

# Mieux comprendre et utiliser la diversité des organismes du sol

Sébastien Barot et Florence Dubs

Chercheurs en écologie des sols et des écosystèmes à l'IRD,  
Laboratoire Bioemco

Regard R28, édité par Anne Teyssèdre

**Mots clés :** Ecologie, biodiversité, sol, fonctionnement, interactions hypogé-épigé, microorganismes, lombrics, agro-écologie, agriculture, matière organique

## Une diversité immense et mal connue

Tous les jours nous marchons sur des sols sans nous rendre compte de la diversité des organismes qu'ils abritent (Gobat et al., 2003). Pourtant, cette diversité est immense par la mul-

tiplicité des types d'organismes et pour chaque type d'organisme, par le nombre élevé d'espèces qui les représentent. Le tableau ci-dessous présente une estimation de la densité et de la diversité des grands types d'organismes peuplant un mètre carré de prairie tempérée, classés par groupe systématique et par taille.

<b>Microfaune/Microflore</b> Taille : 1-100 µm	<b>Mésafaune</b> Taille : 100 µm – 2 mm	<b>Macrofaune</b> Taille : 2 mm et plus
<b>Bactéries</b> 10 <sup>15</sup> cellules appartenant à des dizaines de milliers d'espèces	<b>Collemboles</b> (classe d'arthropodes apparentés aux insectes)	<b>Insectes variés : fourmis, coléoptères, ...</b>
<b>Champignons</b> 50 km d'hyphes <sup>(1)</sup> appartenant à plusieurs centaines d'espèces	<b>Acariens (arachnides)</b>  <b>Tardigrades</b>	<b>Cloportes (crustacés)</b>  <b>Myriapodes</b>
<b>Protozoaires</b> Dix millions d'individus appartenant à plusieurs centaines d'espèces	<b>Enchytréides (annélides)</b>	<b>Lombrics ou "vers de terre" (annélides)</b>
<b>Nématodes</b> Un million d'individus appartenant à plusieurs centaines d'espèces	<b>Au total plusieurs milliers d'individus appartenant à plusieurs centaines d'espèces</b>	<b>Au total plusieurs centaines d'individus appartenant à plusieurs dizaines d'espèces</b>

**Tableau 1 :** Estimations pour un m<sup>2</sup> de prairie tempérée du nombre d'individus et du nombre d'espèces des groupes d'organismes du sol les plus communs. Inspiré de l'Atlas européen de la biodiversité des sols.

Ces organismes sont pour la plupart si petits qu'on ne les voit pas à l'œil nu. Ils appartiennent à des groupes d'organismes primitifs (par rapport aux mammifères par exemple). Ils vivent dans un milieu opaque et difficile d'accès. Tout ceci fait que la biodiversité des sols est encore plus mal connue que la diversité des organismes aériens. Ainsi, il reste une proportion très importante des espèces de ces organismes à décrire et nommer (Tableau 2) et ce d'autant plus qu'il existe une forte proportion de complexes d'espèces « cryptiques », rassemblant des espèces génétique-

ment différentes mais morphologiquement semblables.

Enfin, une partie de ces organismes sont des bactéries et des champignons pour lesquels les méthodes classiques de classification en espèces ne sont probablement pas très pertinentes du fait de leurs modes de reproduction particuliers et des échanges dits « horizontaux » de matériel génétique, c'est à dire des échanges de portion d'ADN entre bactéries en dehors de la reproduction.

Groupe d'organismes	Nombre d'espèces décrites	Valeur la plus haute du nombre d'espèces total estimé	Valeur la plus basse du nombre d'espèces total estimé
Bactéries	4 000	3 000 000	400 000
Champignons	70 000	1 500 000	1 000 000
Protozoaires	40 000	200 000	100 000
Lombrics	4000	Environ 8000	Environ 8000
Vertébrés	45000	Environ 50000	50000

**Tableau 2** : Estimation du nombre d'espèces connues et du nombre total d'espèces pour différents groupes d'organismes du sol et, pour comparaison, les vertébrés.

Tous ces problèmes font que la description des communautés du sol (identification et quantification des espèces) se fait de plus en plus par des outils moléculaires: au lieu de se baser sur des critères morphologiques on utilise la variabilité génétique entre espèces. Cette approche, obligatoire pour les microorganismes, est en plein développement pour les organismes plus gros (les « vers de terre » ou lombrics, par exemple).

