



LE SOL

UNE RESSOURCE POUR LA VIE



Membre fondateur de



SOL, OBJET DE RECHERCHE, PLUS QUE JAMAIS

L'opinion internationale est aujourd'hui sensibilisée au rôle et à la préservation du sol. L'inquiétude se fait jour sur la disponibilité en terres cultivables et la capacité des sols à répondre à l'accroissement de la demande alimentaire mondiale. Le développement d'une production de biomasse végétale à des fins de production d'énergie a posé de manière nouvelle la question de l'usage des sols, de la concurrence à la production alimentaire, des effets sur les coûts des denrées alimentaires.

En France, le Grenelle de l'Environnement a appelé à un redéveloppement de l'agronomie comme condition indispensable à la mise au point de systèmes agricoles à la fois productifs et respectueux de l'environnement. La nécessité de maîtriser l'artificialisation des sols causée par l'extension des villes et des réseaux de transport s'y est exprimée fortement.

La prise de conscience du caractère fini des ressources, et de la fragilité du système planétaire lui-même, s'étend désormais au sol. La communauté des chercheurs en sciences du sol a pleinement contribué à jouer son rôle d'alerte grâce à son ouverture vers les sciences de l'écologie. Elle a fait émerger des problématiques majeures comme le rôle du sol dans le changement climatique ou comme composante essentielle de la biodiversité.

Grâce à sa connaissance des activités agricoles et forestières, au développement de ses recherches sur l'environnement, les ressources en eau ou les échanges avec l'atmosphère, à la proximité d'une recherche avancée en sciences du végétal et en microbiologie, avantage majeur pour comprendre les interactions complexes, l'Inra a contribué à ce domaine, ce qui lui a conféré un rôle de référence en Europe. L'Inra assure la gestion du système d'information national sur les sols et leurs qualités.

Le chantier "Agroécologie" de l'Inra a montré le rôle essentiel du sol dans l'alimentation et la protection des plantes, la régulation des grands cycles biogéochimiques, l'organisation des agrosystèmes dans les paysages.

Non seulement notre nourriture mais la biosphère entière, dépendent de ces quelques décimètres de roche altérée qui couvrent les continents. Cela impose une vision intégrée du sol dans laquelle agriculture, alimentation et environnement sont étroitement imbriqués.

Le sol a permis l'extension de la vie à la surface des continents et le développement des végétaux supérieurs. Fragile, menacé, extraordinairement divers, il joue, de tout temps et aujourd'hui plus que jamais, un rôle déterminant : produire les aliments, réguler le cycle et la qualité de l'eau, accumuler du carbone et limiter l'effet de serre, recycler les matières organiques, entretenir la biodiversité, fournir des matériaux pour la construction et l'industrie, participer à la valeur esthétique des paysages...

Le sol provient des roches altérées par des processus liés à l'eau, à l'air, aux organismes vivants... de très longue durée, du millénaire ou même de la dizaine de millénaires. Compte tenu de la durée de sa genèse, il faut penser le sol comme une ressource essentielle à préserver.

QUELQUES CHIFFRES

> Il faut environ 500 ans pour former 5 cm de sol [Inra Orléans].

> La ressource en sols cultivés et cultivables est beaucoup plus limitée que l'on ne pourrait le croire : 5,5 % de la surface totale du globe, les forêts non comprises ; cela représente 22 % des terres émergées c'est-à-dire 3,3 milliards d'hectares dont seulement la moitié est cultivée [FAO, AFES 2008].

> Toutes causes confondues, 3,77 milliards d'hectares des sols dans le monde sont concernés par des dégradations diverses dont une partie est liée à des processus naturels sur lesquels l'homme a peu de moyens d'actions [IRD 2006].

> L'érosion est, pour la Commission européenne, la principale menace pesant sur les sols. On évalue à environ 17 % la surface du territoire européen affectée par l'érosion, à des degrés divers (Institut français de l'Environnement, 2006). 18 % de la surface du territoire français sont concernés par un risque d'érosion moyen à très fort [Inra Orléans].

> Les matières organiques du sol constituent le réservoir de carbone organique le plus important, devant la biomasse des végétaux. Le premier mètre des sols mondiaux stocke entre 1 500 et 2 400 milliards de tonnes de carbone organique. Une réduction de 5 % des stocks représenterait l'équivalent de deux à quatre années d'émissions. La préservation du capital carbone (réduction de l'artificialisation, de la déforestation, du retournement des prairies...) constitue une composante importante de la lutte contre le changement climatique [Ademe 2014].

> L'épuisement des nutriments engendré par une culture continue avec peu ou sans intrants limite la productivité dans de vastes régions montagneuses tropicales et subtropicales. Le simple ajout de fumier ou d'engrais peut faire passer le rendement d'une culture de 0,5 à 6-8 tonnes de céréales à l'hectare [PNUE 2004].

> L'artificialisation des sols, c'est-à-dire leur destruction du fait de l'urbanisation au sens large (habitat mais aussi infrastructures de transports et zones industrielles...), est une menace importante. En France, les zones urbaines ont augmenté de 4,8 % de 1990 à 2000. L'artificialisation est d'autant plus préoccupante que les terres grignotées autour des centres urbains sont, en général, d'un grand intérêt pour la production agricole.

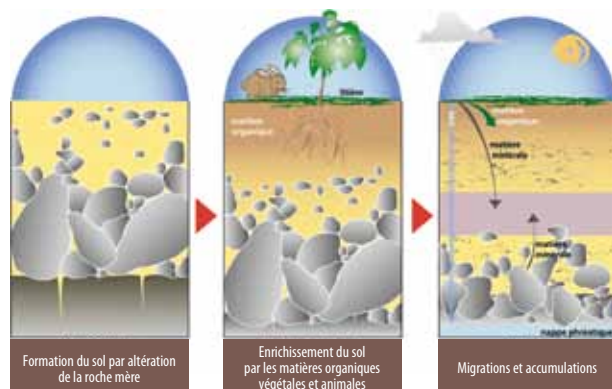
> Chaque année, environ 1,8 million de tonnes de matières sèches de boues de stations d'épuration sont produites en France, dont 48 % de boues urbaines et 52 % de boues industrielles. 55 % de ces boues sont épandues sous une forme ou une autre sur les sols agricoles ; ce qui constitue une baisse sensible par rapport à 1998 (62 %). Ces épandages se font sur 3 % de la surface agricole utile. Jusque-là surtout pratiqués sur les terres agricoles, les épandages sont de plus en plus répandus sur les parcelles boisées [Institut français de l'Environnement 2006].

> Sur un hectare de sol, on recense entre 1 à 5 tonnes de vers de terre et autres petits animaux, 3 tonnes de champignons microscopiques, 1,5 tonne de bactéries [UMR Agroécologie, 2014].

FORMATION, FONCTIONS, USAGES, MENACES...

>FORMATION

Le sol provient de la décomposition et de l'altération des roches par l'action de l'eau, de l'air et des êtres vivants. Au cours du temps, le sol s'épaissit et se modifie; il acquiert des constituants (matières organiques, argiles...), des structures et des couleurs... qui lui sont spécifiques. Ses caractéristiques et ses propriétés changent en fonction des roches, des reliefs, des climats, de la végétation et de son âge. Le sol se forme très lentement, mais ses propriétés évoluent rapidement : structure, porosité, activité biologique, teneurs en certains éléments nutritifs.



>LES GRANDES FONCTIONS DU SOL

| | |
|-------------------------|--|
| PRODUCTION AGRICOLE | <p>> Production alimentaire le sol a pour fonction essentielle d'assurer la production végétale, source d'alimentation pour l'animal et pour l'homme. Il fournit des éléments nutritifs indispensables à la plante</p> <p>> Production de biomasse pour l'énergie et matériaux (bois)</p> |
| STOCKAGE DE CARBONE | le sol est un régulateur de l'effet de serre. Il est l'un des principaux réservoirs de carbone et a donc un impact sur le changement climatique |
| RÉSERVOIR D'EAU | pour les plantes, les nappes phréatiques et les cours d'eau |
| PATRIMOINE | géologique, paysager, archéologique |
| ACTIVITÉS NON AGRICOLES | habitat, industries, infrastructures |
| BIODIVERSITÉ | le sol héberge une densité de microorganismes pouvant atteindre 10 ⁹ par gramme. Ils contribuent à la formation des sols, aux cycles géochimiques, à la santé et à la croissance des plantes; ils constituent un fantastique réservoir de biodiversité qu'il est important de préserver. Ils transforment l'azote en nitrates assimilables par les végétaux |
| MATIÈRES PREMIÈRES | pour le bâtiment et l'industrie : graviers, sables, pierres, briques, métaux usuels et précieux... |
| FILTRE | pour la qualité de l'eau. Le sol dégrade par ses microorganismes les produits épanchés, solides ou liquides, minéraux ou organiques, d'origines industrielle, urbaine, agricole (lisiers, boues...) |

>USAGES ET QUALITÉ

Le Réseau de Mesures de la Qualité des Sols (RMQS) constitue un cadre national pour l'observation de l'évolution de la qualité des sols, fondé sur le suivi de 2 200 sites régulièrement répartis sur le territoire français. Son objectif est de produire des données quantitatives pour caractériser l'état des sols et mesurer l'évolution de leur qualité afin qu'ils puissent être pris en compte dans les décisions environnementales et territoriales et être gérés durablement. Ce réseau est piloté par le Groupement d'Intérêt Scientifique Sol (GIS Sol), créé en 2001 par les ministères de l'Agriculture et de l'Environnement, l'Inra, l'Ademe, l'Institut français de l'Environnement et l'IRD. Il est mis en œuvre par l'unité Infosol de l'Inra d'Orléans, avec la contribution de l'IRD pour les territoires français d'outre-mer. 2015 verra le démarrage de la seconde campagne de surveillance des sols.

