



**HAL**  
open science

# La biodiversité des sols : un fantastique patrimoine à préserver et valoriser par les services écosystémiques

Philippe Lemanceau

## ► To cite this version:

Philippe Lemanceau. La biodiversité des sols : un fantastique patrimoine à préserver et valoriser par les services écosystémiques. Les services écosystémiques dans les espaces agricoles. Paroles de chercheur(e)s, 156 p., 2020, 10.15454/nwq9-zk60\_book\_ch05 . hal-02503300

**HAL Id: hal-02503300**

**<https://hal.science/hal-02503300>**

Submitted on 9 Mar 2020

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License

# 05



## La biodiversité des sols : un fantastique patrimoine à préserver et valoriser par les services écosystémiques

Philippe Lemanceau  
UMR Agroécologie, Dijon

### Les sols renferment une biodiversité extraordinaire : ils sont des environnements vivants.

L'ensemble des organismes qui y vivent représente cinq tonnes de matière vivante par hectare, voire plus. Cette masse représenterait l'équivalent de cent moutons sur un hectare, alors que l'on n'élève que vingt moutons en moyenne par hectare. Sur cette base, on peut estimer que la biomasse qui se trouve sous nos pieds est cinq fois plus importante que la biomasse qui se trouve au-dessus du sol. Cette biomasse est non seulement gigantesque mais elle représente également une diversité extraordinaire comprenant insectes, arachnides, vers de terres, mollusques, protozoaires, archées, bactéries, de champignons, etc... et également les racines (figure 1).

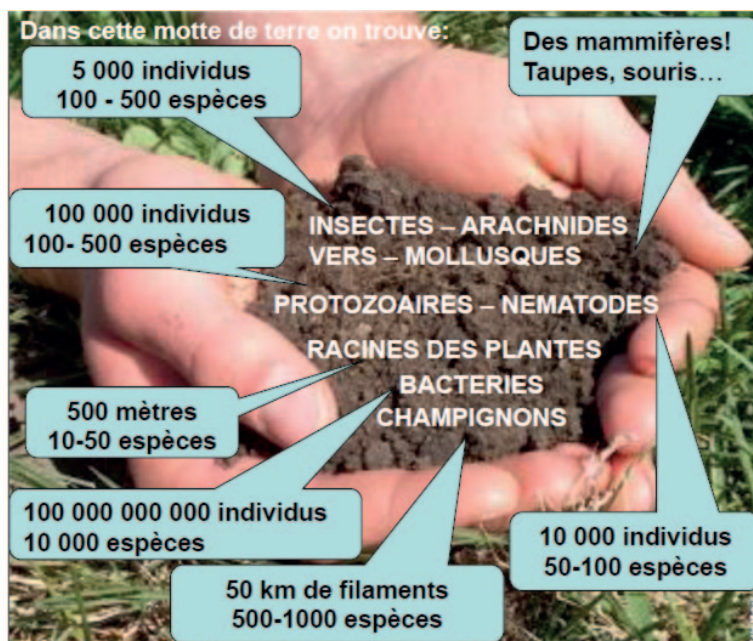


Figure 1. Une estimation de la biodiversité dans une poignée de terre. Source : International day for Biological Diversity, CBP COP-9, Bonn, 22 May 2008.

## Pourquoi s'intéresser à la biodiversité des sols ?

Parce que les sols et la biodiversité qu'ils renferment fournissent de nombreux services. Il est bien admis que les sols et leur biodiversité contribuent à la productivité primaire (production agricole et de biomasse). Mais on réalise maintenant que ces sols et leur biodiversité fournissent également d'autres services extrêmement importants pour l'humanité (figure 2), tels que la régulation du climat et la bio-filtration de l'eau. En outre, les sols renferment le plus grand réservoir de biodiversité de la planète correspondant donc à un patrimoine majeur pour l'humanité.

En dépit de leurs rôles essentiels pour l'humanité, les sols et leur biodiversité sont soumis à des menaces majeures (figures 3 et 4). Parmi celles-ci, nous pouvons citer : l'érosion, la contamination, la diminution de la matière organique et l'imperméabilisation. Pendant la période 1990/2000, mille kilomètres carrés de sol ont ainsi été imperméabilisés chaque année à l'échelle de l'Union Européenne. 12% des sols Européens soumis à l'érosion hydraulique ; 3,5 million de sites seraient contaminés au niveau européen et environ 45% des sols européens ont une faible teneur en matières organiques.