### Des organismes moteurs du fonctionnement des sols

L'écologie scientifique étudie les interactions entre organismes vivants et entre ces organismes et leur environnement physico-chimique. Il est en particulier de plus en plus reconnu que de nombreux organismes modifient leur environnement, on parle alors d'organismes « ingénieurs des écosystèmes ». Ce type d'organisme est particulièrement bien représenté dans les sols. En effet en s'y

déplaçant, en l'ingérant, en y rejetant des substances, ils modifient la structure et la chimie du sol. On peut ainsi dire que les sols sont le résultat d'interactions entre la matière minérale (la roche qui se fragmente, se dégrade) et les organismes.

Les sols sont ainsi constitués d'un mélange de matière minérale et de matière organique produite par les plantes puis fragmentée, transformée et incorporée au sol par les organismes qui y vivent. Une caractéristique primordiale des sols est leur structure. Ils ne forment pas une couche de matière compacte et uniforme mais sont formés d'agrégats de différentes tailles (de quelques microns à quelques dizaines de millimètres) séparés par des espaces libres ou pores, remplis d'air ou d'eau. La structure du sol dépend du mélange intime de la matière organique et de la matière minérale qui détermine la solidité des agrégats. Les agrégats sont pour la plupart créés par les organismes du sol.

Nombre d'entre eux sont en fait des déjections d'organismes comme les turricules de vers de terre et certains peuvent être consolidés par les hyphes\* des champignons et des molécules produites par les bactéries. Une structure du sol "équilibrée" (diversité de la taille des agrégats et des pores) est primordiale pour le développement des racines, l'infiltration et la rétention de l'eau.

Echantillonnage de macrofaune :



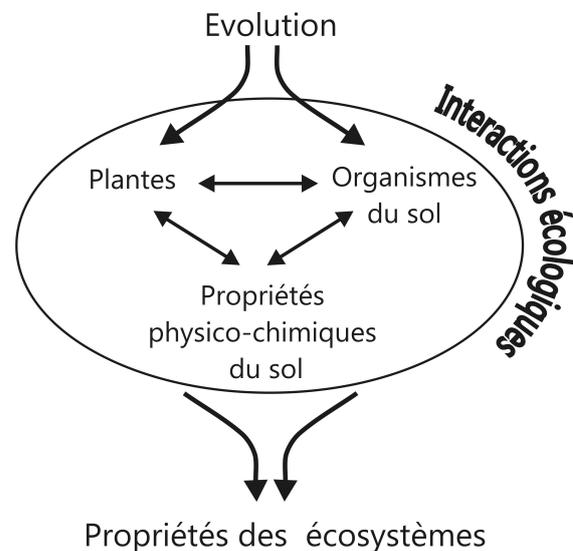
(Cliché Florence Dubs)



Echantillon de macrofaune du sol  
(Cliché Annick Aing)

Les organismes vivant au-dessus du sol se nourrissent plus ou moins directement des producteurs primaires, c'est à dire des plantes qui par la photosynthèse peuvent utiliser l'énergie solaire pour fabriquer leur propre matière organique.

Ainsi, les herbivores mangent les plantes et les prédateurs mangent les herbivores ... On parle ainsi de "réseau trophique vert". Au contraire, dans les sols, la plupart des organismes se nourrissent directement ou indirectement de matière organique morte. Ainsi, la matière organique fabriquée par les plantes retourne au sol sous forme de feuilles, de racines ou de bois morts. Les organismes du sol mangent à leur tour cette matière organique, ou mangent à leur tour des organismes qui ont eux-mêmes mangé cette matière. On parle de réseau trophique détritovore ou "réseau trophique brun".



Par exemple, les micro-organismes, bactéries et champignons, sont des consommateurs de matière organique très importants, et ils sont à leur tour consommés par des protozoaires, des nématodes ou des collemboles. La consommation de la matière organique conduit à sa décomposition : les substances carbonées sont consommées par les organismes du sol pour produire de l'énergie, ce qui libère du CO<sub>2</sub> et des substances minérales tel que l'azote ou le phosphore.