Brun noir
matières organiques,
manganèse (MnO₂)



Rouge sang
hématites (oxydes
ferriques : Fe₂O₃)



Beige
goethite (hydroxydes
ferriques : FeO(OH))



Couleurs pâles
perte de fer



Bleu - Grisâtre
présence de fer ferreux



Blanc
carbonates sels solubles
tels les chlorures

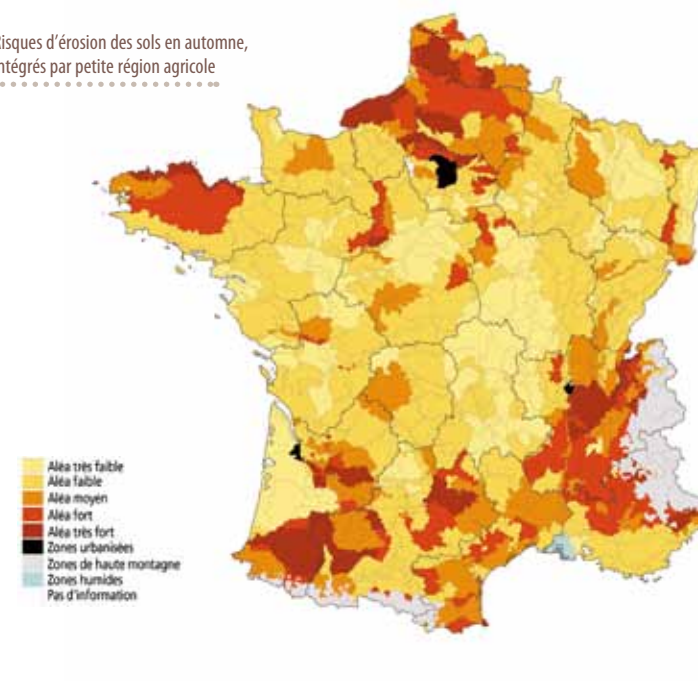


>MENACES

Les sols ont un rôle déterminant pour les sociétés, mais des menaces pèsent sur leur durabilité : l'érosion, la baisse des teneurs en matières organiques, la contamination (locale et diffuse), l'imperméabilisation (recouvrement des sols par les infrastructures), le tassement, la diminution de la biodiversité, la salinisation, les inondations et les glissements de terrain.

La dégradation des sols a aussi d'importantes répercussions sur d'autres domaines d'intérêt général, tels que la protection des eaux superficielles et souterraines, la santé humaine, le changement climatique, la protection des paysages et de la biodiversité et la sécurité des aliments.

Risques d'érosion des sols en automne,
intégrés par petite région agricole



Aléa très faible
Aléa faible
Aléa moyen
Aléa fort
Aléa très fort
Zones urbanisées
Zones de haute montagne
Zones humides
Pas d'information

LES OBSERVATOIRES DE RECHERCHE EN ENVIRONNEMENT

Un ORE est un dispositif d'acquisition de données composé souvent de plusieurs sites géographiques présentant des contextes écologiques variés et conjuguant observations et expérimentations de longue durée. Son objectif est d'acquérir des séries chronologiques de données sur des temps significatifs du fonctionnement des écosystèmes, pour caractériser dans l'espace et suivre dans le temps, l'état des milieux et des ressources, les impacts des changements globaux, climatiques et liés aux activités humaines comme l'usage des engrais et des pesticides. Les sept ORE, dont l'Inra assure la responsabilité, sont des outils conçus pour suivre et comprendre ces évolutions. Ils traitent 3 grands types de problématiques, liées aux effets des modes de gestion des ressources :

- > fonction hydrologique du sol et son rôle dans l'élaboration de la qualité de l'eau, notamment en lien avec les pollutions d'origine agricole et l'érosion
- > dynamique de la matière organique et des éléments dans les sols en relation avec la biodiversité dans les fonctions des sols
- > qualité des recyclages des déchets organiques : impacts positifs et négatifs, dont le risque de pollutions des sols.

QU'EST-CE QUE LE SOL ?

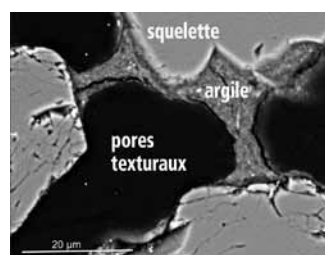
STRUCTURE DU SOL ET TRANSFERTS D'EAU ET DE GAZ

>STRUCTURE

La structure des sols, c'est-à-dire l'arrangement des constituants solides des sols entre lesquels subsistent des vides, est fondamentale en raison du rôle qu'elle joue dans le fonctionnement des sols (circulation, filtrage eau, échanges gazeux...) et dans l'habitat des organismes vivants (faune, flore). Cette structure évolue en permanence en fonction de facteurs climatiques (pluie, évaporation, gel...), biologiques (lombriciens, racines...) et anthropiques (travail du sol, passages d'engins...) qui peuvent entraîner des processus comme le tassement, l'agrégation, la fragmentation, la fissuration, la désagrégation...

>LES PORES DU SOL

Les pores du sol forment un réseau dans lequel circulent l'eau et les gaz. La taille des pores varie de quelques nanomètres (10^{-9} m) à quelques centimètres. Les pores sont tous reliés entre eux, même si la liaison ne se fait, dans un certain nombre de cas, que par l'intermédiaire de pores de très petite taille.

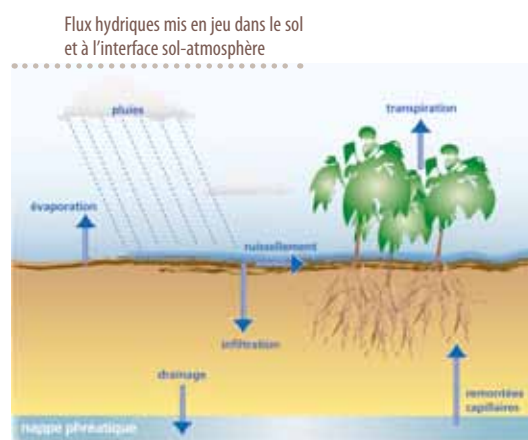


Les pores du sol ont des origines différentes :

- les éléments structuraux terreux, agrégats ou mottes, ménagent des vides entre eux, du fait de l'activité biologique, des cycles de dessiccation-humectation ou de gel-dégel liés au climat, et des opérations agricoles. Ces vides, appelés pores structuraux ou macropores, sont visibles à l'œil nu (diamètre supérieur à quelques centaines de microns) ;
- à une échelle plus fine (de quelques dizaines de micromètres à quelques nanomètres) d'autres pores constituent la majeure partie de la porosité du sol. Ils résultent de l'assemblage des particules de sable et de limon avec les constituants argileux, et de l'arrangement des minéraux argileux en feuillets. Ces pores texturaux sont parfois appelés micropores.

>LA STRUCTURE DU SOL ET LE CYCLE DE L'EAU

Le sol joue un rôle fondamental dans le cycle des eaux continentales. La structure des sols détermine la proportion de l'eau qui ruisselle et de l'eau qui s'infiltré. Après une pluie, les sols les plus poreux laissent l'eau s'infiltrer rapidement et évitent ainsi l'accumulation d'eau à la surface, ou le ruissellement s'il y a une pente. Le sol participe à réguler le régime des cours d'eau, la recharge des nappes phréatiques. Il filtre et épure les eaux qui le traversent, et influence en cela la composition chimique et biologique des eaux. Cette capacité a cependant des limites : les sols gravement pollués (par des activités industrielles ou agricoles) transmettent une partie de leur pollution aux eaux qui les traversent.



Croûte de battance développée à la surface du sol, en cours de fissuration par le dessèchement.

>LES PORES ET L'EAU

L'aptitude d'un sol à l'infiltration de l'eau ou à son stockage, qui conditionne notamment sa disponibilité pour la plante, est fonction de la taille des pores et de leur organisation dans l'espace. Ceux de grande taille favorisent la circulation rapide de l'eau mais en revanche ne permettent pas de la stocker. À l'opposé, l'eau circule lentement dans les pores de petite taille, ceux-ci assurant son stockage dans le sol.

