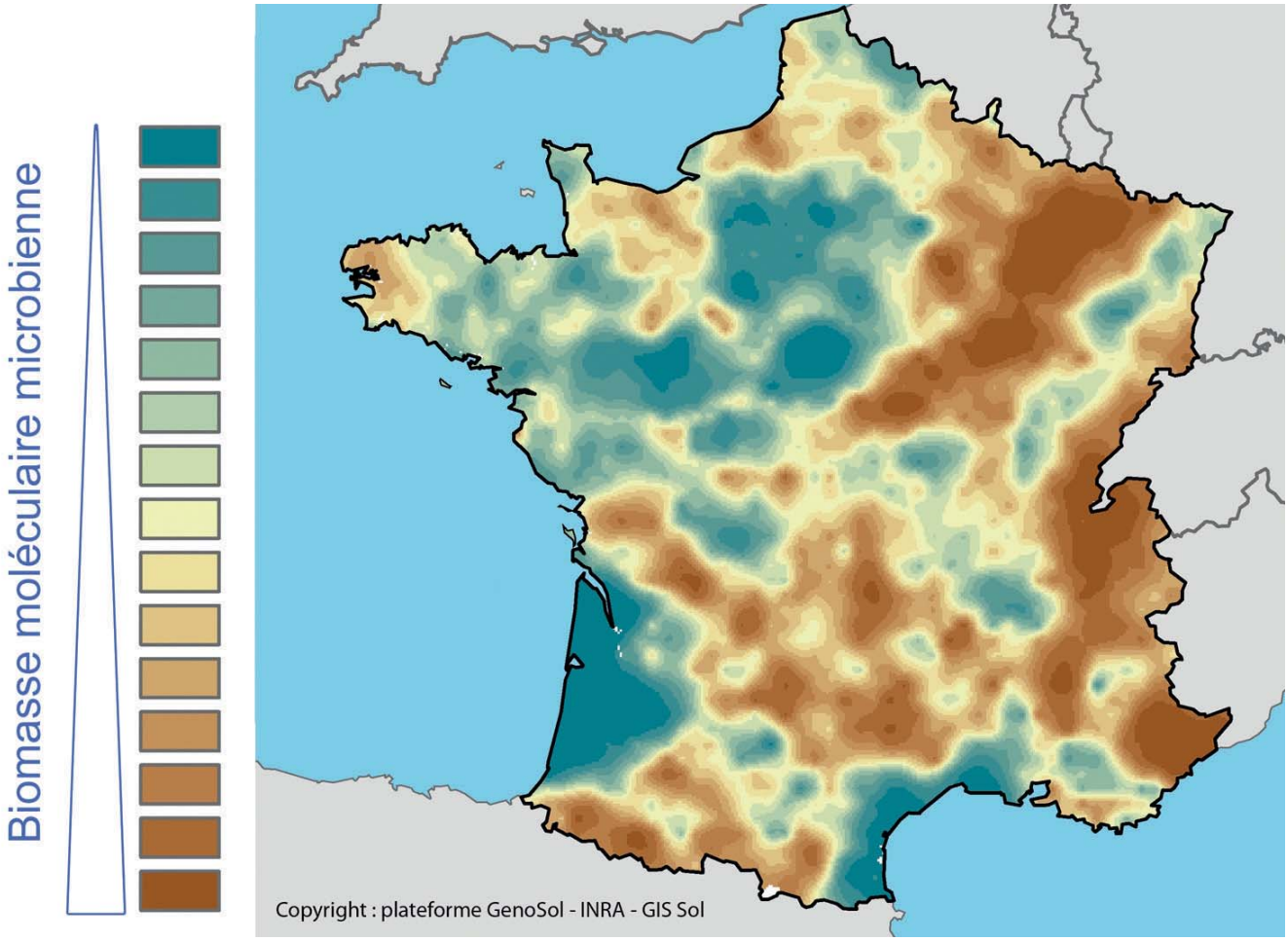
Les premiers résultats montrent par exemple que l'activité microbienne mesurée par différentes activités enzymatiques qui intègrent plusieurs cycles des éléments chimiques est sensible aux options de gestion étudiées. Lorsque des composts, fumiers, boues de stations d'épuration, etc., sont épandus, les activités telles que la lipase, la glucosidase et la phosphatase alcanide sont les plus sensibles. La glucosidase, l'uréase et les phosphatases sont quant à elles sensibles aux modes de travail du sol (labour ou semis direct). Si l'on réintroduit des prairies dans les rotations, on constate que toutes les activités enzymatiques réagissent. Les lipases, glucosidases et l'uréase sont les plus sensibles aux variations des modes de gestion et semblent être les paramètres à surveiller systématiquement.

