

# La vie dans le sol

La gestion optimale des sols est aujourd'hui clairement identifiée comme la priorité pour résoudre nombre des problèmes urgents posés aux sociétés, au Sud comme au Nord. La nécessaire intensification de la production devra être « écologique » pour ne pas mettre plus en péril des fonctions écosystémiques reconnues comme essentielles pour la société. Elle se fait dans un contexte de changement climatique qui remet en causes les bases techniques de l'agriculture, et d'ouverture économique globale qui introduit de nouveaux acteurs dont la relation à la terre peut être plus économique qu'écologique. Il faudra des sols en bon état pour répondre à ces défis, riches de toute leur biodiversité. Les organismes du sol, d'une diversité inimaginable, dirigent tous les processus : ceux qui font la fertilité chimique des sols, leur permettent de gérer au mieux l'apport des pluies, de dégrader les éléments organiques toxiques et, *in fine*, de permettre une croissance optimale des plantes.

Ce sont eux aussi qui font du sol un puits de carbone précieux. Parmi eux, les micro-organismes (bactéries et champignons), les protozoaires et les nématodes, les vers de terre et les racines interagissent en permanence et on commence seulement maintenant à prendre la mesure de l'importance de ces interactions qui sont un objet d'étude très dynamique partout dans le monde. Ces interactions peuvent être d'ordre trophique (comme la prédation) ou non trophique (comme l'activité mécanique des vers de terre ou des racines, appelés ingénieurs du sol, qui créent des habitats pour les micro-organismes et stimulent leur activité en leur fournissant des molécules très énergétiques : les exsudats racinaires ou le mucus intestinal). Enfin, des interactions jamais identifiées auparavant, impliquant la modulation du génome des plantes par l'action des vers de terre dans leur rhizosphère, ont récemment été mises en évidence et cette découverte éclaire d'un jour nouveau la problématique des transformations génétiques des plantes. La protection de cette biodiversité, la moins connue de la planète, est un enjeu majeur pour conserver les sols et pratiquer une agriculture durable. L'utilisation de cette alliée incontournable de l'agriculteur, encore très fruste, est l'enjeu ultime des recherches en écologie du sol présentées ici.

Éric Blanchart, Patrick Lavelle

## Une collaboration inattendue

Les racines et vers de terre jouent en équipe pour dynamiser les sols ! « Ils contribuent ensemble à la construction de certains des agrégats qui structurent le premier mètre de terre sous nos pieds et rendent de très précieux services écosystémiques », révèle l'écologue Anne Zangerlé. Ces innombrables assemblages grossièrement sphériques, de minéraux et de matière organique, mesurent entre 20 microns et plusieurs centimètres. Ils peuvent être d'origine physico-chimique ou biologique, alors produits par des micro-organismes bactériens ou fongiques, par de la macrofaune invertébrée – comme les lombrics – ou encore par les racines des plantes, qui collent les particules avec leurs exsudats<sup>1</sup> ou

les ensèrent dans leurs fins réseaux de radicules. Les agrégats mobilisent l'attention des scientifiques car ils confèrent aux sols des propriétés essentielles. « Ils jouent un rôle géo-hydraulique fondamental, explique l'écologue Patrick Lavelle. En créant de l'espace entre les particules de sable, de limon et d'argile qui constituent la terre, ils permettent à l'eau de s'infiltrer, de circuler et d'être stockée. En leur absence, le sol serait compact, quasiment imperméable, et connaîtrait une forte érosion liée au ruissellement. » Les agrégats d'origine biologique participent aussi à la fertilité. Souvent riches en matières organiques et en nutriments, ils contribuent aux besoins des plantes et hébergent des colonies bactériennes, dont l'activité est bénéfique aux végétaux. Enfin, et ce n'est pas une fonction négligeable actuellement, ces petites billes de terre compactes sont impliquées dans la séquestration du carbone. Les sols sont en effet, avec les océans, les compartiments terrestres où se retrouvent piégés une partie significative des surplus de gaz à effet de serre. Le carbone, converti en matière organique par la photosynthèse est conservé à l'abri de l'air, dans les agrégats compacts. Pour en savoir plus sur le rôle respectif des « organismes ingénieurs » dans la constitution des agrégats, les