On peut donc dire que les organismes du sol consomment et recyclent la matière organique produite au-dessus du sol (sans eux la matière organique morte provenant des feuilles et du bois mort s'accumuleraient comme c'est le cas dans les tourbières) et les substances minérales qu'elle contient. Ils rendent ainsi de nouveau disponibles ces substances pour la nutrition des plantes (elles sont absorbées par les racines) et participent ainsi aux cycles des nutriments.

Une partie des fonctions remplies par les organismes du sol sont utiles aux sociétés humaines, on dit qu'ils fournissent des « services écosystémiques » (Lavelle, 2006, et voir le [regard n°4](#) sur cette plateforme).

Comme expliqué ci-dessus, ces organismes jouent un rôle primordial dans la formation des sols et le maintien de leur fertilité, ce qui est une condition essentielle au maintien de l'agriculture. Cela permet en retour l'alimentation des populations humaines, encore en croissance à l'échelle mondiale (voir les [Regards n°21](#) et [n°24](#) sur cette plateforme).

De plus, la bonne structure d'un sol, qui dépend fortement de ces organismes, limite les risques d'érosion et favorise l'infiltration, la filtration et l'épuration de l'eau de pluie, ce qui peut limiter les risques d'inondation et aussi les risques de contamination des eaux de surface. Enfin, les sols participent à la régulation du climat.

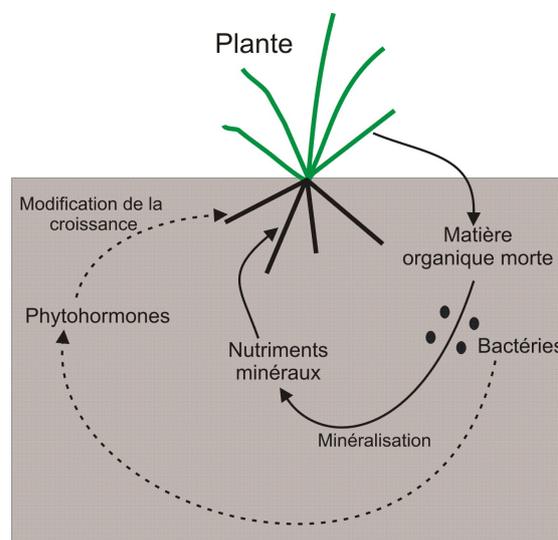
Dans le contexte actuel du changement climatique global, les sols peuvent limiter ou au contraire augmenter la production de gaz à effet de serre en stockant plus de matière organique ou au contraire en déstockant cette matière (Chapin III, 2009). La matière organique morte des sols contient en effet à l'échelle mondiale plus de carbone que l'ensemble des êtres vivants (la « biomasse » mondiale) et l'atmosphère (sous forme de CO<sub>2</sub>).

Le réseau trophique du sol est responsable de la minéralisation de la matière organique et donc de la libération de CO<sub>2</sub>, mais les organismes du sol sont aussi responsables de la stabilisation d'une partie de cette matière organique dans le profil\* et les agrégats de sol. La mise en culture de prairies ou de forêts entraîne un déstockage de carbone tandis que l'inverse génère un stockage. A l'heure actuelle, il est à craindre que les activités humaines liées aux changements d'usage des terres et à l'agriculture, en perturbant les équilibres entre sols, organismes du sol et matière organique et en libérant du CO<sub>2</sub>, contribuent à amplifier le réchauffement global.

## Les plantes comme lien entre le fonctionnement souterrain et aérien des écosystèmes

L'écologie des sols s'est souvent développée indépendamment du reste de l'écologie scientifique, en partie parce qu'elle a nécessité la mise au point de nombreux outils particuliers d'analyse. Pourtant, depuis une dizaine d'années, un domaine s'est fortement développé et contribue à beaucoup mieux lier l'écologie des sols au reste de l'écologie : il s'agit de l'étude des liens entre organismes dits épigés et hypogés, c-à-d. aériens et souterrains (Wardle, 1999; Wardle, 2004).

Ces liens dépendent en premier lieu des plantes qui créent une continuité entre le sol (système racinaire) et ce qui passe au-dessus (feuilles, tiges). On se rend maintenant compte que les organismes du sol influencent la croissance des plantes à la fois quantitativement (quantité totale de biomasse) et qualitativement (architecture racinaire, proportion de la biomasse allouée aux graines, composition chimique ...).