Les résultats des indicateurs portant sur la faune du sol (vers de terre, macrofaune, collemboles, acariens et nématodes) sont en cours d'analyse, mais les premiers résultats montrent que c'est la répartition entre les vers de terre épigés, anéciques et endogés qui pourrait jouer un rôle d'indicateur de l'apport d'amendements organiques. Les collemboles et nématodes en sont aussi de bons indicateurs, et ils le sont aussi pour le travail du sol. L'influence des modes de traitements pesticides ou de leur absence est mesurée de la façon la plus fine par les nématodes et par une partie des collemboles. Nématodes et vers de terre ont réagi à la modification des rotations et apparaissent comme de bons indicateurs des modes de gestion.

Une bio-indication active a été pratiquée sur des sites contaminés : des escargots élevés en laboratoire ont été apportés dans des milieux forestiers et agricoles et sur des sites industriels contaminés. Il était important de savoir si la contamination passait dans leurs tissus, car les impacts sur la chaîne trophique sont importants. Une thèse à ce sujet sera bientôt soutenue à l'université de Besançon. Les premiers résultats indiquent que le cadmium ne migre pas systématiquement dans les tissus des escargots pour l'ensemble des sites contaminés. Ce protocole pourrait donc



Liens entre la biodiversité des sols et les services écosystémiques



Carte de France de la densité microbienne des sols.

être utilisé pour savoir s'il existe des risques de transferts de pollution depuis les sites contaminés et un seuil de référence a été proposé.

Le programme proposera des indicateurs pour la contamination industrielle, la gestion des milieux agricoles et la gestion forestière en discriminant les batteries types afin qu'il ne soit pas nécessaire de mesurer systématiquement la quarantaine d'indicateurs utilisés par le programme. Le programme est limité, puisqu'il ne porte que sur 13 sites, mais d'autres programmes sont actuellement en cours en matière de bio-indication. Il faut donc faire fusionner les bases de données pour enrichir le référentiel d'interprétation.

Le principal frein réside dans le temps nécessaire à l'identification et à l'interprétation, car les écologues du sol sont rares en France, voire en Europe. Par ailleurs, les relations entre la présence et la diversité de certains organismes et les services attendus (dont le rendement) ne sont pas encore bien établies.

Les outils d'identification moléculaire se développent, et il sera sous une dizaine d'années sans doute possible d'identifier les organismes présents dans le sol à partir d'une extraction d'ADN, ce qui, à terme, réduira le temps d'identification. Il est aussi envisageable de travailler à partir des traits phénotypiques des organismes (présences d'ailes ou de pattes, etc.). Dans les deux cas, il faudra établir la relation entre l'information brute et son lien avec les modifications des écosystèmes, ce qui donne lieu à deux projets – notamment au programme GESSOL, piloté par le ministère de l'Écologie.

Les référentiels commencent à s'étoffer sur la base du réseau de mesure de la qualité des sols. L'INRA de Dijon a extrait l'ADN de plus de 2 000 échantillons de sol afin de caractériser leur microbiologie. Des référentiels Vers de terre, Collemboles et Nématodes sont aujourd'hui opérationnels en Bretagne. Un observatoire de science participative des vers de terre (OPVT) a par ailleurs été créé et propose un protocole utilisant un pot de moutarde et une clé d'identification simplifiée[1].

La biodiversité des sols est à l'origine des services de production d'alimentation, de biomasse, de recyclage des nutriments, d'épuration de l'eau, de stockage du carbone, etc. On estime qu'une biodiversité plus riche protège les cultures et pourrait limiter l'emploi des pesticides, que la biodiversité du sol est un signe de la biodiversité au-dessus du sol et, enfin, qu'elle constitue un réservoir de gènes important et qui reste inexploré. La pénicilline est, ainsi, issue du sol. Le programme européen EcoFinders[2] vise à établir le lien entre la biodiversité des sols et les services écosystémiques qu'ils portent.

La demande de bio-indicateurs sur les sols est croissante. De premiers outils, ainsi que leurs référentiels, sont disponibles. Dans une économie où le coût des intrants va augmenter, les bio-indicateurs seront l'un des instruments pour mieux gérer les flux de carbone et de nutriments afin de faciliter la production. Ils s'imposeront en tant qu'outils de suivi, car la biodiversité des sols sera de plus en plus à l'origine de la nutrition des plantes dans le cadre de la future agriculture écologiquement intensive.

En savoir plus : www.ademe.fr

1. http://ecobiosoil.univ-rennes1.fr/OPVT_accueil.php
2. http://ecofinders.dmu.dk/

Exploration de la biodiversité génétique des sols : programme Terragénome

Sur Terre, le nombre de bactéries est évalué à 1 030 et un gramme de sol contient 109 bactéries. Les échanges de gènes entre bactéries sont très courants et fondamentaux. La notion d'espèce bactérienne est floue et leur nombre varierait de 10 000 à 10 millions. Leur caractérisation traditionnelle utilise la boîte de Petri, mais ce procédé ne permet de reproduire qu'un nombre infime d'espèces. Les techniques de la génomique permettent à présent de les identifier à partir de leur ADN, mais la difficulté se reporte sur les techniques d'extraction de ce dernier, car les organismes prélevés diffèrent considérablement selon les méthodes employées. Ces biais, comme la quantité de données obtenues représentent les nouveaux défis des microbiologistes. Aujourd'hui, plus de deux millions de brins d'ADN bactérien ont été clonés et placés en banque. Sur les 60 000 premiers clones testés, 139 présentent des propriétés antibiotiques, donc un potentiel intérêt thérapeutique : les bactéries luttent en effet entre elles par un vaste arsenal antibiotique et de résistances en constante mutation. C'est un exemple des colossales richesses biologiques du sol. Une centaine de microbiologistes a été réunis dans le consortium Terragénome afin d'étudier les bactéries du sol de Rothamsted (Angleterre), station de prairie faisant l'objet d'un suivi depuis 300 ans. Il n'apparaît pas que les gènes de résistances introduits par certains OGM provoquent une montée significative des résistances bactériennes.