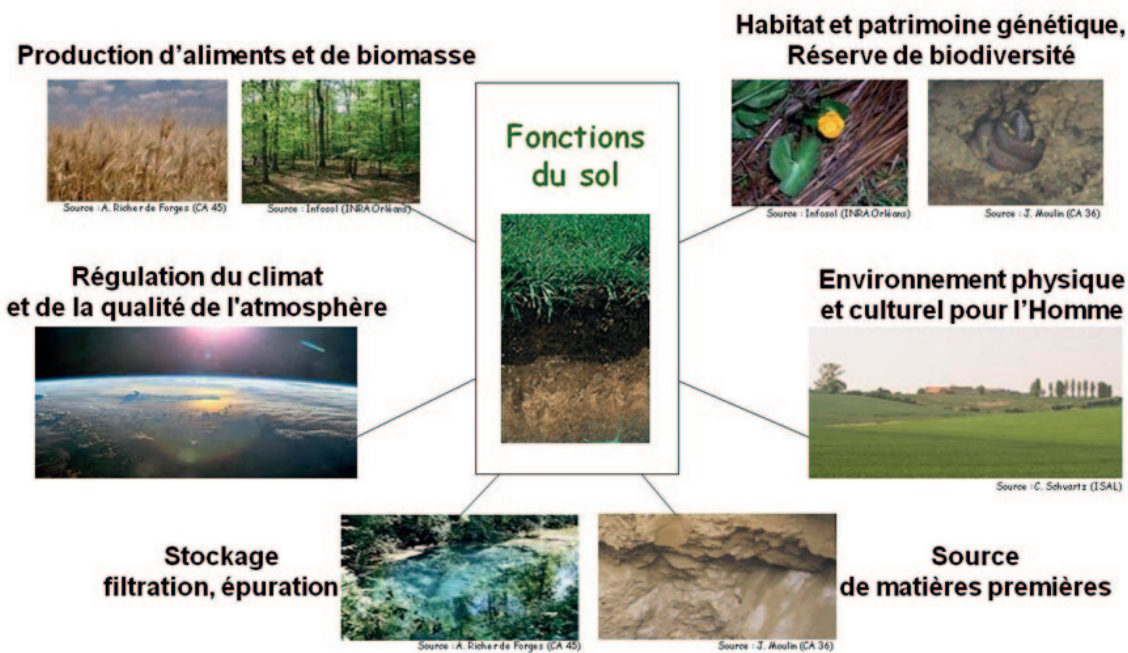


Figure 2. Les fonctions du sol



Figure 3. Menaces et pressions pesant sur les sols (Adapté de Dominique Arrouays, InfoSol).



## Connaître la biodiversité des sols, une tâche difficile

Pour préserver et valoriser la biodiversité, il est nécessaire au préalable de la connaître (figure 5). Cependant, sa caractérisation est compliquée en raison de la faible accessibilité des organismes correspondants et de la difficulté de les observer.

Une difficulté supplémentaire est liée au fait que chaque taxon peut être présent dans des proportions très variables : certaines espèces microbiennes sont fortement représentées alors que d'autres sont minoritaires. En dépit de leur faible représentation, ces espèces minoritaires peuvent jouer un rôle déterminant dans le fonctionnement biologique des sols. Or, l'accès à ces espèces minoritaires, dans un contexte de forte diversité, pose des problèmes méthodologiques majeurs.

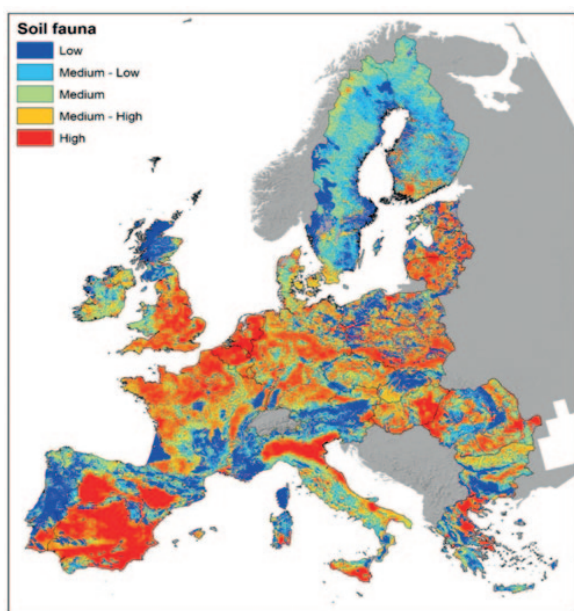


Figure 4. Cartographie des menaces qui pèsent sur la biodiversité de la faune des sols en Europe (Orgiazzi et al., 2016).

Des difficultés supplémentaires sont associées à la grande variété des situations environnementales : types de sol, de mode d'usage, de climat, mais également variété des échelles à considérer. Ces échelles vont en effet de l'agrégat, échelle à laquelle évoluent les microorganismes, au champ, échelle pertinente pour l'agriculteur, au paysage, échelle pertinente pour les gestionnaires et les collectivités territoriales, à finalement l'échelle du pays ou même celle du continent, échelles pertinentes pour les politiques nationales voire internationales.