chercheurs ont appris à distinguer les structures édifiées par les uns et les autres. Avec la spectrométrie en proche infrarouge (NIRS), dans un milieu expérimental artificiellement désagrégé, ils sont parvenus à reconnaître l'empreinte de la matière organique produite par chaque espèce de plante ou de ver de terre. « Chacun ajoute un élément ou un autre et laisse une signature chimique particulière dans sa production », explique la jeune spécialiste. Grâce à ces marqueurs, les chercheurs savent désormais relier les assemblages à l'organisme qui les a créés. « Nous avons ainsi découvert que les matières organiques issues des lombrics et des racines se retrouvaient mélangées dans des agrégats, signant une "collaboration" jusqu'ici ignorée des scientifiques », indique-t-elle. Les racines fines, qui sont particulièrement mobiles, semblent en effet se propager en direction des turricules. ●

1. Un mélange de nature principalement polysaccharidique émis dans le sol par les racines, à raison de plusieurs tonnes par hectare et par an.
2. Excréments de ver de terre composés pour 90 % d'éléments minéraux du sol.

### Contacts

zangerleanne@yahoo.fr  
patrick.lavelle@ird.fr  
UMR Bioemco (IRD, AgroParisTech, CNRS, Ecole Normale supérieure, INRA, Université Pierre et Marie Curie – Paris 6 et Université Paris 12 Val-de-Marne)



Dégâts liés à la présence de nématodes sur des bananiers plantains en Martinique.

## Nématodes et bactéries, les bons ingrédients de la nutrition des plantes

orsque les nématodes consomment des bactéries, les plantes se nourrissent mieux. Peu connus du grand public, les nématodes sont pourtant les organismes pluricellulaires les plus abondants sur terre. « On dénombre environ 1 million d'individus par m<sup>2</sup> de sol », précise Cécile Villenave, responsable scientifique d'Elisol environnement. « 30 à 40 % de la communauté totale consomment des bactéries. Et cette communauté de nématodes bactérivores est notamment abondante dans les agrosystèmes cultivés », poursuit-elle. S'intéressant aux relations en jeu dans ces écosystèmes complexes, des biologistes de l'IRD et de l'Université Anta Diop à Dakar ont constaté que la présence de nématodes bactérivores était favorable à une meilleure utilisation des éléments nutritifs par les plantes<sup>1</sup>. Des travaux récents sont venus préciser les mécanismes impliqués<sup>2</sup>. En laboratoire, « nous avons reproduit un modèle très simplifié de la chaîne trophique : une bactérie (*Bacillus*), un nématode bactérivore, un champignon mycorhizien et une plante, le pin maritime, le tout dans un milieu gélosé contenant du phytate », résume Cécile Villenave. Le phytate est la forme de phosphore organique la plus abondante dans le sol. Pour être utilisé par les plantes, il doit être transformé en une forme de phosphore différente, à savoir des ions orthophosphate. « Les enzymes produites notamment par les champignons saprophytes et les bactéries comme les *Bacillus* peuvent réaliser

cette transformation », précise Claude Passard, de l'Inra. Selon les essais menés sur ce système expérimental, les bactéries dégradent bien le phytate, mais utilisent le phosphore produit pour leur propre développement. L'action de prédation des nématodes est donc essentielle puisque c'est elle qui permet au pin maritime d'avoir accès à ce phosphore. « Deux hypothèses peuvent expliquer ce phénomène », avance Claude Passard. « Les nématodes, en consommant les bactéries, libèrent soit un surplus d'orthophosphate, soit du phosphore organique plus facilement consommable par la plante. » Pour en savoir plus, les chercheurs vont comparer, sur un sol cette fois, deux stratégies susceptibles d'améliorer l'utilisation du phytate par les plantes<sup>3</sup>. « Dans la première, dite écologique, nous étudierons les interactions entre plantes, champignons, bactéries et nématodes. Dans la seconde, dite biotechnologique, nous souhaitons faire produire une enzyme capable de transformer le phytate par un champignon mycorhizien », annonce Claude Passard. Affaire à suivre... ●

1. *Soil Biology and Biochemistry*, 2004.
2. *Phosphorus acquisition from phytate*, *Plant and Soil*, 2012.
3. *Projet ANR UnlockP*.