Pascal SIMONET Équipe Génomique microbienne environnementale, CNRS Laboratoire Ampère
Voir sa présentation*

Mes recherches portent sur le rôle de l'environnement dans les échanges de gènes entre bactéries. Il est à présent reconnu que cet échange est fondamental. Le nombre de bactéries présentes à la surface de la Terre est gigantesque et évalué à 10^{30}. Cela signifie que si l'on déroulait leur ADN et qu'on le mettait bout à bout, l'on attendrait les confins de l'univers. L'immense majorité vit sous la surface, dans les sols ou dans l'océan. Cette extrême diversité ne pourra jamais qu'être étudiée en partie.

Un gramme de sol contient 10^9 cellules bactériennes et il est impossible d'évaluer l'ordre de grandeur du nombre d'espèces qui y sont présentes. La notion d'espèce bactérienne est floue et n'a pas le même sens que pour les organismes supérieurs, et ce nombre varierait entre 10 000 et 10 millions. La diversité des bactéries et des archéobactéries est supérieure à celle des insectes.

Traditionnellement, la caractérisation des bactéries utilise des prélèvements déposés dans une boîte de Petri et observe le résultat. Mais seul 0,1 % à 1 % des bactéries sont capables de se développer dans ces conditions. Depuis une vingtaine d'années, l'approche métagénomique a révolutionné la connaissance des bactéries en récupérant l'ADN environnemental de bactéries dans n'importe quel type de milieux.

Les sols sont des milieux complexes présentant de fortes hétérogénéités de structures et de peuplements vivants, qui peuvent dans certains cas minimiser la compétition entre organismes, mais qui imposent de s'interroger sur les conditions de prélèvement adéquat pour la microbiologie : faut-il prélever un gramme, dix grammes, un kilogramme de sol ? Les techniques de la génomique ont évolué de façon très rapide et il est à présent possible de séquencer le génome d'un être humain pour quelques centaines d'euros. Les sciences biologiques ont profité de cet essor et permettent, en dehors de l'intérêt scientifique et agronomique, de tirer du sol des substances d'intérêt médicamenteux, industriel, des enzymes utiles pour la bio-remédiation, etc.

La méthode PCR est utilisée pour faire parler l'ADN métagénomique, mais également le séquençage et le clonage, qui permet de constituer des banques d'ADN. Les techniques d'extraction de l'ADN sont plus ou moins performantes. Il est par exemple possible de prélever l'ADN des cellules bactériennes du sol grâce à un protocole utilisant le chlorure-césium, mais il s'est avéré que ces techniques ne permettent pas de disposer de l'ADN de l'ensemble des bactéries. Différentes techniques peuvent être utilisées de façon en partie complémentaire, car les organismes sélectionnés dans le milieu varient selon la méthode employée.

L'image des organismes présents diffère donc du point de vue taxonomique et fonctionnel selon les techniques employées. Il est apparu que 72,63 % des bactéries présentes dans le sol ne peuvent pas assurer leurs fonctions dans l'océan, ce qui semble compréhensible. Cette différence est moindre entre deux sols, mais le taux de divergence entre deux sols et deux techniques d'extraction est comparable. Il est donc très

* http://www.natureparif.fr/attachments/forumdesacteurs/Rencontres/Sols/14_PSIMONET_20062012.pdf

difficile de comparer les caractéristiques des sols à partir de ces techniques du fait des biais liés aux techniques d'extraction de l'ADN à partir de la matrice environnementale.

Les microbiologistes environnementaux disposent à présent de milliards de fragments d'ADN identifiés et les appareillages bientôt disponibles apporteront des quantités de données qui seront encore plus considérables.

La présence de biais et d'une extrême diversité implique une très grande difficulté du travail des biologistes. Les laboratoires du monde entier sont obligés de collaborer : un consortium international est ainsi chargé d'étudier la totalité des bactéries présentes dans le tube digestif humain. Le consortium international Terragénome a donc été mis en place pour faire face à ces extrêmes difficultés concernant le sol. Il s'agit d'améliorer l'extraction de l'ADN, de construire des banques d'ADN métagénomique et de commencer le pyroséquençage. La centaine de microbiologistes réunis a choisi le sol de la station de prairie de Rothamsted, en Angleterre. Elle présente l'avantage d'être suivie scientifiquement depuis 150 ans et d'avoir été étudiée préalablement du point de vue agronomique par ses propriétaires durant les 150 ans précédents, ce qui permet de disposer de relevés sur une période de 300 ans.