Pour progresser dans la connaissance de la biodiversité des sols ainsi que celle des fonctions et services écosystémiques fournis, un premier enjeu porte sur la description de la biodiversité. Il s'agit bien sûr de décrire la diversité taxonomique mais également, et surtout, le potentiel génétique fonctionnel représenté par cette biodiversité. Cependant, l'expression de ce potentiel varie selon les conditions environnementales. Il est donc nécessaire de compléter les analyses de biodiversité par la mesure des activités biologiques (enzymatiques en particulier) et des fonctions qui en résultent. La prise en compte de la valeur économique et sociale des fonctions correspondantes permet finalement d'appréhender leur traduction en services écosystémiques. Finalement, il est essentiel de comprendre comment les filtres environnementaux (types de sol, de mode d'usage, de climat) impactent la biodiversité tellurique et la relation biodiversité-fonctionnement biologique-services écosystémiques.

L'écologie microbienne est une science relativement jeune. Les progrès méthodologiques ont permis de passer de l'étude des individus, à celle des populations, isolées puis in situ, puis à celle des communautés et finalement des métacommunautés (figure 5). Ces progrès portent sur le développement de milieux de culture puis de méthodes biochimiques et moléculaires avec suc-

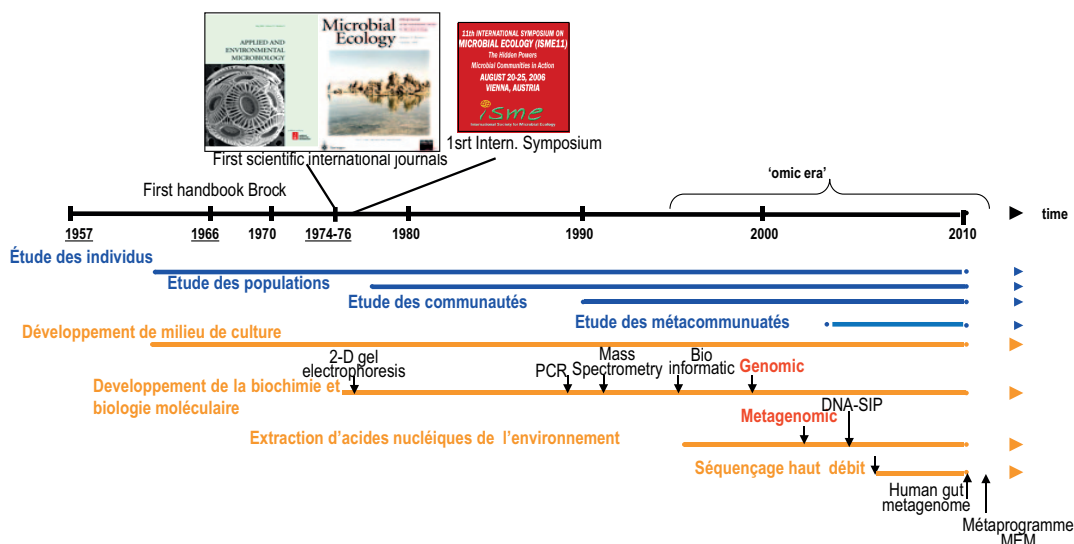


Figure 5. Progrès méthodologiques en écologie microbienne. Adapté de Maron et al., 2007. *Microb. Ecol.* 53:486-493.

cessivement les méthodes d'électrophorèse, la PCR (amplification enzymatique de l'ADN), l'extraction de l'ADN de la matrice tellurique et les méthodes de typage moléculaire.

Plus récemment, la réduction spectaculaire du coût du séquençage (figure 6) associée aux évolutions technologiques enregistrées lors des programmes de séquençage du génome humain et du métagénome du tube digestif permet maintenant d'accéder au métagénome du sol.

## Connaître la biodiversité : Analyse du métagénome

On peut distinguer deux types d'analyse du métagénome (figure 7) :

**1-** L'analyse du métagénome *sensu stricto* correspond au séquençage massif et profond de sols modèles. Il peut être accompagné d'un screening fonctionnel par lequel on teste systématiquement des séquences pour leurs activités dans le but de rechercher de nouveaux gènes de fonction et de nouveaux métabolites. Cette approche vise à

- › progresser dans notre connaissance du fonctionnement biologique des sols et des gènes associés, et à
- › découvrir des gènes et molécules potentiellement utiles en biotechnologie, pharmacie ou phytopharmacie.

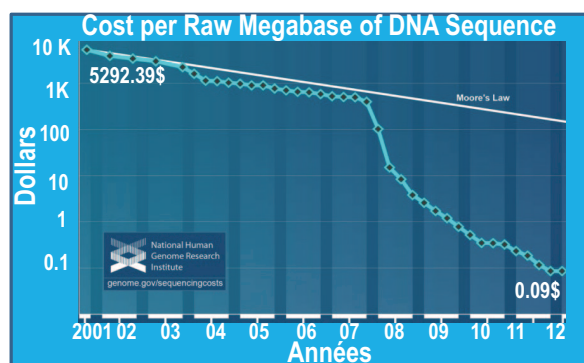


Figure 6. Evolution du coût du séquençage de l'ADN de 2001 à 2012<sup>1</sup> (Coût par mégabase brute de séquence d'ADN, exprimé en dollar).