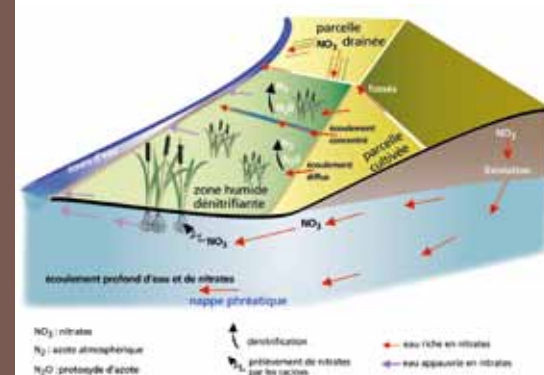
Lorsqu'un sol sèche, les pores se vident de leur eau et se déforment suite à des réorganisations au sein de la phase argileuse. Il en résulte une diminution du volume des agrégats ou des mottes. L'espace entre les éléments structuraux augmente et des fissures se développent. Lors de la réhumectation, l'argile gonfle, les éléments structuraux augmentent de volume et les fissures se referment. La réhumectation peut aussi être à l'origine de la création de fissures lorsqu'elle est suffisamment rapide pour créer des hétérogénéités de teneur en eau et ainsi des tensions mécaniques, suite à des différences de gonflement.

- **Croûte de battance :**
- Phénomène par lequel
- les premiers millimètres du sol
- se désagrègent sous l'action
- des pluies. Les gouttes d'eau
- détachent des particules de terre
- et les délitent ; ces éléments fins
- comblent les pores du sol, ce qui
- crée une pellicule, appelée
- croûte de battance, au travers
- de laquelle l'eau ne s'infiltré
- que très faiblement.

EXEMPLE DE RECHERCHE

LE RÔLE ÉPURATEUR DES EAUX DES ZONES HUMIDES

Des observations ont montré la diminution des concentrations en nitrate des eaux traversant des zones humides bordant les cours d'eau. D'où l'idée d'utiliser ces zones comme moyen de préserver ou de restaurer la qualité des eaux superficielles, d'autant plus qu'elles sont reconnues comme réservoirs de biodiversité. Cependant, ces zones humides peuvent avoir des conséquences contrastées sur l'environnement : si elles permettent une diminution des nitrates d'origine agricole dans les eaux superficielles, elles peuvent aussi être des zones d'émission du protoxyde d'azote, un puissant gaz à effet de serre. Les recherches actuelles portent sur l'ensemble des services écosystémiques rendus par les zones humides, mais également par les sols, que ces services soient bénéfiques ou non pour l'environnement, en particulier vis-à-vis du cycle de l'azote. Les recherches concernent également le rôle de la structure du sol sur les transferts d'eau et de gaz, par la modélisation.



SOL ET MATIÈRE ORGANIQUE

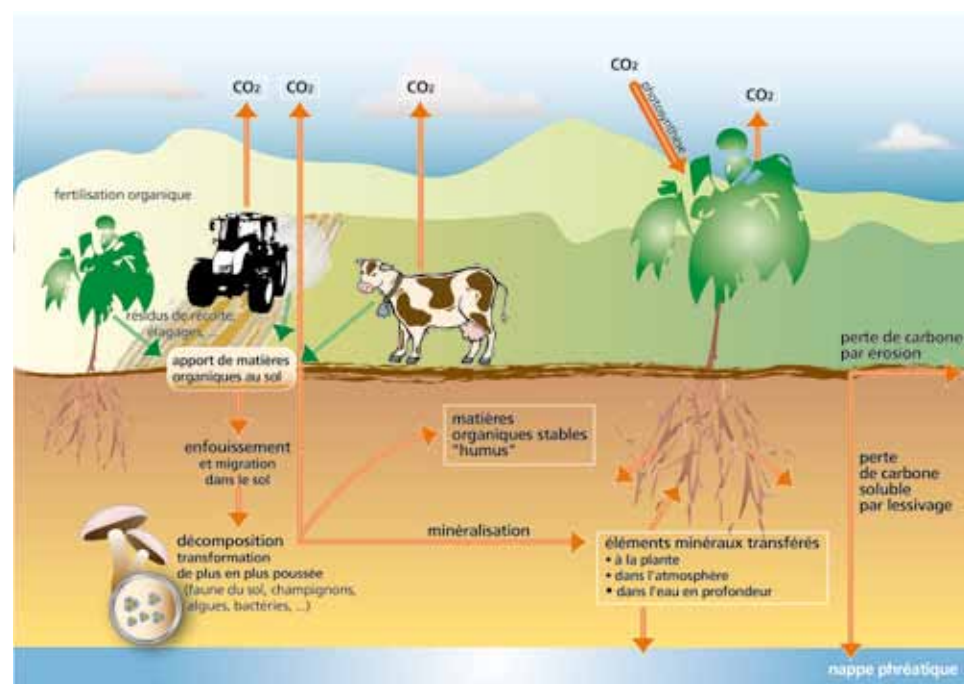
La matière organique du sol est l'ensemble des organismes vivants et morts présents dans le sol (végétaux, animaux ou microorganismes) et leurs résidus organiques à différents stades de leur évolution, débris végétaux grossiers, macromolécules ou molécules simples (humus). Elle est constituée de composés organiques ; outre le carbone et l'eau qui en sont les composants essentiels, elle peut contenir aussi de l'azote, de l'hydrogène, de l'oxygène, du phosphore, du soufre, du fer...

Avec la biomasse* végétale, c'est l'un des principaux lieux de stockage du carbone. Elle est une composante importante et sensible de la fertilité des sols et de leur résistance à la dégradation ou à l'érosion.

La baisse des teneurs en matières organiques est une des menaces affectant la qualité des sols. Pour compenser ce déficit, des produits résiduels organiques d'origines agricole, industrielle, urbaine, sont utilisés en agriculture.

Les effets de l'apport de matières organiques ont été étudiés selon différents critères : maintien ou augmentation de leur teneur dans le sol, séquestration de carbone, stabilité de la structure des sols (les matières organiques jouant un rôle important sur la cohésion des particules et réduisant l'érosion par l'eau), fertilisation par l'azote, activité et nombre de microorganismes, abondance et activité de la macrofaune (lombriciens), flux des éléments traces, existence et persistance des germes pathogènes.

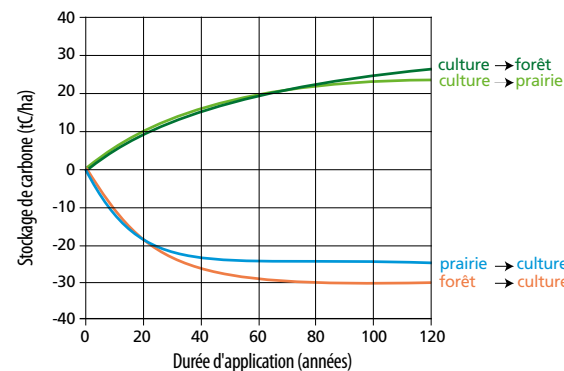
*Biomasse : masse totale de matière organique d'origines animale ou végétale.



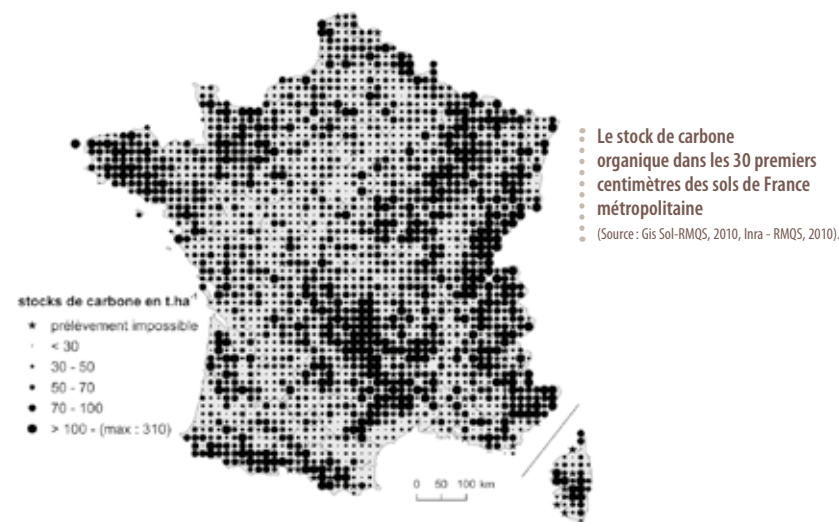
- Cycle du carbone
- La transformation (minéralisation) de l'azote par les microorganismes (bactéries) est indispensable pour qu'il soit utilisable par les plantes pour leur croissance.

> CHANGEMENT CLIMATIQUE ET STOCKAGE DE CARBONE DANS LE SOL

Le sol influence la composition de l'atmosphère. En particulier, il stocke et relâche des gaz à effet de serre. Le sol est un puits pour le carbone (au niveau mondial, il y a dans les sols trois fois plus de carbone que dans la végétation, deux à trois fois plus que dans l'atmosphère) ; certains modes de gestion des sols accumulent le carbone dans les sols. Or, accumuler du carbone dans les sols (principalement dans la matière organique) est généralement bénéfique pour leur fertilité agricole et pour diminuer la richesse en CO₂ de l'atmosphère : le sol est l'un des acteurs majeurs des évolutions climatiques.



- Évolutions du stock de carbone dans le sol associées aux changements d'usage : passage d'un système de cultures à la forêt ou à la prairie qui permet de stocker du carbone ou inversement, de la prairie et de la forêt à des cultures qui entraîne un déstockage de carbone (Expertise scientifique collective, Inra 2002).



- Le stock de carbone organique dans les 30 premiers centimètres des sols de France métropolitaine (Source : Gis Sol-RMQS, 2010, Inra - RMQS, 2010).