Des difficultés de financement du programme sont ensuite apparues, car il est difficile de convaincre les agences de recherche nationales de travailler sur des sols étrangers. Une autre difficulté fondamentale consiste à interpréter scientifiquement les énormes quantités de données rendues disponibles par la technique. C'est pourquoi des bio-informaticiens développent des programmes d'interprétation qui permettent d'identifier les bactéries présentes.

L'ADN prélevé permet de constituer des banques de données à partir de la fragmentation des brins prélevés dans l'environnement, qui peuvent ensuite être clonés par des bactéries domestiques. Plus de deux millions de clones ont été placés en banque, le travail consistant ensuite à déterminer quels sont les clones présentant des caractères intéressants. Il a été possible de rechercher les gènes impliqués dans la production d'antibiotiques dans la perspective de la production de substances antibiotiques ou d'enzymes.

Sur les 60 000 premiers clones, 139 synthétisent des molécules ayant un potentiel intérêt thérapeutique, sans la moindre redondance. Il existe donc dans ces clones des gènes impliqués dans la production d'antibiotiques totalement inconnus jusqu'à ce jour. Alors que les gènes de résistance se multiplient, et que les antibiotiques actuels deviennent inefficaces, il est très probable que grâce à la biodiversité au sol, une myriade de molécules antibiotiques ne demande qu'à être exploitée. C'est pourquoi de nombreux pays en développement ont pris conscience de la richesse des ressources du sol : il n'est souvent plus possible d'effectuer des prélèvements sans entrer dans le cadre de la protection de la propriété industrielle.

Les bactéries entretiennent depuis des centaines de millions d'années une « course aux armements » dont les matériaux sont disponibles. Les voies de synthèse sont constituées chez les bactéries du sol pour favoriser la biodiversité, puisque les modules et les domaines sont échangeables entre bactéries, et produisent des antibiotiques très variés. Plus de 70 % des antibiotiques utilisés aujourd'hui proviennent du milieu naturel, et principalement des sols, alors que la chimie de synthèse en imite les structures : la diversité issue de la chimie sera bien moindre que celle provenant des organismes naturels.

Les travaux de génomique microbienne permettent-ils d'évaluer d'éventuels risques liés aux OGM ? Les gènes de ces plantes peuvent-ils être transférés à l'environnement ? Des recherches ont été menées à partir d'un site situé à Baziège, où entre 2000 et 2010, des cultures expérimentales de maïs BT 167, contenant un gène de résistance à un antibiotique (ampicilline) ont été pratiquées. Le transfert de ce gène peut-il participer à l'augmentation de la résistance des bactéries pathogènes ? Les études menées ont montré que la diversité des gènes de résistance à l'ampicilline développés notamment à partir du gène est extrêmement importante. Suivant les séquences du gène, les antibiotiques auxquels il confère la résistance sont très nombreux, le phénomène augmentant avec le nombre de mutations, des séquences nouvelles étant apparues dans les bactéries pathogènes devenues résistantes à antibiotiques non encore développés.

Pour autant, le transfert des gènes provenant des OGM et les résistances induites ne sont observés qu'à des fréquences très faibles, qui ne présentent fondamentalement, au vu de la rapidité et de la richesse des échanges entre les bactéries dans le milieu, aucun risque supplémentaire significatif par rapport aux chaînes de résistance spontanément présentes parmi les bactéries de l'environnement. Du fait de la complexité extrême du sol, les bactéries sont intrinsèquement capables de développer des caractères antibiotiques et de résistance dont les chercheurs sont – entre autres phénomènes – encore très loin d'avoir pris la mesure.

En savoir plus : www.ampere-lab.fr

Quelques exemples d'outils opérationnels

L'étude de la nématofaune (ensemble des nématodes du sol) permet de disposer d'informations complexes sur la vie des sols et complémentaires aux analyses physicochimiques. Les nématodes incluent différents groupes fonctionnels : les nématodes phytophages (dont certains sont parasites des plantes) et les nématodes libres : prédateurs de bactéries, de champignons ou d'autres nématodes, et c'est pourquoi leur analyse normalisée permet de disposer d'éléments précis sur le fonctionnement biologique des sols. Cinq paramètres majeurs sont pris en compte pour l'analyse de la nématofaune au laboratoire ELISOL environnement : l'abondance de phytophages, l'abondance de nématodes libres, l'indice de structure, l'indice d'enrichissement, l'indice des voies de décomposition. La combinaison des indices de structure et d'enrichissement permet d'effectuer un diagnostic de la microchaîne trophique du sol, qui peut être appliqué à l'évaluation de perturbations ou de l'impact de pratiques dans les agrosystèmes et les écosystèmes naturels ou dégradés. Les déterminants de la qualité des sols sont complexes (sol, climat, occupation du sol et pratiques), c'est pourquoi il est nécessaire d'utiliser des référentiels construits en fonction de ces déterminants pour évaluer l'état du sol de façon pertinente. Par ailleurs, il est particulièrement intéressant de suivre les modifications intervenant après un changement (d'usage, de pratiques ou de mode de gestion) pour évaluer son effet sur le fonctionnement du sol. Les indicateurs fondés sur les nématodes sont, par exemple, utilisés pour mesurer l'impact des pollutions industrielles ou pour caractériser les évolutions liées à la conversion en agriculture biologique de parcelles agricoles conventionnelles.