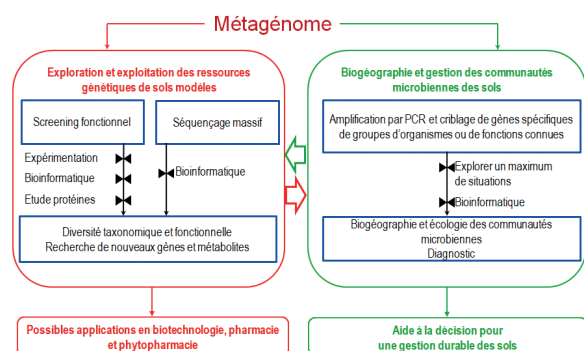


Figure 7. Deux types d'analyse du métagénome. (d'après Pivato et al., 2015).

**2-** L'analyse de la biodiversité ciblant des séquences particulières à valeur taxonomique ou fonctionnelle appliquée à de larges échelles spatiales (biogéographie).

Cette approche permet d'analyser un grand nombre de sols et d'identifier les filtres environnementaux impactant la diversité et la structuration des communautés microbiennes. Elle requiert la standardisation des méthodes d'analyse et l'établissement de référentiels pour l'interprétation des analyses biologiques des sols selon le type de sol, le mode d'usage (diagnostic). Ces diagnostics doivent être complétés par le choix des pratiques agricoles appropriées à l'aide d'outils d'aide à la décision en suivant une démarche participative. Ces travaux de biogéographie sont en particulier mis en œuvre dans le cadre du RMQS<sup>2</sup> (Réseau de mesure de la qualité des sols) qui est porté par le Gis Sol à l'Inra d'Orléans. Ce réseau comporte 2 200 sites d'échantillonnage qui font ainsi l'objet d'analyses systématiques des propriétés physico-chimiques par l'Inra d'Orléans et d'analyse systématique de la biomasse et de la structure génétique et maintenant de la diversité des communautés microbiennes à l'UMR Agroécologie (Dequiedt *et al.*, 2011; Karimi *et al.*, 2018 ; Ranjard *et al.*, 2013).

## Connaître la biodiversité : Biogéographie

La figure 8 indique les variations de biomasse microbienne basée sur la quantité d'ADN extraite des sols échantillonnés en France, dans le cadre du RMQS. Il apparaît que le niveau de biomasse varie significativement à l'échelle du pays. De plus, les résultats obtenus indiquent qu'il n'est pas possible de tirer d'interprétation générale sur la relation entre niveau de biomasse et fertilité des sols à l'échelle nationale. À titre d'exemple, les sols du sud-ouest présentent une biomasse microbienne plus faible que ceux du sud-est, alors qu'ils sont pourtant fertiles. Les interprétations correspondantes doivent

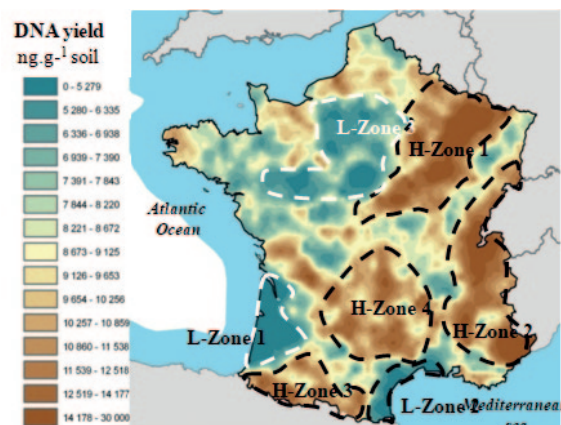


Figure 8. Carte de France de la biomasse microbienne basée sur la quantité d'ADN extraite des sols échantillonnés dans le cadre du RMQS (Dequiedt et al., 2011).

donc être réalisées à l'échelle d'une zone pédoclimatique homogène et nécessitent le développement de référentiels pour réaliser le diagnostic de la qualité des sols zone par zone. De plus, l'analyse des données indique que les propriétés physico-chimiques des sols représentent les principaux filtres de l'abondance microbienne. Le type de mode d'usage arrive ensuite. Aux modes d'usages comportant la diversité végétale la plus faible (vergers et vignobles) sont associés les niveaux de biomasse microbienne les plus bas.

Des résultats analogues ont été obtenus pour la structure des communautés bactériennes. À nouveau, il a été montré que les propriétés physico-chimiques jouent un rôle déterminant suivies du niveau d'anthropisation.