### Contacts

cecile.villenave@elisol-environnement.fr  
ELISOL environnement  
Claude Passard  
passard@supagro.inra.fr  
UMR Eco&Sols (IRD / CIRAD / INRA / SupAgro Montpellier)



Macroagrégats racinaires.



Nématode bactérivore.



## Minéraliser la matière organique des sols

Les spécialistes savaient depuis longtemps que les vers de terre participaient activement au fonctionnement des sols, et particulièrement à la décomposition de la matière organique, mais les mécanismes restent mal compris. « Nous savons depuis 30 ans que les vers produisent un mucus intestinal qui stimule l'activité microbienne responsable de la minéralisation », explique Éric Blanchart, Directeur de Recherche à l'UMR *Eco&Sols*. Un partenariat alimentaire se met en place entre ces organismes, dans lequel l'action enzymatique des micro-organismes libère un ensemble d'éléments nutritifs disponibles pour le ver, en échange du mucus nourricier qu'il fournit. Une étude impliquant l'IRD et d'autres organismes de recherche<sup>1</sup> apporte de nouveaux éléments en montrant que cet échange présente un effet en cascade. Le mucus favorise la décomposition de la matière organique fraîche d'origine végétale qui stimule à son tour la décomposition de celle déjà humifiée (déjà partiellement décomposée par des micro-organismes) et beaucoup plus résistante.

Ces résultats montrent l'importance de l'action des vers de terre dans le *Priming effect*, la stimulation la décomposition de la matière organique humifiée par l'ajout de matière organique fraîche. Cette dernière, riche en carbone, pauvre en nutriments (azote, phosphore...) et riche en énergie, devient de plus en plus difficile à dégrader au cours de sa décomposition par les micro-organismes. Par contre, sa teneur relative en nutriments augmente. Elle constitue donc une réserve en nutriments que seules certaines populations microbiennes sont capables de remobiliser. Dans le *Priming effect*, la matière organique fraîche apporte de l'énergie à ces populations afin de les aider à remobiliser ces nutriments. « L'enjeu dans un agrosystème serait

de maîtriser le stockage et la remobilisation de ces nutriments en fonction du besoin des plantes au cours du cycle de culture », souligne Laetitia Bernard, chargée de recherche et coauteur de l'étude. Elle suggère « qu'une meilleure compréhension de ces interactions entre ces différents organismes permettrait d'envisager des actions sur la macrofaune du sol afin d'influencer les processus microbiens ». L'étude menée met en évidence la complexité de ces interactions et montre que le ver *Pon-toscolex corethrurus* stimule en proportion équivalente la minéralisation de la matière organique fraîche et le *Priming effect* associé, en sélectionnant des populations bactériennes capables de dégrader ces deux types de matière organique.

Par contre, comme certaines bactéries sont susceptibles de dégrader la chitine, un constituant de la paroi des champignons qui sont eux-mêmes des acteurs importants du *Priming effect*, les chercheurs s'interrogent afin d'établir en quelle proportion les vers de terre stimulent les organismes responsables du *Priming effect*... ou s'en nourrissent

1. Université d'Antananarivo à Madagascar, INRA, Géoscope d'Evry, INSA Toulouse.

### Contacts

laetitia.bernard@ird.fr  
eric.blanchart@ird.fr  
UMR *Eco&Sols* (IRD / CIRAD / INRA / SupAgro Montpellier)

## Le ver de terre, allié des cultures contre les agresseurs

Plus connus pour leurs fonctions de bâtisseurs du sol, les vers de terre s'annoncent aussi comme des alliés indirects des plantes. Lorsqu'ils aèrent le sol ou en modifient la chimie, ils facilitent la nutrition des végétaux en azote et en phosphore. Action un peu moins évidente, mais tout aussi importante, « ils activent des bactéries productrices d'hormones végétales qui confèrent aux plantes, entre autres, une résistance plus grande à des organismes pathogènes, des bactéries par exemple, et à des parasites, comme certains nématodes », ajoute Manuel Blouin, biologiste. Et ce n'est pas tout. Toujours indirectement, les vers de terre pourraient bien également « favoriser une meilleure tolérance des cultures aux attaques de nématodes parasites », propose Patrick Quénéhervé, à l'IRD en Martinique.