Cécile VILLENAVE Elisol Environnement

Voir sa présentation*

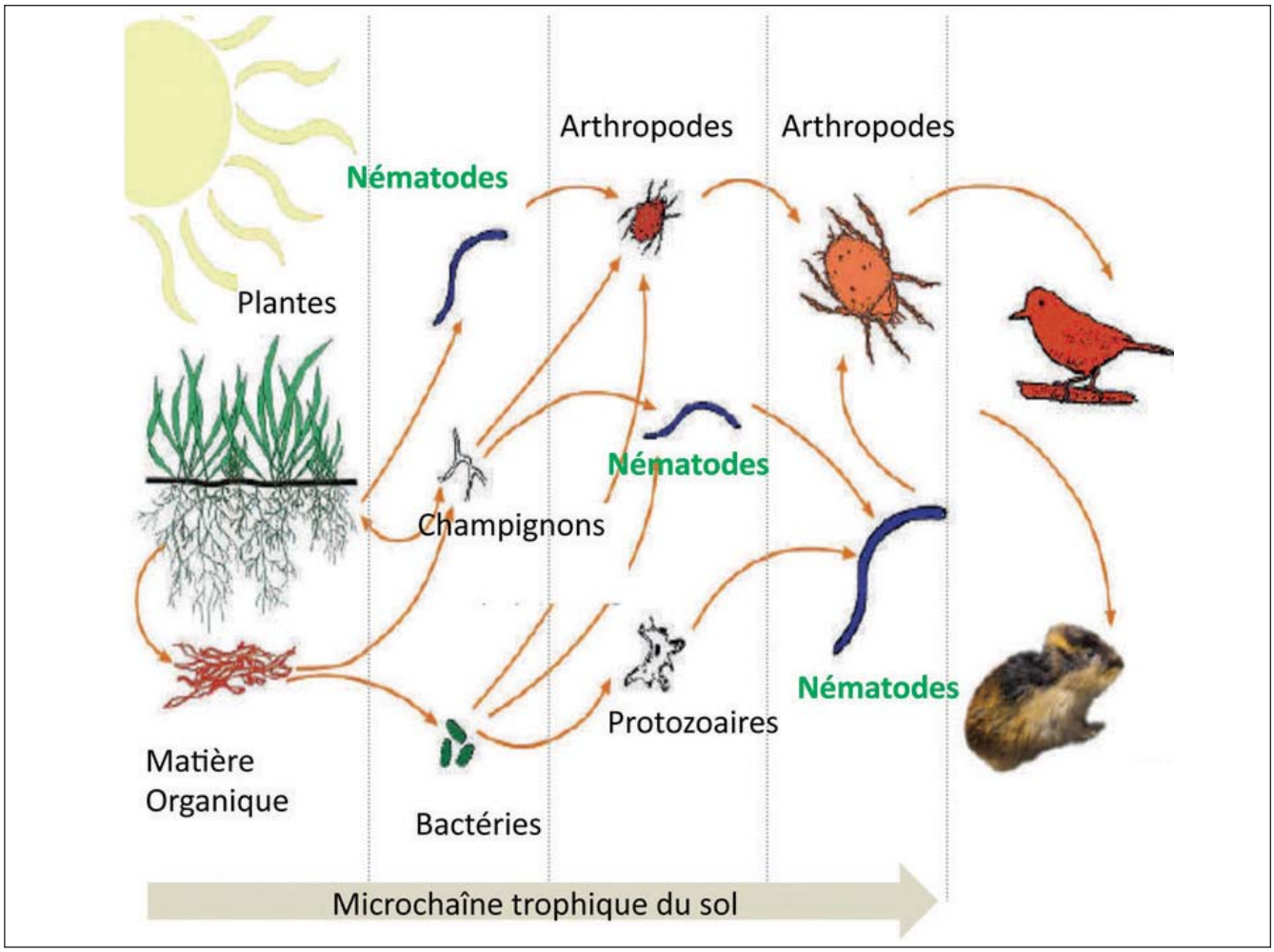
L'usager d'un bio-indicateur de la qualité du sol recherche des informations sur la santé du milieu et sur sa capacité à assumer ses fonctions clés. À l'instar des lichens ou des invertébrés utilisés pour évaluer la qualité de l'air et de l'eau, la nématofaune (communauté des nématodes du sol) peut être utilisée pour caractériser la qualité du sol.
La formation du sol exige des milliers d'années et les sols sont des milieux très divers constitués d'éléments minéraux, issus de l'altération de la roche mère, et d'éléments organiques provenant essentiellement de la décomposition de la végétation. Les fonctions portées par le sol sont nombreuses et assurées par les organismes vivants présents dans les sols. Connaître l'évolution des fonctions d'un sol passe par la caractérisation de la dynamique des organismes qu'il abrite. Les fonctions attendues du sol dépendent quant à elles de son usage, dont il faut tenir compte.