UNE EXPERTISE SCIENTIFIQUE COLLECTIVE SUR L'UTILISATION DES MATIÈRES FERTILISANTES RÉSIDUAIRES SUR LES SOLS

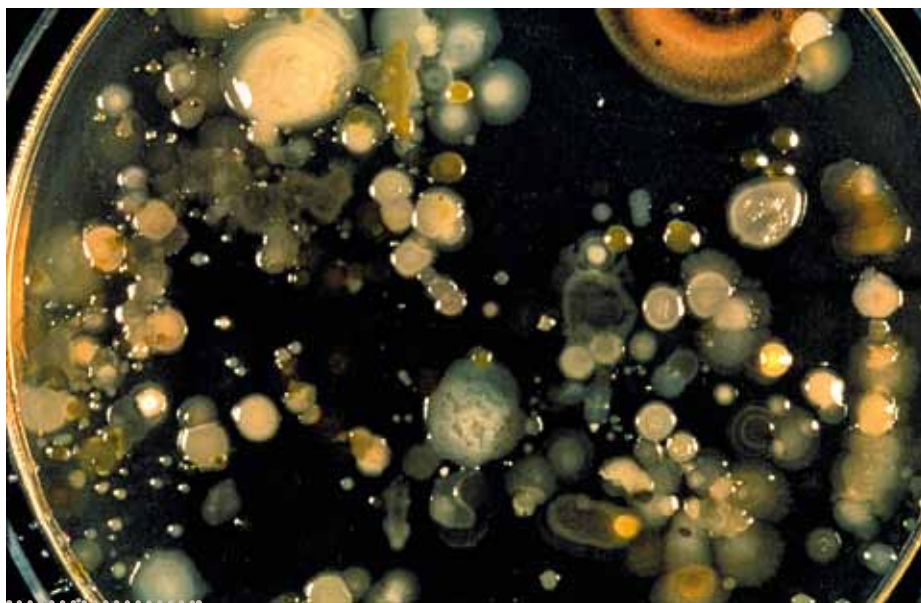
Les effluents d'élevage, boues de station d'épuration, déchets organiques urbains et effluents industriels - qualifiés de matières fertilisantes d'origine résiduelle (Mafor) - constituent des sources d'éléments fertilisants et de matière organique pour fertiliser ou amender les sols agricoles ou forestiers. Mais l'épandage de Mafor sur les sols ne peut être envisagé que si les risques associés sont acceptables pour l'environnement et l'Homme. Afin de maîtriser au mieux et de réguler, si nécessaire, l'utilisation de ces matières, les ministères français en charge de l'agriculture et de l'écologie ont demandé à l'Inra, au CNRS et à l'Irstea de réaliser une expertise scientifique collective (ESCO) sur les bénéfices agronomiques des Mafor et les impacts de leur épandage en termes de contaminations potentielles des écosystèmes, en tenant compte des intérêts, contraintes et conséquences économiques et sociales de cette pratique. En effet, les pouvoirs publics se trouvent aujourd'hui confrontés à de plus en plus de questions sur l'évaluation des bénéfices et des risques associés à l'utilisation des Mafor. Cette analyse des connaissances scientifiques pourra contribuer à faire évoluer les critères sur lesquels fonder la mise à disposition de ces matières aux utilisateurs finaux, ainsi que les règles encadrant leur épandage. L'ensemble des résultats de cette ESCO est désormais disponible : <https://www6.paris.inra.fr/depe/Projets/Mafor>

BIOLOGIE DU SOL ET AGROÉCOLOGIE

> LES MICROORGANISMES, UN IMMENSE RÉSERVOIR DE BIODIVERSITÉ

Les microorganismes du sol comprennent des microbes (archées, bactéries, champignons) et la microfaune (animaux de moins de 0,1 mm).

Les sols comportent une densité de microorganismes pouvant atteindre un milliard par gramme et une très grande diversité : quelques dizaines à centaines de milliers de groupes bactériens par gramme. Ces microorganismes contribuent à la formation des sols, aux cycles géochimiques (azote, carbone, phosphore, fer...), à la santé et à la croissance des plantes. Ils constituent un fantastique réservoir de biodiversité. Les outils scientifiques récents permettent d'avoir un meilleur accès à ces communautés, essentielles au fonctionnement des écosystèmes terrestres, mais encore largement méconnues.



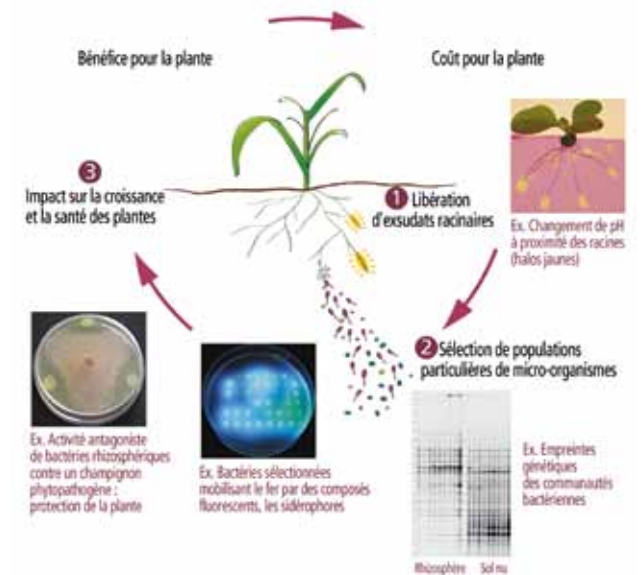
Isolement bactérien à partir d'un gramme de terre. On détecte jusqu'à 1 milliard de microorganismes.

> CONNAISSANCE ET GESTION DE LA DIVERSITÉ MICROBIENNE DANS LA RHIZOSPHÈRE

UN ENJEU MAJEUR DES RECHERCHES EN AGROÉCOLOGIE

La connaissance des populations microbiennes du sol et la compréhension de leurs relations complexes avec la plante constituent des voies de progrès importantes pour l'évolution des pratiques agricoles vers des systèmes de cultures moins consommateurs en intrants de synthèse, et plus respectueux de l'environnement.

La libération d'une part significative des produits de photosynthèse de la plante ($\approx 20\%$) sous forme de rhizodépôts constitue une source majeure de composés organiques pour la microflore hétérotrophe du sol qui est principalement en état de stase, du fait de la forte compétition nutritionnelle régnant au niveau du sol. Ainsi, la densité et l'activité de la microflore sont significativement plus élevées dans la rhizosphère, définie comme la zone incluant les racines et le sol y adhérent, que dans le sol nu.



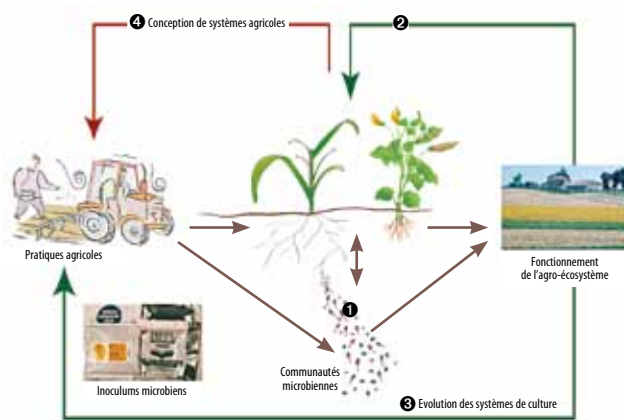
LA PLANTE INFLUENCE LES POPULATIONS MICROBIENNES DU SOL

Parmi l'immense biodiversité microbienne tellurique, la plante sélectionne des populations particulières bien adaptées à l'environnement rhizosphérique. L'environnement ainsi constitué diffère selon le génotype de la plante. Cette sélection repose sur l'aptitude physiologique des populations microbiennes à tirer au mieux profit des composés organiques libérés, mais également sur une signalisation moléculaire à l'origine de phénomènes de reconnaissance spécifique.

Le maintien de la libération des rhizodépôts au cours de l'évolution végétale, et sa généralité au sein du règne végétal, suggèrent que le coût énergétique correspondant est compensé par des bénéfices pour la plante. Ainsi, il a été suggéré que les populations microbiennes sélectionnées par la plante seraient favorables à sa croissance et à sa santé, et contribueraient à son adaptation en situations de faible fertilité (ex: champignons mycorrhizogènes et bactéries fixatrices d'azote) et/ou de fortes densités de populations pathogènes.

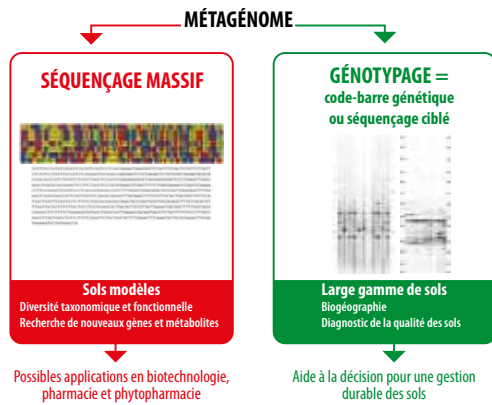
Le phénomène de déclin du piétin échaudage du blé a ainsi été attribué à la sélection par les racines infectées par l'agent pathogène de populations bactériennes productrices d'antibiotiques, ce qui a probablement contribué au maintien de cette espèce végétale. D'une façon générale, il semble que le maintien des espèces végétales en situations peu anthropisées ait reposé sur des processus de co-évolution plantes-microorganismes impliquant des bénéfices réciproques. Ces processus sont pour certains d'entre eux très anciens, estimés à 50 et 400 millions d'années, pour respectivement les symbioses bactériennes fixatrices d'azote et pour les symbioses endomycorhiziennes.