Interactions Plante-Bactéries, 1

Ces changements influent à leur tour sur les herbivores qui se nourrissent du système aérien (feuilles...), et cela peut enfin agir sur les prédateurs ou les parasites de ces herbivores. A l'inverse, des herbivores se nourrissant des feuilles et des tiges changent aussi la croissance des plantes, y compris celle du système

racinaire, et la qualité de la biomasse produite par ces plantes, ce qui influence les organismes du sol. Il existe donc un système complexe d'interactions en cascade et de rétroactions entre le réseau trophique du sol et celui se développant au-dessus.

Les exemples les plus connus sont ceux des organismes du sol vivant en symbiose avec les plantes : les champignons mycorhiziens et les bactéries fixatrices d'azote vivant en symbiose avec les plantes légumineuses (ex : trèfle, acacias). Dans les deux cas, les plantes "donnent" aux microorganismes des substances organiques fabriquées grâce à la photosynthèse.

En échange, les bactéries symbiotiques fixent de l'azote atmosphérique et les champignons récoltent des nutriments minéraux dans le sol (essentiellement du phosphore) et apportent ces nutriments aux plantes. Cela permet aux plantes de mieux pousser, d'avoir un contenu en phosphore et en azote plus élevé, cela améliore leur métabolisme... et peut attirer des herbivores qui sont aussi à la recherche de substances nutritives.

Un autre exemple emblématique est celui des vers de terre. Par des mécanismes très variés ils ont tendance à améliorer la croissance des plantes : ils améliorent la structure du sol, incorporent la matière organique au sol, augmentent la minéralisation. Dans certains cas cela facilite le développement d'herbivores (par exemple des pucerons) qui peuvent consommer des feuilles ayant une meilleure qualité nutritive (par exemple plus d'azote dans les feuilles). Dans d'autres cas, en aidant la croissance des plantes, les vers de terre augmentent leur capacité à résister aux herbivores, par exemple par la production de substances toxiques ou indigestes pour ces derniers.

On se rend aussi de plus en plus compte que les bactéries du sol ne vivant pas en symbiose avec des plantes entretiennent des relations très étroites avec elles. Ces bactéries sont en partie nourries par les exsudats racinaires qui sont composés des petites molécules organiques émises par les racines dans le sol. Par ces exsudats, les plantes peuvent en partie contrôler les bactéries et leurs activités.

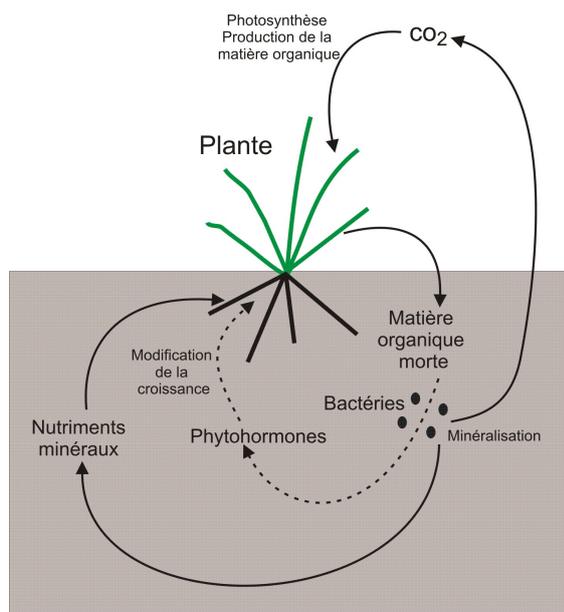
A l'inverse, les bactéries sont capables de produire et relâcher dans le sol des petites molécules organiques analogues aux hormones végétales produites par les plantes et leur permettant de réguler leur croissance. Ces molécules d'origine bactérienne peuvent être absorbées par les racines et permettent ainsi aux bactéries de manipuler la croissance des plantes. Enfin, les vers de terre augmentent la présence de certains groupes microbiens du sol et semblent dans certains cas favoriser des bactéries qui produisent des hormones végétales qui à leur tour améliorent la croissance des plantes.