Tous les organismes présents dans le sol sont indispensables à la vie du sol. Ils sont classiquement décrits en fonction de leur taille. Les micro-organismes (bactéries et champignons) sont des éléments vivants de taille microscopique. De taille supérieure, mais toujours microscopique, on trouve dans le sol les nématodes et protozoaires (microfaune). La mésofaune rassemble quant-à-elle les organismes d'une taille de 1 mm environ : collemboles et acariens. Tous ces organismes interagissent entre eux, de manière très complexe, et pour une part trophique. La succession des organismes vivants organisés en fonction de leur source alimentaire (source trophique) constitue le réseau trophique ou chaîne trophique. Les matières organiques, mortes ou vivantes (racines), sont à la base de la microchaîne trophique du sol impliquant, micro-organismes, microfaune et mésofaune du sol. L'évaluation de la complexité et de la stabilité de cette microchaîne trophique du sol est une manière de caractériser l'état d'un sol.

Les nématodes sont des organismes vermiformes dont la longueur est de l'ordre de 1 mm, pour un diamètre de quelques dizaines de microns. Ce sont les métazoaires les plus abondants sur Terre. Plusieurs millions de nématodes sont présents par mètre carré de sol. Ils permettent donc d'obtenir de très nombreuses informations. Ils se situent à différents niveaux de la chaîne trophique et leur analyse permet de disposer d'éléments pertinents quant au réseau trophique complexe des sols.

Leur intérêt en tant qu'indicateurs de l'état du sol est lié à la prise en compte de la communauté des nématodes dans son ensemble et également aux caractéristiques intrinsèques de ces organismes. Ubiquistes et abondants, les nématodes sont sédentaires, donc caractéristiques du site où ils sont prélevés. Ils sont faciles à prélever et à étudier en laboratoire, sensibles aux perturbations, et présentent une forte diversité

* http://www.natureparif.fr/attachments/forumdesacteurs/Rencontres/Sols/15_CVILLENAVE_20062012.pdf



La microchaine trophique du sol.

fonctionnelle. Après prélèvement, l'abondance de différents groupes fonctionnels est étudiée. Plusieurs indices nématofauniques permettent aussi d'étudier certaines fonctions du sol. Ils constituent donc de bons bio-indicateurs : cet usage est issu de recherches scientifiques qui ont débuté dans les années 1990 aux Pays-Bas et il est assez développé dans différents pays du monde, à tel point que des méthodes d'étude normalisées (ISO 23611-4) ont été mises au point récemment.

Ces bio-indicateurs ont été développé pour les sols agricoles, mais ont rapidement été validés pour les sols pollués, et peuvent être utilisés dans les espaces naturels ou les espaces verts urbains et dans toutes les situations où l'on souhaite connaître l'évolution des sols. Pour réaliser les tests, des échantillons composites (regroupement homogénéisé d'échantillons élémentaires) de la couche superficielle sont prélevés à la tarière. Cinq cent grammes suffisent pour une analyse. Les nématodes sont extraits au laboratoire avant identification.

Cinq groupes trophiques majeurs de nématodes sont trouvés dans les sols. Le premier groupe trophique est celui des nématodes phytophages, qui se compose des phytophages obligatoires, susceptibles d'occasionner des dégâts aux plantes (y compris cultivées) et entraîner une perte de production primaire et des phytophages facultatifs. Les quatre autres groupes trophiques constituent le groupe des nématodes dits libres, car ils se développent librement dans le sol. Les nématodes bactérivores et fongivores jouent un rôle de régulateur du compartiment microbien ; leur quantification apporte des informations sur la dynamique de la matière organique et sur le recyclage des nutriments. Les nématodes omnivores et carnivores sont les nématodes les plus sensibles aux perturbations car ils se situent plus haut dans la chaîne trophique. Leur abondance et leur diversité renseignent donc sur le niveau de perturbation du sol.

Cinq grands paramètres sont pris en compte lors de l'analyse de la nématofaune au laboratoire ELISOL environnement :
- l'abondance des phytophages dont certains peuvent avoir un impact défavorable sur les cultures, en fonction des espèces de nématodes présentes et du type de cultures ;
- l'abondance des nématodes libres, qui apporte des informations sur le niveau de matière organique et l'activité biologique du sol :