Interactions plantes-microorganismes dans la rhizosphère



Enjeux des recherches en agroécologie en relation avec la gestion des communautés microbiennes du sol

- Il existe une immense diversité microbienne dans les sols dont le fonctionnement impacte le fonctionnement de l'agroécosystème (productivité agricole, services écosystémiques) ①.
- L'évolution correspondante (incluant le changement et la variabilité climatiques) impacte en retour la biodiversité et son fonctionnement ② et se traduit par une évolution des systèmes agricoles ③.
- L'enjeu des recherches en agroécologie vise à proposer des systèmes (incluant génotypes de plantes et inoculum microbiens) qui valorisent des interactions biotiques, en particulier plantes-microorganismes pour de meilleurs services écosystémiques ④.

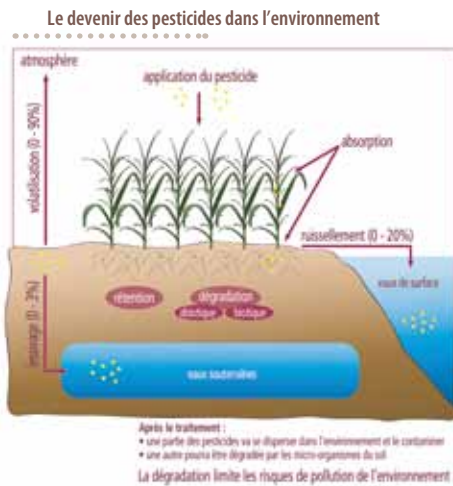


Stratégies pour l'analyse du métagénome des sols
Le métagénome d'un sol correspond à l'ensemble des génomes de ce sol. Il est analysé à partir de l'ADN extrait du sol. Deux stratégies complémentaires sont suivies. L'une repose sur le génotypage (empreintes moléculaires ou séquençage) de séquences cibles à valeur taxonomique ou fonctionnelle. Cette stratégie permet l'analyse d'une large gamme de sols, et donc la formulation d'un diagnostic de la qualité biologique des sols. L'autre stratégie consiste à réaliser un séquençage massif de l'ADN extrait. Compte tenu du coût représenté, cette stratégie ne peut s'appliquer qu'à un nombre limité de sols. Cette stratégie vise à chercher de nouveaux gènes, expliquant le fonctionnement biologique des sols, et de nouveaux métabolites ayant des applications potentielles en biotechnologie, pharmacie et phytopharmacie.

> DÉGRADATION DES PRODUITS PHYTOSANITAIRES PAR LES MICROORGANISMES DU SOL

Malgré les connaissances actuelles mobilisées pour limiter l'usage de pesticides, toute l'agriculture ne pourra pas, au moins dans un futur proche, envisager de se passer des produits phytosanitaires. Dès lors, il est crucial de comprendre l'écodynamique des pesticides dans les agrosystèmes et, notamment, de favoriser la fonction épuratrice des sols agricoles. En effet, les sols hébergent de nombreuses espèces microbiennes dont certaines sont capables de dégrader les pesticides diminuant ainsi leur persistance dans le sol, et limitant le risque de leur dispersion dans les autres compartiments de l'environnement (eau, air). Certains microorganismes du sol sont même capables de s'adapter à une biodégradation accélérée des pesticides. Grâce à des

processus adaptatifs, ils font l'acquisition de gènes codant des enzymes de dégradation leur permettant de dégrader entièrement des pesticides. Ces microorganismes utilisent les pesticides comme une source de nutriments et d'énergie pour leur croissance. Même si ce phénomène a été observé pour de nombreux pesticides (2,4-D, atrazine, isoproturon...), la transformation microbienne des pesticides peut être incomplète ou défailante et conduire à la production d'intermédiaires métaboliques pouvant être tout aussi toxiques que les molécules d'origine. Pour pallier l'insuffisance de l'activité des microorganismes dégradant les pesticides, il est possible de développer des approches d'ingénierie écologique permettant de créer un environnement physico-chimique et nutritif pour stimuler le potentiel épurateur des sols agricoles. Par exemple, l'apport de matière organique ou le chaulage des sols



acides peut stimuler la dégradation de pesticides tels que l'atrazine, une substance phytosanitaire polluante très rémanente maintenant interdite. Des travaux récents montrent que l'inoculation de souches microbiennes dégradantes, préalablement sélectionnées, pourrait améliorer la fonction épuratrice des sols agricoles.

DES CONNAISSANCES PROMETTEUSES MAIS ENCORE TRÈS PARTIELLES

Notre compréhension de ces processus co-évolutifs demeure encore limitée du fait de notre connaissance très partielle de la biodiversité des sols. Jusqu'à un passé récent, nous n'avions en effet accès qu'aux populations dites cultivables, qui ne représentent que quelques pourcents de la diversité totale. Les développements techniques relatifs à l'extraction de l'ADN des sols, à l'analyse de son polymorphisme, et plus récemment au séquençage haut-débit permettent maintenant d'analyser la diversité génétique des communautés microbiennes. Notre connaissance fragmentaire de ces processus co-évolutifs est également liée à l'insuffisante prise en compte du partenaire végétal lors des études d'écologie de la rhizosphère. L'association de compétences en écologie microbienne, génétique et écophysiologie végétale doit permettre d'identifier des traits génétiques végétaux contribuant à la sélection de populations telluriques favorables, afin d'obtenir à terme des idéotypes végétaux nécessitant moins d'intrants. Cette approche s'intègre dans les recherches en agroécologie qui visent à proposer des systèmes de culture innovants tirant profit des interactions entre communautés; elle permettra de valoriser les rhizodépôts représentant une partie significative de la production primaire des plantes.

> LES VERS DE TERRE

La faune du sol représente plus de 80 % de la biodiversité animale terrestre et regroupe, en 4 catégories de taille, un grand nombre de familles et d'espèces :

- la microfaune, de taille inférieure à 0,2 mm comprenant nématodes, protozoaires, rotifères ;
- la mésofaune, entre 0,2 et 4 mm comprenant acariens, collemboles, protozoaires, diptères, symphiles, enchytréides ;
- la macrofaune, de taille supérieure à 4 mm comprenant insectes, arachnides, myriapodes, mollusques et lombricidés ;
- on parle parfois également de "mégafaune" à propos de certains mammifères comme les taupes ou les campagnols.

Certaines espèces ne sont pas uniquement des habitants du sol, mais font partie intégrante de celui-ci participant à son fonctionnement, à son évolution et même à sa genèse.

Les lombriciens, ou vers de terre, ont une importance particulière du fait de leur biomasse prédominante et de leur rôle dans la dégradation de la matière organique et dans la structuration du sol. Ils représentent en moyenne 1,5 tonne par hectare. Ils agissent sur le sol : 1) en enfouissant la matière organique; 2) en créant des réseaux de galeries, représentant en prairie environ 5 % du volume de sol; 3) en produisant des déjections qui sont déposées dans le sol ou à la surface (turricules), correspondant à 240 tonnes par hectare et par an.

Par ces actions, les lombriciens exercent une influence importante sur les phénomènes physiques (transfert d'eau, de gaz et de solutés), chimiques (cycles du carbone et de l'azote, dégradation des pesticides) et biologiques (interactions avec les autres composantes de l'écosystème du sol). Ainsi, les galeries ouvertes à la surface du sol améliorent l'infiltration de l'eau; les turricules déposés à la surface augmentent la rugosité de surface, ralentissent la vitesse de ruissellement et contribuent à réduire l'érosion; les déjections dans le sol constituent une structure grumeleuse favorisant la rétention en eau du sol; le nombre de microorganismes et leur activité sont plus importants dans les déjections ou le long des parois des galeries car les conditions d'humidité, d'aération et d'accès à la ressource trophique (nutriments) y sont plus favorables. Bien que de nombreux travaux aient montré leur impact positif sur la fertilité du sol, leur rôle, vraisemblablement complexe, reste encore non entièrement élucidé.



Des vers de terre (*L. terrestris*) ont creusé des galeries dans une terre jaune et ont déposé les turricules correspondant à cette activité dans la litière superficielle opérant ainsi le mélange des matières minérales et des débris végétaux superficiels. Vue prise en terrarium au laboratoire.

Les lombriciens sont souvent considérés comme des indicateurs de l'impact des pratiques agricoles sur le sol. Ils sont très sensibles aux modifications de leur environnement immédiat : structure du sol, humidité qui conditionne leur activité, quantité et qualité de la matière organique, alors que la fertilisation organique favorise leur développement. Le travail du sol, notamment le type de labour, a un effet négatif bien connu sur l'abondance des lombriciens : un ver de terre coupé en deux n'aboutit jamais à deux vers de terre ! L'impact de l'utilisation des produits phytosanitaires sur ces communautés est variable selon les produits : la plupart des nématicides, fongicides à base de cuivre et insecticides vont influencer négativement leur abondance. A contrario, la présence d'un couvert d'interculture, ainsi que l'allongement de la durée de rotation, incluant ou non une prairie, vont favoriser tant le nombre de vers de terre que leur diversité.