Lors de ces études de biogéographie, la relation aire/espèces, habituellement appliquée aux végétaux et animaux, a été appliquée à l'étude des com-

munités bactériennes. Une relation a ainsi pu être établie entre la diversité de l'habitat et la diversité microbienne (figure 9). Plus la diversité de l'habitat est importante plus la diversité microbienne l'est également.

### Connaître la biodiversité : Application du code-barres génétique à la faune du sol

Les méthodes de code-barres génétiques (métabarcoding) sont en développement pour la faune du sol. Ce type de développement a en particulier été réalisé dans le cadre du projet européen EcoFINDERS (figure 10). Ces méthodes permettent d'identifier le positionnement taxonomique d'organismes extraits du sol. Cette approche moléculaire permet donc de s'affranchir de l'identification sur la base de traits phénotypiques coûteuse en temps et nécessitant des expertises très spécifiques.

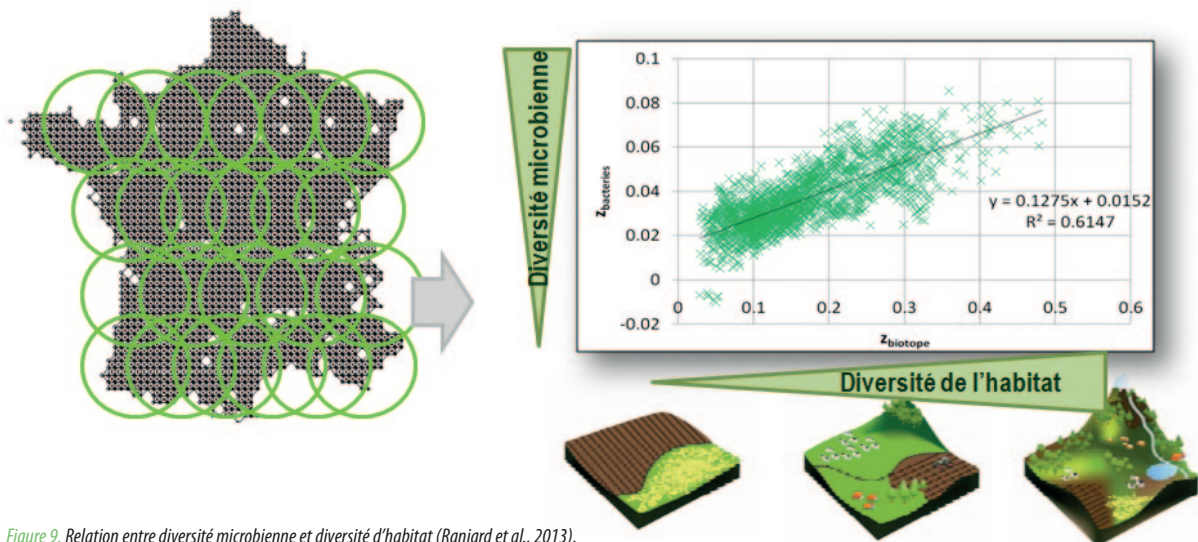


Figure 9. Relation entre diversité microbienne et diversité d'habitat (Ranjard et al., 2013).

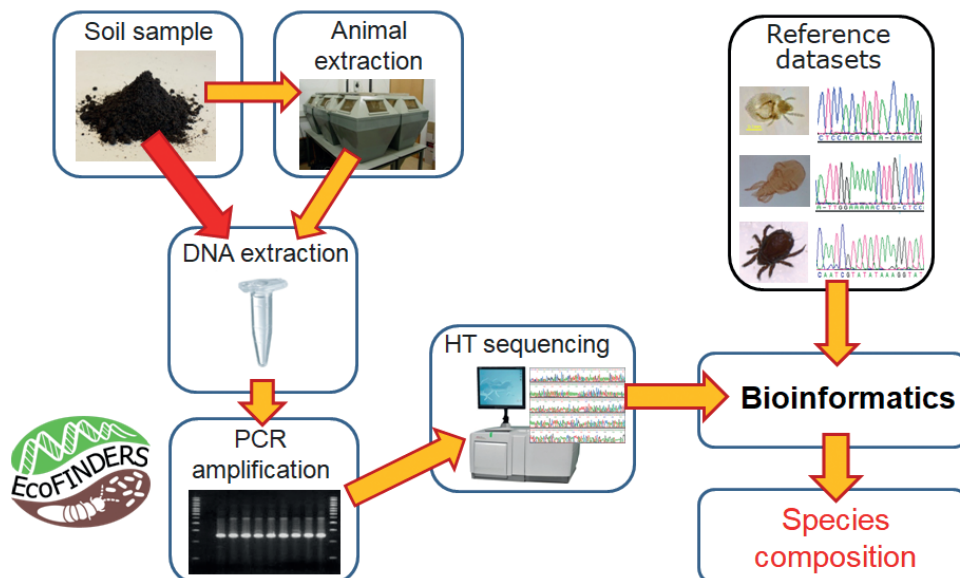


Figure 10. Utilisation de méthodes de code-barres génétiques (métabarcoding) pour la faune du sol (EcoFINDERS).