© C. Villenave

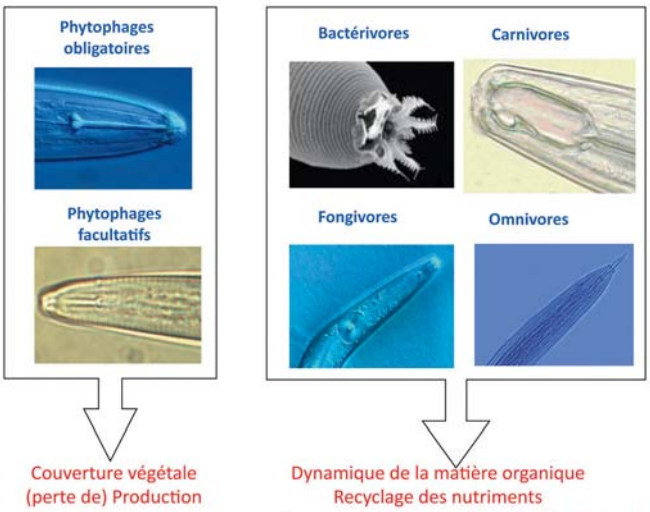
Un nématode phytoparasite : *Scutellonema cavenessi*.

© C. Villenave

Prélèvement de sol à la tarière
et réalisation d'un échantillon composite.

– l'indice de structure (SI), qui varie de 0 à 100 et renseigne sur la maturité et la stabilité du milieu ;
– l'indice d'enrichissement (EI) varie de 0 à 100 et apporte des informations sur la dynamique des flux de nutriments dans le sol ;
– l'indice des voies de décomposition (IVD), qui permet d'évaluer les parts de la décomposition liées aux voies de décomposition microbienne et fongique.

La combinaison des indices de structure (SI) et d'enrichissement (EI) permet de faire le diagnostic de la microchaîne trophique du sol. Si les deux indices sont faibles, cela signifie que le milieu est dominé par des espèces propres aux conditions d'un sol appauvri. Un indice de structure élevé signifie que les conditions sont matures et stables, riches, conditions dans lesquelles les nutriments sont disponibles ; les sols à SI élevés peuvent être des sols suppressifs (à l'opposé des sols conductifs) caractérisés par le fait que les agents pathogènes présents ne peuvent pas exprimer leur potentiel néfaste, car le sol contient une biodiversité suffisamment riche et complexe. Une baisse de l'indice de structure sera typique d'une perturbation de l'écosystème.

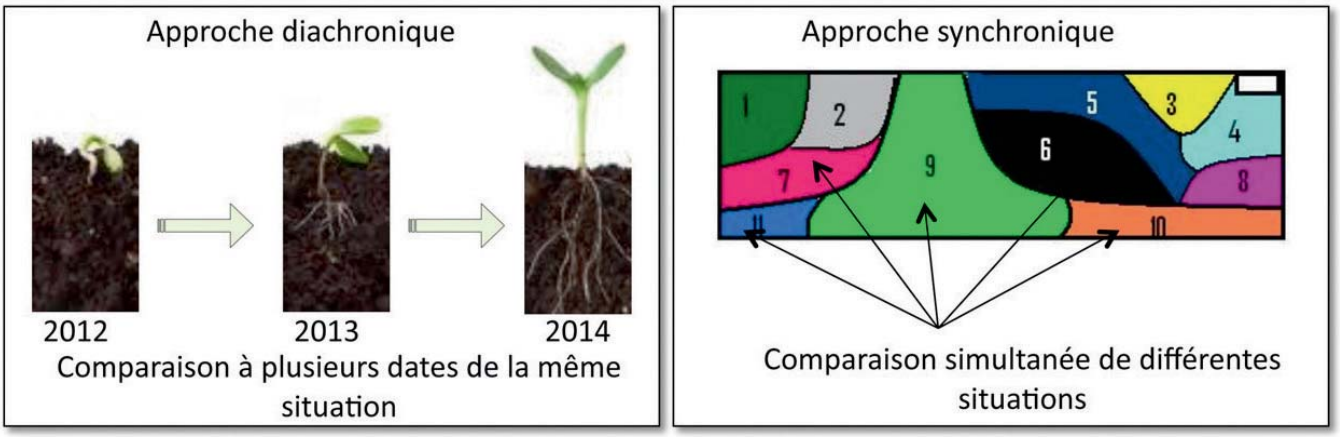


Les principaux types de nématodes du sol et leurs indications.

Quelques exemples d'évolution du SI et du EI pour illustrer leur utilisation : la mise en jachère d'un sol cultivé, sol enrichi et peu structuré, se traduira par une hausse de l'indice de structure et une baisse de l'indice d'enrichissement. Le défrichage d'une forêt se traduira par la perte des espèces sensibles, induisant une diminution du SI. Le labour d'une prairie permanente conduira également à une baisse de l'indice de structure. La connaissance de la microchaîne trophique permet donc d'évaluer la trajectoire après une perturbation.