Les recherches actuelles concernent : 1) la description de la biodiversité des sols, notamment par l'utilisation d'outil moléculaire ; 2) le rôle de la faune du sol dans la fourniture des services écosystémiques tels que le stockage du carbone par exemple, ou la régulation des éléments chimiques ; 3) les relations entre la biodiversité végétale et animale, à la surface et dans le sol. Enfin, une place de plus en plus importante est accordée à la faune du sol dans l'évaluation de la qualité des sols. Les recherches visent à définir des valeurs de référence prenant en compte la diversité des pratiques culturales et des sols, et à expliquer la diversité observée, ses impacts.

SOL & CULTURES

Grâce à leurs racines, les plantes prélèvent dans le sol l'eau et des éléments indispensables à leur croissance : azote, phosphore, potassium...

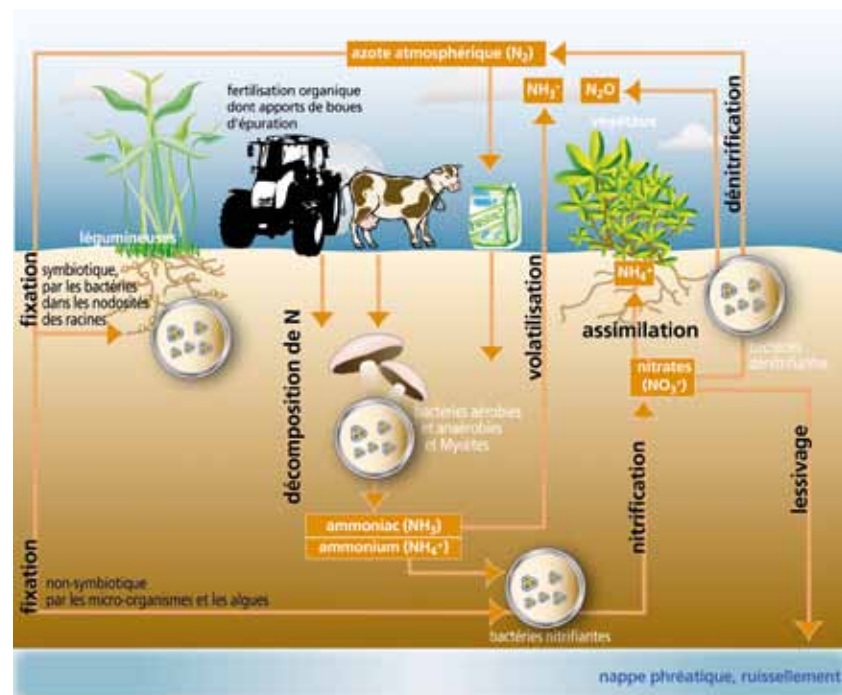
L'azote (N) entre dans la composition des acides aminés, constituants des protéines.

Le phosphore (P) est un élément constitutif de molécules qui supportent l'information génétique, comme l'ADN. On trouve aussi du phosphore dans les phospholipides, constituants des membranes, ou dans les ATP, ADP et AMP, molécules clés de l'énergétique cellulaire.

Le potassium (K) contribue au maintien de la turgescence des cellules.

En agriculture, des engrais organiques ou minéraux contenant ces éléments sont utilisés pour compléter l'offre du sol. Apportés en excès, ils peuvent cependant contribuer à la pollution des eaux (réduction de la potabilité, eutrophisation) ou aux émissions de gaz à effet de serre (N_2O).

Un renouvellement des bases scientifiques de la fertilisation raisonnée est plus que jamais nécessaire pour gérer durablement la fertilité des sols pour concilier production agricole et préservation de l'environnement.



Cycle de l'azote

La transformation (minéralisation) de l'azote par les microorganismes (bactéries) est indispensable pour qu'il soit utilisable par les plantes pour leur croissance.

>FERTILITÉ DES SOLS

Dans les écosystèmes naturels, le P, le K et le N prélevés par les végétaux retournent au sol via les litières ou après consommation par les animaux, via les fèces et les carcasses. Les pertes en P, K et N sont donc faibles. À l'inverse, dans les écosystèmes agricoles, les récoltes exportent du P, K et N hors du sol. Pour un hectare de blé produisant 8 t de grain à 15 % de teneur en eau, les exportations sont de l'ordre de 22 kg de P, 33 kg de K et de 240 kg de N.

Pour compenser ce déficit, il y a eu enrichissement des sols par des apports importants d'engrais minéraux, parfois même au-delà de ce qui était nécessaire. En France, les apports de P et de K sous forme d'engrais minéraux sont en réduction depuis les années 1970 du fait de l'augmentation du coût des engrais et des progrès de la fertilisation raisonnée par la mise en place d'outils automatisés de diagnostic et de prescription utilisés à grande échelle par les laboratoires d'analyse de terre et les organismes de conseil.

Dans beaucoup d'autres régions du monde, la disponibilité en P ou en K des sols reste un facteur limitant de la production agricole.

De nouveaux enjeux : la ressource permettant de fabriquer les engrais phosphatés est non renouvelable ; pourtant, dans certaines régions, les apports restent très excédentaires par rapport aux besoins ; le phosphore et les nitrates en quantité excessive dégradent la qualité des eaux ; dans d'autres régions, des pratiques inadaptées risquent d'entraîner une réduction à moyen terme de la fertilité des sols. Enfin, la diversification des systèmes de culture (techniques culturales simplifiées, agriculture biologique...) et de l'offre de produits fertilisants (effluents d'élevage, composts, déchets urbains...) rend nécessaire une adaptation des références pour une fertilisation raisonnée.

D'où de nouvelles recherches : les voies explorées aujourd'hui s'appuient sur une vision beaucoup plus intégrée et interactive des processus biologiques et physico-chimiques qui contrôlent la nutrition minérale des plantes et sur le recours à la modélisation : l'étude des mécanismes de mobilisation et de transfert de P et K dans la rhizosphère ; la modélisation de leur transfert sol-plante à l'échelle de la plante entière ; l'étude de leur cycle biogéochimique dans les écosystèmes terrestres...

Pour l'azote, les recherches s'intensifient particulièrement autour de la connaissance et de la quantification des émissions gazeuses liées à l'activité agricole, volatilisation d'ammoniac et surtout émission de protoxyde d'azote (N_2O), puissant gaz à effet de serre. Par ailleurs, des travaux sont en cours pour développer les outils de raisonnement de la fertilisation azotée plus seulement à l'échelle d'une culture, mais en calculant et ajustant d'une manière plus dynamique la disponibilité de l'azote dans le sol et les besoins en azote des cultures, en tenant compte des périodes d'inter-cultures. La substitution d'azote minéral de synthèse par d'autres sources d'azote (fixation symbiotique par les légumineuses, effluents d'élevage et autres produits organiques) est aussi particulièrement étudiée.

>CONTAMINATION DES SOLS ET TRANSFERT DANS LES PLANTES

Les sols contiennent un certain nombre d'éléments en traces : une partie d'origine naturelle parce que provenant des roches, une autre, très variable selon les sites, liée aux activités humaines : industries, extractions minières, retombées atmosphériques diffuses, certaines pratiques agricoles, épandages de déchets urbains, trafic automobile... Certains éléments en traces sont essentiels au métabolisme des végétaux et des animaux : bore, cuivre, cobalt, fer, manganèse, nickel, sélénium, zinc... D'autres sont des contaminants redoutés : cadmium, mercure, plomb, thallium, arsenic.

Transfert vers les plantes : dans certains cas, cette contamination du sol peut passer dans les végétaux et affecter les chaînes alimentaires des animaux et de l'homme, avec d'éventuels problèmes de sécurité sanitaire des aliments. L'accumulation dans les organes (feuilles, racines, fruits) des végétaux consommés varie selon l'élément, les propriétés du sol, l'espèce végétale, le climat... Il est désormais bien établi que la teneur totale en un élément dans le sol n'est pas du tout corrélée à la composition des organes qui y poussent et que nous consommons. Les recherches menées à l'Inra ont concerné la présence de ces éléments dans les sols de France, leur disponibilité et leur transfert éventuel vers les plantes, notamment dans les blés.