En résumé, l'effet du sol et de ces organismes sur les plantes ne se réduit pas à la fourniture d'un support physique, d'une réserve d'eau et de nutriments minéraux. Cet effet met en jeu de nombreux mécanismes complexes que l'on commence juste à comprendre, et qui conduisent à une régulation fine de la croissance des plantes. Ces mécanismes sont en partie la conséquence d'une longue coévolution entre les organismes du sol et les plantes sauvages.

### Utiliser la biodiversité des sols pour une agriculture plus durable ?

L'agriculture peut être vue comme une manière d'artificialiser un écosystème (un couvert végétal) pour augmenter la fourniture d'un service écosystémique : la production d'aliments. Pour ce faire, différents "outils" ont été développés: travail du sol (labour), utilisation d'amendements variés et de fertilisants minéraux pour augmenter la croissance des plantes, d'herbicides pour diminuer la compétition entre plantes sauvages et plantes cultivées, de pesticides pour diminuer l'impact de pathogènes/herbivores s'attaquant aux plantes cultivées, irrigation, et sélection de plantes pour qu'elles bénéficient au mieux de ces pratiques.

Tous ces outils influencent directement ou indirectement les interactions entre ce qui se passe dans le sol et ce qui se passe au-dessus. Cela déclenche des cascades de processus dont certains sont explicitement recherchés et d'autres pas du tout.



Interactions Plante-Bactéries, 2

Par exemple, la fertilisation minérale augmente la croissance des plantes cultivées, et la teneur de la récolte en nutriments minéraux, mais en retour ces plantes sont aussi plus nutritives et favorisent probablement le développement de leurs pathogènes/herbivores. De même, la sélection de variétés plus productives et l'homogénéisation génétique à l'intérieur des champs (un seul génotype d'une seule espèce) permettent d'obtenir des rendements élevés mais augmentent aussi la vulnérabilité aux pathogènes/herbivores aériens et souterrains. Ainsi, il est à craindre que l'optimisation d'un seul service, l'obtention d'une récolte abondante, engendre la dérégulation d'autres services, notamment ceux produits par le sol (Tilman, 1998).

En fait, on peut penser que les systèmes agricoles modernes sous-utilisent les mécanismes de régulation liant le souterrain à l'aérien dans les écosystèmes naturels et que mieux utiliser ces mécanismes pourrait conduire à une agriculture plus durable. L'intensification de l'agriculture, suite à la révolution verte des années 1960 à 1990, a entraîné :

- le développement de la fertilisation minérale en remplacement de la gestion, par les plantes et le réseau trophique détritivateur, du stock de nutriments minéraux contenu dans la matière organique des sols,

- une tendance à la diminution du contenu en matière organique des sols agricoles,
- la diminution de la densité et de la diversité de certains organismes du sol suite à l'utilisation des pesticides et à la diminution de la teneur en matière organique,
- une perte de la diversité génétique intra-spécifique, c'est-à-dire de la diversité des gènes de chaque espèce cultivée dans les champs (dans la plupart des cas, une seule variété donc un seul génotype est cultivé par champ), diversité génétique qui est de plus en plus vue par l'écologie fondamentale comme une caractéristique primordiale des écosystèmes naturels permettant aux plantes de mieux gérer leurs interactions avec le sol et ses organismes,
- la sélection de plantes (cultivées) permettant des rendements très élevés dans les conditions "optimales" de croissance, c'est à dire protégées par des pesticides, abondamment nourries par des engrais.

Certains résultats suggèrent que les variétés modernes cultivées tirent un plus faible bénéfice de la fixation symbiotique de l'azote (cas du soja) (Kiers, 2007) ou des mycorhizes (Sawers, 2008) que les variétés anciennes ou sauvages. D'une manière générale, ces variétés ont beaucoup moins besoin de maintenir, avec le sol et ses organismes, les interactions complexes qui sont de plus en plus décrites par l'écologie fondamentale (voir ci-dessus).

On peut penser, même si cela est encore discuté, que ces variétés ont perdu au cours de la sélection une partie de leur capacité à profiter de ces interactions. Cela suggère aussi que le développement de pratiques agricoles alternatives et plus durables (agriculture à faible niveau d'intrants, agriculture biologique, intensification écologique de l'agriculture) nécessite la sélection de nouvelles variétés mieux adaptées à ces nouvelles pratiques et bénéficiant plus fortement des interactions entre le souterrain et l'aérien (Lammerts van Bueren, 2008; voir aussi le [regard R21](#) : La

biodiversité des champs, par F. Papy et I. Goldringer).