Il est nécessaire de garder à l'esprit que la qualité d'un sol se décompose en deux parties: la qualité inhérente, déterminée par la pédogénèse, et qui n'évolue qu'à long terme, et la qualité dynamique, qui peut évoluer à court terme du fait de perturbations naturelles ou anthropiques positives ou négatives. Un indicateur biologique porte à la fois sur les deux dimensions, alors que les impacts, sur un même site, ne touchent que les qualités dynamiques. La qualité d'un sol ne dépend pas uniquement de ses usages et des pratiques mises en œuvre, mais également de son potentiel de départ (qualité inhérente). Pour un usage d'un sol, la qualité effective d'un sol peut être mauvaise par rapport à son potentiel (en fonction de son type ou de sa profondeur, notamment). Il est donc nécessaire de créer de multiples référentiels selon les types de sols et les usages. L'évaluation de la qualité d'un sol sur un site unique à partir des analyses de nématodes fait appel à ces référentiels afin de pouvoir interpréter de façon fine les résultats (Base de données ELIPTO© en cours de constitution).

Le plein potentiel de ces indicateurs biologiques s'exprime lorsque l'on étudie les modifications après un changement. Ces changements peuvent être reliés à des pratiques (modification d'une pratique agricole, création d'un jardin en ville) ou des perturbations (pollution accidentelle, etc.) Il est



Deux approches pour étudier les modifications suite à un changement de mode d'usage du sol, de pratiques agricoles, de mode de gestion d'un espace vert, suite à une perturbation anthropique (ex : pollution), suite à une réhabilitation d'un site.

possible d'adopter des approches synchroniques (comparaison simultanée des modalités contrastées) ou diachroniques (suivi dans le temps la même situation). Ces démarches permettant de contrôler le nombre de facteurs qui varient et de comprendre la relation de causalité afin d'aider la prise de décisions.

Dans le cas de l'étude d'une situation contaminée intégrée au projet Bio-indicateurs de l'ADEME, la pollution décroissait avec la distance de l'usine. Cela a permis d'étudier l'effet de pollutions métalliques de degrés variables en regard avec un site témoin dans des parcelles boisées. Les analyses ont montré que l'abondance des nématodes bactérivores, fongivores, phytophages, omnivores et prédateurs décroissent avec l'augmentation de la pollution. L'indice de structure est élevé dans la situation témoin, non contaminée, et est plus faible dans les situations contaminées, même pour un faible niveau de pollution.

L'effet de la conversion de l'agriculture conventionnelle au mode biologique a été étudié dans une exploitation viticole située en Languedoc-Roussillon (thèse de P. Coll, dirigée par C. Villenave et E. Lecadre). Les mesures réalisées dans des parcelles conventionnelles et en agriculture biologique depuis 7, 11 et 17 ans montrent une augmentation graduelle de l'abondance des nématodes phytophages, bactérivores et fongivores, et une stabilité des nématodes omnivores et prédateurs dans les parcelles biologiques. L'indice des voies de décomposition diminue avec l'augmentation de l'age de conversion. Cela montre que la quantité de matière organique a augmenté et que la part fongique a augmenté par rapport à la part bactérienne, ce qui atteste d'une matière organique plus complexe et plus difficile à transformer. Par contre, les valeurs des indices de structure et d'enrichissement sont comparables dans les quatre types de parcelles, signifiant que le milieu demeure perturbé et ne permet pas le développement d'une faune diversifiée.

En conclusion, les analyses biologiques présentées ici sont complémentaires aux analyses physico-chimiques classiques et apportent une dimension supplémentaire. Ainsi, l'abondance des nématodes montre le niveau d'activité biologique des sols, mais peut également renseigner sur le niveau de pollution. Les nématodes du sol, en tant qu'indicateurs biologiques de la qualité du sol, doivent être vus comme un outil de pilotage pour la gestion durable des sols, améliorant la connaissance de l'impact des pratiques. Enfin, ils constituent des outils de communication permettant de mesurer l'impact des usages et des pratiques sur la vie du sol, et pourraient être utilisés comme critères dans le cadre de nouvelles réglementations.

En savoir plus : www.elisol.fr

Les sols assurent des fonctions indispensables à la vie sur terre. Support des plantes, ils sont un réservoir de fertilité pour leur croissance. Ils stockent, filtrent et épurent l'eau grâce aux micro-organismes abondamment présents et à la lente percolation vers les nappes phréatiques. Ils absorbent une très grande quantité de carbone et sont aussi le siège des grands cycles de la matière. Une cuillère de sol contient des milliers d'organismes ! Pour l'essentiel microscopiques, ordinaires voire encore inconnus, mais qui jouent un rôle-clé dans le fonctionnement des sols.

Natureparif a été créée à l'initiative de la région Île-de-France avec le soutien de l'État français. De statut associatif, elle regroupe à leurs côtés au sein de collèges distincts les collectivités locales, les associations de protection de l'environnement, les établissements d'enseignement supérieur et de recherche, les chambres consulaires et les fédérations, et les entreprises publiques et privées. Agence pour la nature et la biodiversité en Île-de-France, sa mission est de collecter les connaissances existantes, de les mettre en réseau, d'identifier les priorités d'actions régionales. Elle a également vocation à recenser les bonnes pratiques visant à préserver la biodiversité pour qu'elles soient plus largement mises en œuvre.

Natureparif
Agence régionale pour la nature et la biodiversité
84 rue de Grenelle, 75007 Paris, France
+33 (0)1 75 77 79 00
www.natureparif.fr