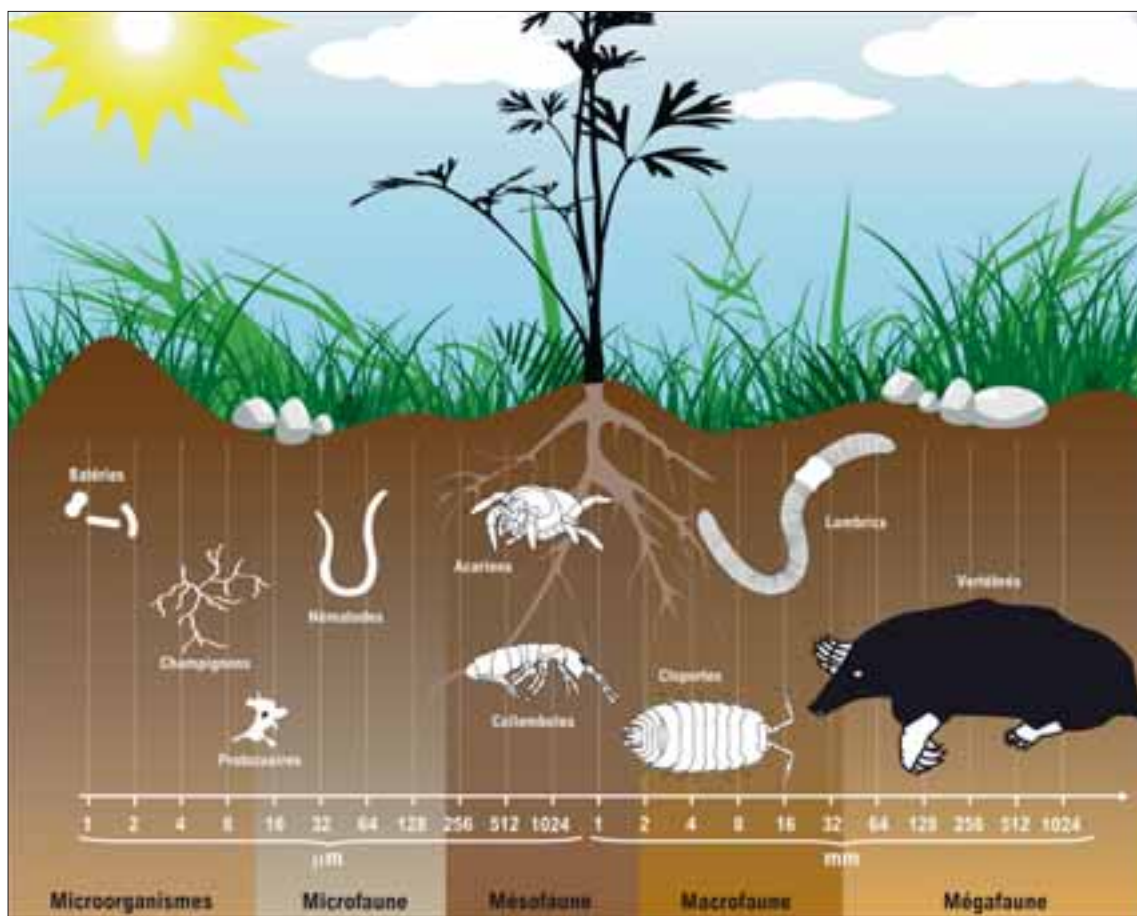
Avec des biologistes de l'Inra de Guadeloupe, Patrick Quénéhervé a en effet constaté que les dommages causés sur les racines de bananiers par le *Radopholus similis*, un nématode parasite, étaient moindres en présence de vers de terre, sans pour autant induire une diminution de la population de ces nématodes<sup>1</sup>. Une observation similaire avait déjà été réalisée sur des plants de riz dans un sol tropical de Côte-d'Ivoire. « En présence de vers de terre, les plants présentaient une plus grande tolérance vis-à-vis des nématodes parasites », confirme Manuel Blouin. Souhaitant mieux comprendre ces interactions, il s'est intéressé à la réponse au stress de la plante modèle *Arabidopsis thaliana*, en présence de vers de terre. « Nous avons réalisé une étude transcriptomique », précise-t-il. Au lieu