Enfin, cultiver des mélanges de variétés ou cultiver des « variétés populations » - au lieu de cultiver une variété pure ou un mélange de variétés, l'agriculteur crée et maintient la diversité génétique locale en ressemant une partie des graines qu'il a produit et qui sont donc le produit de mélanges génétiques libres entre les variétés multiples semées initialement - pourraient être des moyens efficaces d'augmenter la diversité génétique cultivée à l'intérieur d'un champ et, de nouveau, de mieux profiter des mécanismes de régulation entre le souterrain et à l'aérien (Zhu, 2000).

La nécessité d'un changement de paradigme sous-tendant le développement de l'agriculture semble maintenant acquise : il faut passer d'une agriculture ciblant seulement

l'optimisation de la production agricole à une agriculture plurifonctionnelle où la production agricole n'est plus le seul service optimisé au détriment de tous les autres, mais le résultat d'un compromis entre tous les paramètres environnementaux. Dans ce cadre, la prise en compte du fonctionnement du sol et de ses acteurs pourrait participer à la transition vers une agriculture plus durable.

## Glossaire

**Hyphes** : principalement chez les champignons, appareil végétatif composés de filaments microscopiques (quelques  $\mu\text{m}$  de diamètre). L'ensemble des hyphes dans un sol est nommé mycélium et peut comprendre plusieurs km de filaments par kg de sol.

**Profil de sol** : ensemble des couches d'un sol plus ou moins homogènes, parallèles à sa surface.

## Bibliographie

Atlas européen de la biodiversité des sols : [http://eusoiils.jrc.ec.europa.eu/library/maps/biodiversity\\_atlas/](http://eusoiils.jrc.ec.europa.eu/library/maps/biodiversity_atlas/)

Chapin III F. S. et al., 2009. The changing global carbon cycle: linking plant-soil carbon dynamics to global consequences. *J. Ecol.* 97: 840-850.

Gobat J.M., Aragno M. & W. Matthey, 2003. *Le sol vivant : bases de pédologie – biologie des sols*, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes.

Kiers E.T., M. G. Hutton & R. F. Denison, 2007. Human selection and the relaxation of legume defences against ineffective rhizobia. *Proc. Royal. Soc. B* 274: 3119-3126.

Lammerts van Bueren E. T. et al., 2008. Plant breeding for organic and sustainable, low-input agriculture: dealing with genotype-environment interactions. *Euphytica* 163: 321-322.

Lavelle P.T. et al., 2006. Soil invertebrates and ecosystem services. *Eur. J. Soil Biol.* 42:S3-S15.

Sawers R.J.H., C. Gutjahr & U. Paszkowski, 2008. Cereal mycorrhiza: an ancient symbiosis in modern agriculture. *Trends Plant Sc.* 13: 93-97.

Tilman D., 1998. The greening of the green revolution. *Nature* 396: 211-212.

Wardle D. A., 1999. How soil food webs make giants grow. *Trends Ecol. Evol.* 14: 418-420.

Wardle D. A. et al., 2004. Ecological linkages between aboveground and belowground biota. *Science* 304:1629-1633.

Zhu Y. et al., 2000. Genetic diversity and disease control in rice. *Nature* 406: 718-722.

Voir aussi ces **regards et débats** en ligne :

Doré T., 2011. La biodiversité, atout pour l'agriculture. *Regards et débats sur la biodiversité*, SFE, [regard n°24](#) du 22 nov. 2011.

Mouquet N., 2010. Le fonctionnement des écosystèmes. *Regards et débats sur la biodiversité*, SFE, [Regard R3](#), oct. 2010.

Papy F. & I. Goldringer, 2011b. La biodiversité des champs, *Regards et débats sur la biodiversité*, SFE, [Regard R21](#), sept. 2011.

Teyssèdre A., 2010. Les services écosystémiques. *Regards et débats sur la biodiversité*, SFE, [Regard R4](#), oct. 2010.

-----

Regard [R28](#) édité par A. Teyssèdre pour la Société Française d'Ecologie (SFE)  
<https://www.sfecologie.org/regard/r28-sols-barot-et-dubs/>

Regards et débats sur la biodiversité :  
<https://www.sfecologie.org/regards/>

-----