EXEMPLE DE RECHERCHE

DÉCONTAMINER LES SOLS AVEC LES PLANTES, LA PHYTOREMÉDIATION

Elle permet de dépolluer les sols en utilisant des variétés végétales spécifiques et de rétablir leurs fonctions en réduisant l'impact des polluants sur celles-ci. Elle s'applique à deux grandes catégories de polluants : les polluants organiques, molécules carbonées extrêmement variées (hydrocarbures lourds, huiles, pétroles, substances pharmaceutiques, solvants chlorés, pesticides...); les polluants minéraux, souvent des éléments chimiques comme des métaux ou des métalloïdes (plomb, cadmium, arsenic...) ou des molécules comme les cyanures. Plusieurs voies de dépollution sont explorées : pour les polluants organiques, par dégradation dans laquelle la plante sert d'intermédiaire pour favoriser cette dégradation par les microorganismes ; pour les polluants minéraux, par extraction, en utilisant des plantes dont les racines absorbent de grandes quantités de polluants, qui passent ensuite dans les parties aériennes, et que l'on peut extraire au moment de la récolte ; par volatilisation pour des substances comme le mercure ou le sélénium qui sont absorbées par les racines, passent dans les organes aériens où ils deviennent volatils. Parmi les travaux en cours, certains concernent des plantes déjà domestiquées comme le maïs ou la moutarde pour lesquelles une valorisation non alimentaire pourrait être associée à la phytoremédiation. D'autres concernent des plantes sauvages hyper accumulatrices comme une crucifère, *Noccaea caerulea*, ou des cultures destinées essentiellement à une valorisation énergétique, comme *Miscanthus giganteus*.

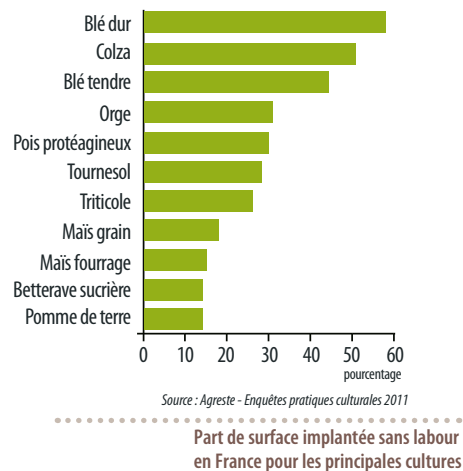


Noccaea caerulea

> LES TECHNIQUES DE TRAVAIL DU SOL SIMPLIFIÉ, INTÉRÊTS ET LIMITES

Dans les systèmes de culture conventionnels, le travail du sol a pour objectif essentiel la préparation d'une parcelle agricole avant d'y mettre en place, à une date donnée, une culture nouvelle, au travers des quatre fonctions suivantes : création ou maintien d'une structure du sol favorable au stockage et au transfert de l'eau, de la chaleur ou des gaz, et à la croissance des plantes (levée et croissance racinaire) ; enfouissement des résidus de récolte et lutte contre les parasites ; mélange des amendements et des engrais dans la couche de sol travaillée ; destruction de la végétation adventice.

Les répercussions d'une simplification du travail du sol concernent à la fois l'environnement (ré-alimentation des réserves en eau, séquestration du carbone, qualité des sols...) et l'économie des exploitations agricoles (rendement des cultures, charges de structure, niveau d'intrants...). Le labour occupe une place particulière du fait du retournement du sol, sur une profondeur généralement comprise entre 20 et 30 centimètres. Sa suppression présente des intérêts en termes de réduction de temps de travail et d'économie d'énergie fossile, de lutte contre l'érosion, de stockage du carbone et de biodiversité dans les sols. La dégradation progressive de la macrostructure des sols, la difficulté de maîtrise des adventices et de certains pathogènes qui leur sont souvent associés impliquent généralement une adaptation de l'ensemble du système de production : choix des équipements, nature des rotations, conditions de réalisation des semis et des récoltes, mise en place de cultures intermédiaires. Une question importante concerne le bilan de gaz à effet de serre de la réduction du labour. Ce bilan est généralement favorable, du fait de la moindre consommation de carburant et, dans certaines situations, d'un stockage accru de carbone. Dans certains cas, il peut cependant donner lieu à des émissions accrues de N₂O (sols hydromorphes). Une meilleure compréhension du déterminisme de ces émissions et de leur variabilité spatiale en fonction de la nature des sols et du climat est indispensable pour mieux évaluer l'intérêt du non labour vis-à-vis du changement climatique.



> SOL ET QUALITÉ DES PRODUITS

EXEMPLE DE RECHERCHE

L'EFFET TERROIR EN VITICULTURE

La filière viticole française illustre bien les relations entre qualité du produit final et facteurs naturels et humains de production, appelées terroir. Ce lien est fondé sur un sol, un climat, un cépage et un savoir-faire. Des recherches, menées depuis 1975 à l'Inra d'Angers, ont permis d'élaborer une méthode pour identifier, caractériser et cartographier ces territoires. Cette méthode intègre plusieurs composantes concernant le sol : géologie (nature, structure...), pédologie, environnement, paysage. Ces caractères jouent sur la réponse de la vigne. Les facteurs déterminants de l'effet terroir sont : le climat local, la température du sol, les conditions d'alimentation en eau et le système racinaire de la vigne. Ces travaux ont permis de définir l'Unité Terroir de Base et contribuent à conforter la référence au terroir dans la différenciation des produits.

Des résultats, obtenus en Val de Loire, en Alsace ou dans le Bordelais, mettent en évidence l'importance des facteurs physiques et climatiques du terroir sur la composition de la vendange et le type de vin ; les effets des seuls facteurs chimiques ne sont pas clairement démontrés. Par exemple, plusieurs groupes de vins ont été distingués : des vins toujours considérés comme les plus puissants et harmonieux, produits par exemple dans des sols calcaires dérivant de la craie tuffeau ; des vins considérés toujours comme parmi les plus légers et les moins colorés, souvent notés comme plus acides, mais pouvant présenter une bonne intensité aromatique : issus par exemple de différents sols de limons ; ou encore des vins dont les caractéristiques sensorielles varient en fonction du millésime, comme ceux produits dans des sols sablo-graveleux de terrasses fluviales. L'exemple de la vigne traduit bien le lien qui existe entre un produit transformé comme le vin et son territoire de production dans lequel le sol joue un grand rôle. Cet effet commence à être étudié pour d'autres productions comme le maraîchage de plein champ, l'arboriculture, les céréales panifiables ou pour la brasserie, mais aussi dans des filières présentant un maillon intermédiaire animal, comme c'est le cas pour les fromages (Comté par exemple). La recherche agronomique permet d'établir des bases solides de la typicité de tels produits.



LES FORÊTS & LEURS SOLS



Outre l'eau indispensable, l'abondance et la disponibilité des éléments minéraux dans le sol conditionnent la nutrition minérale des arbres et leur croissance. Les recherches se sont attachées à définir la composition minérale optimale des différentes essences forestières, à comprendre comment les arbres extraient les éléments du sol et à corriger les situations de carence.

Le fonctionnement minéral d'un écosystème forestier est très spécifique et se résume au cycle biogéochimique des éléments nutritifs :

- ce fonctionnement est très conservatif pour la fertilité naturelle du sol, puisque les éléments nutritifs prélevés par les arbres sont restitués essentiellement à la surface du sol, par les litières ou par les racines
- grâce à ce mécanisme, une production importante est réalisée à partir de réserves souvent limitées dans le sol. Cependant une certaine durée est nécessaire pour que le bilan entrée-sortie soit équilibré. Identifier cette durée est un enjeu important en vue d'une gestion durable des forêts.

> COMMENT LES ARBRES ACQUIÈRENT-ILS DES ÉLÉMENTS MINÉRAUX DU SOL ? DES CHAMPIGNONS ASSOCIÉS AUX RACINES

Comme presque toutes les plantes, les arbres puisent les éléments minéraux du sol par l'intermédiaire de champignons associés aux racines fines. Cette association, nécessaire pour l'arbre comme pour le champignon, est une symbiose ; les deux partenaires y trouvent un bénéfice : l'arbre nourrit le champignon en sucres et le champignon explore le sol à grande distance de la racine (jusqu'à plusieurs dizaines de centimètres), extrait l'eau et les éléments nutritifs et les transfère à l'arbre (mycorhize).

L'Inra a consacré des recherches à mieux comprendre le fonctionnement des symbioses mycorhiziennes. À partir de ces connaissances, deux moyens s'offrent aux forestiers pour améliorer la nutrition minérale des peuplements : augmenter la concentration en éléments nutritifs dans le sol par des apports d'engrais ; améliorer la mycorhization des arbres par inoculation avec des souches sélectionnées de champignon.



Mycorhize formée par un champignon du genre Cortinaire. Les filaments du champignon forment un feutrage autour des extrémités des racines fines, et des mèches émanent de ce manteau et explorent le sol.

EXEMPLE DE RECHERCHE

CORRIGER L'ACIDIFICATION DES SOLS FORESTIERS

De nombreux peuplements de sapin et d'épicéa (Vosges, Ardennes) souffrent de pertes d'aiguilles ou de jaunissements. Les recherches en France à la fin des années 1980 ont montré que ces symptômes étaient associés à des carences en calcium ou en magnésium liées à l'acidification du sol causée par des facteurs divers (sylviculture mal adaptée à des sols déjà acides, introduction malencontreuse de certaines essences, pollution atmosphérique...). Des expérimentations ont démontré l'effet très bénéfique des apports calciques et magnésiens contre l'acidification des sols et des eaux, le dépérissement des forêts et la dégradation de la faune aquatique.