d'étudier l'expression des gènes un par un, la technique permet d'observer, en même temps, les expressions de l'ensemble des 30 000 gènes d'*Arabidopsis*. Cette étude a révélé que les gènes qui s'expriment en présence de vers de terre sont impliqués dans les mécanismes de défense. « Nous pensons que, lorsque les vers de terre broient le sol, ils broient également des bactéries pathogènes, les rendant ainsi inopérantes. Mais des flagelles (queues de bactéries) peuvent se retrouver dans leurs excréments ; un signal que les plantes interprètent comme une menace et réagissent en conséquence », éclaire Manuel Blouin. « Le mécanisme s'apparente à celui d'un vaccin, puisque la présence de flagelles active de manière précoce les mécanismes de défense de la plante qui pourra ainsi mieux combattre une bactérie virulente ou un nématode parasite. » Si ce processus et les conditions de leur mise en œuvre restent à préciser, ces résultats autorisent déjà à imaginer les vers de terre comme des partenaires intéressants dans la lutte intégrée contre les maladies et les parasites des cultures.

1. *Applied Soil Ecology*, 2011.

### Contacts

Manuel Blouin  
blouin@u-pec.fr  
UMR *Bioemco* (Université Pierre et Marie Curie / CNRS / INRA / ENS / IRD / AgroParisTech / UPEC)  
patrick.queneherve@ird.fr  
UMR *Résistance des plantes aux bioagresseurs* (IRD / CIRAD / Université Montpellier 2



Représentation schématique des organismes du sol.

## Impacts sur la démographie végétale

Le fonctionnement des écosystèmes tels que pâturages ou champs traditionnels reste opaque pour les scientifiques. L'étude des interactions entre différents acteurs est essentielle. Plutôt que de s'intéresser aux effets des organismes du sol sur la croissance des individus, Sébastien Barot a fait le choix original de se placer au niveau des populations de plantes. « Pour avancer dans cette voie nous avons fait l'hypothèse que si un organisme modifie les propriétés du sol et donc la croissance d'une plante, alors il a également des répercussions sur les chances de survie et de reproduction de celle-ci », explique le chercheur de l'IRD. Avec son étudiant tchadien Kam-Rigne Laossi, il a décidé de tester cette hypothèse par un dispositif expérimental mettant en présence des vers de terre et des communautés d'herbacées pérennes<sup>1</sup>. « Nous avons mis en évidence des effets des uns sur les autres en cascade, ajoute Sébastien Barot. Quand les vers affectent la croissance des plantes, ils modifient aussi la quantité de ressource allouée par le végétal à ses différents organes, dont les graines assurant la reproduction. À son tour, la modulation de la quantité, la taille et la qualité des graines produites par la plante détermine à la génération suivante le nombre d'individus de la population végétale et plus

largement, la proportion d'individus de différentes espèces. » En théorie du moins... Car les résultats sont tout en contrastes, faisant intervenir effet différentiel et facteur temps. « Ainsi, sur le court terme, la croissance d'un trèfle est défavorisée par une espèce de lombric<sup>2</sup> qui dans le même temps dope celle d'une graminée (+ 10 %). À l'inverse, sur le long terme, l'espèce de trèfle est avantagée, elle produit 8 % de graines en plus. Sa population augmente donc au détriment de celle de graminées », précise-t-il. Ces effets inattendus montrent qu'il est encore difficile de prédire les effets des vers de terre sur les communautés de plantes à partir de leurs effets sur la croissance des individus. Pour autant, l'impact de ces habitants souterrains sur la dynamique de populations de leurs colocataires végétaux est clairement démontré. Ces conclusions, quoique partielles, éclairent les scientifiques sur ces interactions entre espèces animales et végétales partageant un même milieu, le sol, composante essentielle.

Obtenus en zone tempérée, ces résultats ne peuvent être transposés en milieu tropical sans expérimentations réalisées sur place. Du travail en perspective pour les partenaires du Sud.

1. Plante qui vit plusieurs années, par opposition à plante annuelle.  
2. *Lumbricus terrestris*.

### Contact

sebastien.barot@ird.fr  
UMR *Bioemco* (IRD / AgroParisTech / CNRS / ENS / Inra / Université Pierre et Marie Curie - Paris 6 / Université Paris 12 Val de Marne)



Ver de terre de Madagascar.



Compétition entre 4 espèces d'annuelles.