La biodiversité de la faune dans les sols est également bien loin d'être complètement explorée, comme le montre l'exemple des enchytréides en Europe (figure 11).



Figure 11. Nombre de nouvelles espèces d'enchytréides découvertes par pays en Europe, dans le cadre du projet EcoFINDERS.

## Comment utiliser les connaissances obtenues sur la biodiversité des sols?

Les développements évoqués précédemment permettent maintenant de proposer des analyses biologiques des sols avec les interprétations correspondantes et donc d'effectuer un diagnostic de la qualité biologique des sols. Des référentiels d'interprétation d'analyse biologique des sols ont en effet été développés lors des études de biogéographie grâce à l'application de méthodes standardisées d'analyse. Les progrès en cours et en développement dans la connaissance de l'impact des modes d'usage des sols et des pratiques agricoles sur la biodiversité ont pour objectif appliqué de proposer des conseils et des éléments d'aide à la décision sur la base des diagnostics réalisés. L'ultime objectif des recherches est donc d'orienter la biodiversité des sols pour la fourniture des fonctions et services écosystémiques attendus.

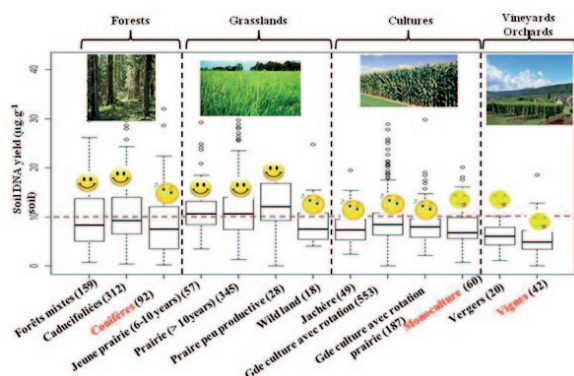


Figure 12. Variations de la biomasse moléculaire selon le mode d'usage des sols (projet ANR Biodiversité ÉCOMIC-RMQS coord. L. Ranjard).

Pour le diagnostic, la figure 12 présente à titre d'exemple la gamme de variations de la biomasse moléculaire selon le mode d'usage des sols. Ce type de référentiel doit bien sûr être croisé avec les référentiels associés au type de sol.

## Quels sont les services rendus par la biodiversité du sol?

Les services rendus sont d'une part des services d'approvisionnement :

- › Productivité primaire,
- › Ressources génétiques pour des applications biotechnologiques et pharmaceutiques.

Et d'autre part des services de régulation et d'entretien :

- › Régulation des nutriments, fertilité, cycles biogéochimiques (C, N, P, Fe, S,...),
- › Régulation du climat, cycles biogéochimiques (C – N),
- › Contrôle des ravageurs et des maladies, santé des slantes,
- › Eau, plantes, cycle de l'Eau, régulation des flux,
- › Biorémédiation, biofiltration, qualité de l'eau.

## Services d'approvisionnement : Productivité

La figure 13 illustre la relation entre biodiversité et productivité (service d'approvisionnement). Marcel Van der Heijden et coll (Van der Heijden *et al.*, 1998) ont montré que l'augmentation de la diversité des champignons mycorhiziens à arbuscules (représentés avec des ronds de couleurs différentes) se traduit par une augmentation de la diversité végétale. Cette augmentation de la diversité végétale se traduit par une meilleure exploitation des ressources (lumière, eau, nutriments) en particulier en occupant des strates et niches différentes.

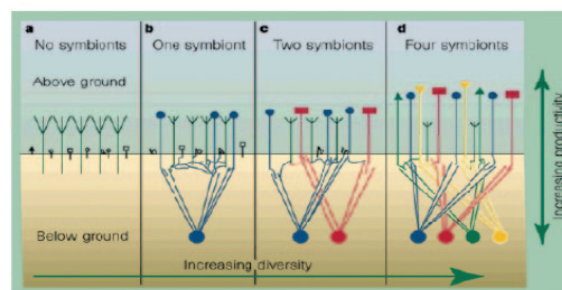


Figure 13. Relation entre biodiversité et productivité (adapté de Van der Heijden *et al.*, 1998).

La figure 14 montre que l'augmentation de la diversité des champignons mycorhiziens s'accompagne effectivement d'une biomasse végétale (productivité) plus élevée associée à une meilleure nutrition en phosphore des plantes qui se traduit d'ailleurs par une réduction de la teneur en phosphore du sol.