SOL & ÉLEVAGE



Traditionnellement les fumiers des animaux étaient utilisés pour enrichir les sols en matière organique et en éléments fertilisants. C'est toujours le cas dans beaucoup de régions du monde où agriculture et élevage restent encore étroitement associés. L'intensification a cependant souvent conduit à la spécialisation des exploitations et des régions. La rupture du lien entre agriculture et élevage entraîne un déficit de matière organique dans les régions de grandes cultures et au contraire un excès d'effluents et d'éléments fertilisants dans les régions d'élevage. Ceci est en partie corrigé, d'un côté par l'utilisation d'amendements organiques (boues de station d'épuration, déchets verts, compost, fumier...) et d'engrais chimiques, et de l'autre, par le traitement et/ou le transport des effluents.

La crise alimentaire mondiale, les nécessités de conjuguer production agricole accrue, maintien de la fertilité des sols et développement pérenne et non polluant conduisent à reconsidérer les liens entre fertilité des sols, production végétale et élevage. Ceci est particulièrement important dans des systèmes à faibles intrants, comme l'agriculture biologique.

Des recherches sont menées sur différents sujets comme par exemple : de nouvelles formes d'élevage prenant mieux en compte les potentialités du milieu, des pratiques permettant de mieux maîtriser les flux de nutriments et limiter les risques pour l'environnement, les risques de contamination des produits liés à l'ingestion de sol par les animaux, le rôle du sol dans le cycle des parasites...

> RECRÉER DES LIENS ENTRE CULTURES CÉRÉALIÈRES ET ÉLEVAGE DANS UN MÊME TERRITOIRE

Dans les territoires de polyculture-élevage, la prairie et les cultures fourragères pérennes jouent un rôle essentiel dans certaines fonctions environnementales : maintien de la qualité des sols et des eaux ; régulation du cycle de l'azote ; séquestration du carbone dans les sols ; maintien de la biodiversité microbienne et de la faune des sols, de la végétation et des communautés d'insectes, de mollusques, de micro-mammifères grâce à laquelle, notamment, tout un cortège d'oiseaux à forte valeur patrimoniale trouve des ressources alimentaires. Ces territoires tendent vers une uniformisation des modes d'occupation des sols et une simplification exagérée des rotations du fait d'une spécialisation vers la production céréalière et une utilisation moindre de prairies par les exploitations d'élevage restantes. Des projets de recherche ont été développés pour concevoir un développement territorial plus durable grâce à un meilleur équilibre et une plus grande interdépendance entre activités céréalières et d'élevage dans un même territoire.

EXEMPLE DE RECHERCHE

ÉTUDE ET VALORISER LES SOLS POUR UN ÉLEVAGE EXTENSIF OVIN EN ZONES DIFFICILES

Le domaine Inra de La Fage dans le Larzac est le lieu d'un ensemble de recherches sur l'élevage de brebis laitières et sur l'élevage extensif sur parcours d'ovins pour la viande. C'est un plateau calcaire entre 600 et 850 m d'altitude avec des hivers très longs et très froids, des étés chauds et secs, une période courte de végétation qui manque souvent d'eau dès mai et tard l'été. Une étude approfondie du sol et de la végétation des terrains de parcours, envahis de buis et de genévriers, a permis de valoriser la végétation disponible dans ces milieux difficiles pour un élevage ovin en plein air intégral et sans gardiennage. Il est apparu qu'une fertilisation azotée relativement modérée permettait de multiplier par 4 la productivité des parcours (3 500 kg de matière sèche/ha contre 800), mettant ainsi à la disposition des brebis des quantités plus importantes de végétation consommable dès le début de la pousse de l'herbe au début mai, au moment de la période d'allaitement. Une étude menée en collaboration avec une équipe du CNRS vise à comprendre les relations entre les propriétés hydriques et minérales des sols des zones dolomitiques et les caractéristiques fonctionnelles de la végétation.

En effet, ces zones présentent une forte hétérogénéité : des sols profonds à forte réserve hydrique et relativement riches en éléments minéraux, qui se trouvent le plus souvent dans les dolines, contrastent avec des sols sableux plus superficiels à faible réserve hydrique et relativement plus pauvres en minéraux. Comment ces différences affectent-elles les compositions spécifiques et fonctionnelles de la végétation ? Comment se répercutent-elles sur la période de disponibilité et la production de la ressource herbagère ? Telles sont les questions au centre de cette étude en cours.

> LE RÔLE DU SOL DANS LES CYCLES DE PARASITES DES ANIMAUX AU PÂTURAGE

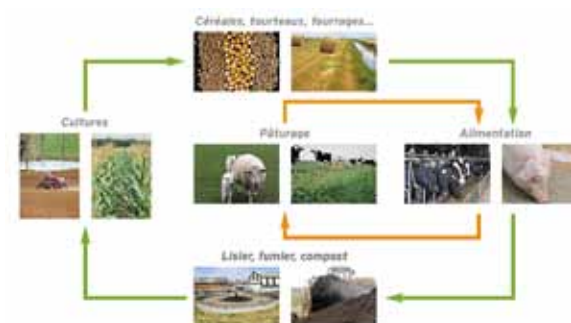
Les ruminants élevés à l'herbe hébergent des parasites internes variés (vers plats ou ronds, larves d'insectes) et bien souvent des parasites externes. Le contrôle des parasitoses passe par de multiples méthodes, de la gestion des pâturages à l'utilisation d'animaux résistants, mais le traitement par des antiparasitaires reste l'option très dominante. Les molécules actuelles, très actives, utilisées contre les parasites sont éliminées par voie urinaire ou fécale. L'élimination urinaire, dispersée en de nombreux points, ne favorise pas le regroupement de la faune, à l'inverse des matières fécales. Dans les zones herbeuses pâturées, donc riches en matières fécales, la faune du sol se développe en abondance, de manière bien plus élevée que dans celles mises en fauche. La faune associée aux matières fécales dégrade celles-ci et en permet un recyclage rapide. Les recycleurs les plus importants sont des insectes (bousiers) ou des vers de terre. Ces derniers sont peu ou pas affectés par certaines substances antiparasitaires contrairement aux premiers. La toxicité vis-à-vis des insectes et des acariens colonisateurs de matières fécales peut varier selon le type de substance et de faune. Ce qui incite à modérer l'usage de certains traitements antiparasitaires.



> RÔLE DE L'ÉLEVAGE DANS LE RECYCLAGE DES ÉLÉMENTS ET LA FERTILITÉ DES SOLS

Dans les exploitations d'élevage, les flux d'éléments fertilisants et de matière organique sont très divers et dépendent à la fois du système d'élevage et des pratiques des éleveurs, mais aussi des aléas climatiques et des potentialités des sols. Pour maîtriser durablement l'ensemble des impacts environnementaux, il est donc nécessaire de considérer les pratiques à des niveaux plus globaux, en intégrant simultanément de nombreux critères.

Ce type d'approche associe plusieurs unités de l'Inra, l'Institut de la Filière Porcine et l'Institut de l'Élevage. Le



modèle Mélodie a été développé pour prédire, dans des exploitations porcine et/ou laitière, les flux d'éléments à risque pour l'environnement (N, P, K, Cu, Zn) et l'évolution des stocks dans les sols. Il est capable de prendre en compte des exploitations avec des structures (troupeau, type de bâtiment, parcellaire) et des stratégies de production (autonomie alimentaire, gestion des effluents...) très diverses et d'explorer ainsi des voies d'évolution des systèmes d'élevage favorisant l'autonomie et le recyclage.

Parce que la population mondiale augmente ainsi que la part des produits animaux dans les régimes alimentaires, la demande alimentaire et de production agricole est de plus en plus importante. Comment accompagner cette évolution tout en préservant les ressources et en respectant l'environnement ? Une des pistes envisagée par la recherche est de limiter la spécialisation extrême des exploitations agricoles et des régions en promouvant de nouveaux systèmes et pratiques agricoles associant productions animales et végétales.

C'est l'objectif du projet Cantogether (Crops and ANimals Together) qui s'appuie sur un réseau de 24 fermes expérimentales ou commerciales (réparties dans les différents pays partenaires), afin de prendre en compte la diversité socio-économique, la diversité des sols et des climats de l'Europe. Dans ces situations sont déjà mis en œuvre de nouveaux systèmes agricoles associant cultures et productions animales avec un objectif d'efficacité maximale grâce au recyclage total des effluents d'élevage, grâce à la recherche de l'autonomie alimentaire par le développement des cultures de légumineuses, grâce à la production d'énergie renouvelable par la méthanisation ou la culture de biomasse dédiée, grâce aussi à l'instauration d'échanges entre exploitations à l'échelle du territoire local.

Cette plaquette a été élaborée avec la collaboration des unités suivantes :
Infosol, Orléans | Science du sol, Orléans | Fractionnement des agro-ressources et environnement,
Lille et université de Reims | Agroécologie, Dijon | Interactions Sol Plante Atmosphère, Bordeaux |
Sol Agro et hydrosystème Spatialisation, Rennes | Systèmes d'élevage, nutrition animale et humaine, Rennes

Responsables scientifiques : Pierre Stengel, Chantal Gascuel - février 2015
Conception / réalisation : UCPC - Studio de création Inra | Crédit Photos, illustrations : ©Inra
D'après la plaquette « Le sol ressource pour une agriculture durable » de mai 2009



147 rue de l'Université
75338 Paris - Cedex 07
France

Tél. : +33(0)1 42 75 90 00
Fax : +33(0)1 42 75 90 00
inra.fr