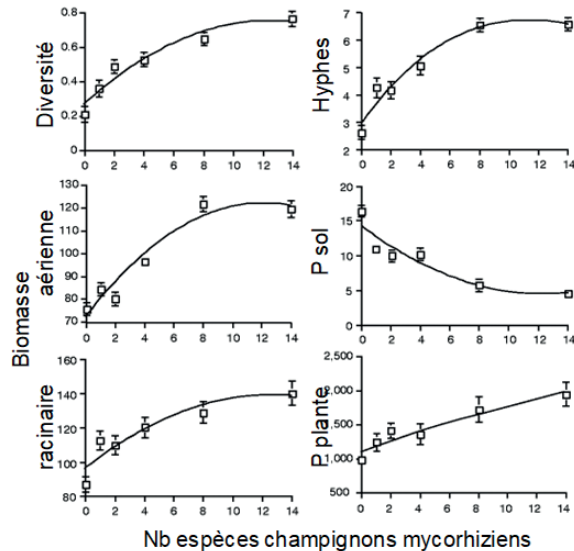


Figure 14. Relation entre nombre d'espèces de champignons mycorhiziens et biomasse végétale (adapté de Van der Heijden *et al.*, 1998).

### Services d'approvisionnement : Ressources génétiques pour de possibles applications biotechnologiques et pharmaceutiques

Les sols sont de fantastiques réservoirs de diversité comprenant des gènes et métabolites présentant potentiellement des intérêts en biotechnologie, pharmacie et phytopharmacie. Ces ressources offrent des possibilités d'adaptation de l'humanité à de nouveaux challenges.

### Services de régulation : nutriments, climat, cycles biogéochimiques

Concernant le cycle du Carbone, Pierre-Alain Maron a évalué la possible redondance fonctionnelle dans le processus de minéralisation de la matière organique. Pour cela, il a mis en œuvre une stratégie permettant de comparer le niveau de minéralisation (estimé par la mesure de l'émission de CO<sub>2</sub>) dans des échantillons de sols dans lesquels le niveau de biomasse était maintenu constant (représenté par la même taille des boîtes) alors que la biodiversité (représentée en couleur au sein des boîtes) était diluée. Il a ainsi mis en évidence une relation entre le niveau de biodiversité microbienne et le niveau de minéralisation de la matière organique. Ces résultats indiquent l'importance de la biodiversité microbienne, à biomasse constante, dans

le processus biologique étudié et donc les limites de la redondance fonctionnelle. La redondance fonctionnelle représente en effet l'aptitude de différentes populations à remplir la même fonction, ce qui suggérerait la possibilité de réduire la biodiversité sans que la fonction correspondante n'en soit affectée, ce qui n'est pas le cas ici.

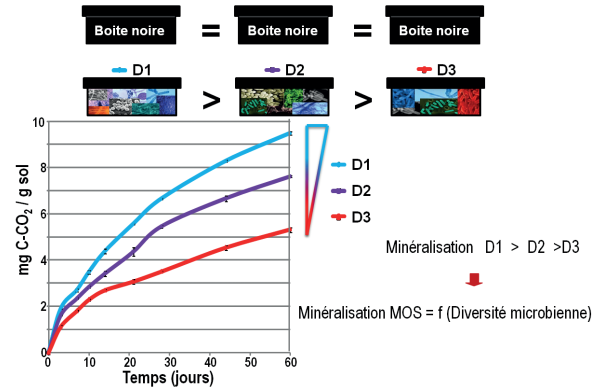


Figure 15. Vitesse de minéralisation en fonction de la diversité microbienne du sol (D1 : forte diversité, D3 : faible diversité) (Maron *et al.*, 2018).

Ces résultats doivent être cependant repositionnés dans un contexte plus général. Au premier abord, on déduit des travaux précédents que la diminution de la diversité microbienne conduit à une diminution de la minéralisation de la matière organique et donc à une diminution de la libération de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère, représentant un effet favorable sur la régulation du climat. Cependant, ce n'est pas si simple. En effet, la réduction de la minéralisation de la matière organique s'accompagne d'une réduction de la libération d'éléments nutritifs pour les plantes, entraînant une réduction de l'activité photosynthétique et donc de la capture de CO<sub>2</sub>. La quantité de matière organique incorporée au sol est alors diminuée. Il s'agit donc de trouver des méthodes de gestion qui permettent d'ajuster au mieux le niveau et la période de minéralisation de la matière organique au regard des besoins de la plante, afin que le dis-service représenté par dégagement de CO<sub>2</sub>, issu de la minéralisation de la matière organique, soit au mieux compensé par le bénéfice apporté à la production primaire (service d'approvisionnement).

Les travaux de l'équipe de Sébastien Fontaine de l'Inra de Clermont-Ferrand ouvrent des pistes pour la recherche de ces compromis. Ainsi, il propose un modèle basé sur des observations faites en situations peu anthropisées (Perveen *et al.*, 2014).

En pleine croissance, le prélèvement d'azote minéral par la plante se traduit par une diminution de la concentration de cet élément dans la solution du sol. Les microorganismes limités par la teneur en carbone sont favorisés, ils minéralisent la matière



organique. Cette minéralisation s'accompagne d'une libération d'azote minéral valorisé par la plante en croissance. La libération d'azote minéral est ainsi en phase avec la nutrition de la plante. Les fuites (nappe phréatique) sont limitées et le disservice associé à la libération de CO<sub>2</sub> est compensé par la meilleure nutrition de la plante.

À l'inverse, lorsque la plante n'est pas en phase de croissance, elle prélève peu d'azote minéral ; la présence d'azote dans la solution du sol favorise donc les microorganismes limités par l'azote. Ces microorganismes contribuent au stockage de la matière organique.

Un des enjeux de l'agroécologie est de développer des systèmes de culture qui permettent d'ajuster au mieux la minéralisation de la matière organique aux besoins de la plante afin d'optimiser l'équilibre entre stockage et minéralisation de la matière organique. Cette démarche est conforme à l'initiative 4p1000<sup>3</sup>.

Un enjeu majeur des systèmes agricoles est de boucler le cycle de l'azote en maximisant les entrées d'azote atmosphérique dans les sols via la fixation biologique de l'azote et en minimisant les fuites d'azote sous forme de nitrate (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) et de protoxyde d'azote (N<sub>2</sub>O) puissant gaz à effet de serre.

Dans ce cas, il y a convergence entre enjeux agromonomiques et environnementaux. Les fuites d'azote représentent en effet un coût à la fois pour l'agriculture et pour l'environnement.

Les enjeux des pratiques agroécologiques en relation avec cycle de l'azote sont donc de :

- › favoriser les entrées d'azote par fixation biologique de l'azote grâce à la culture de légumineuses,
- › minimiser les fuites.

Grâce à une coopération étroite entre l'Inra de Dijon et les industriels, la qualité et la fiabilité des inoculants ont été améliorés (figure 16).

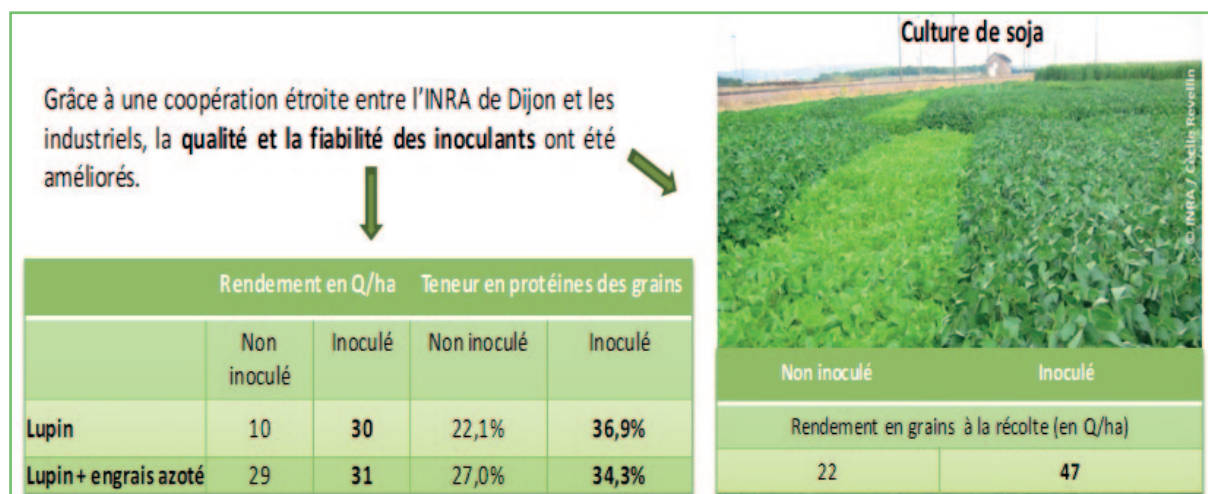


Figure 16. Promouvoir l'entrée d'azote atmosphérique : fixation biologique. (Photo Cécile Revellin, Inra Dijon).

L'enzyme codé par nosZ réduit le protoxyde d'azote (N<sub>2</sub>O), puissant gaz à effet de serre, en N<sub>2</sub> gaz majoritaire de l'atmosphère.

Laurent Philippot a évalué l'effet de trois niveaux de pâturage. Il a cartographié dans ces conditions expérimentales (figure 17) :

- › l'abondance de la communauté bactérienne totale sur la base du nombre de copies du gène ARNr 16S,
- › le niveau d'émission de N<sub>2</sub>O,
- › la proportion de bactéries génétiquement capables de réduire N<sub>2</sub>O (% nosZ / 16S rDNA).

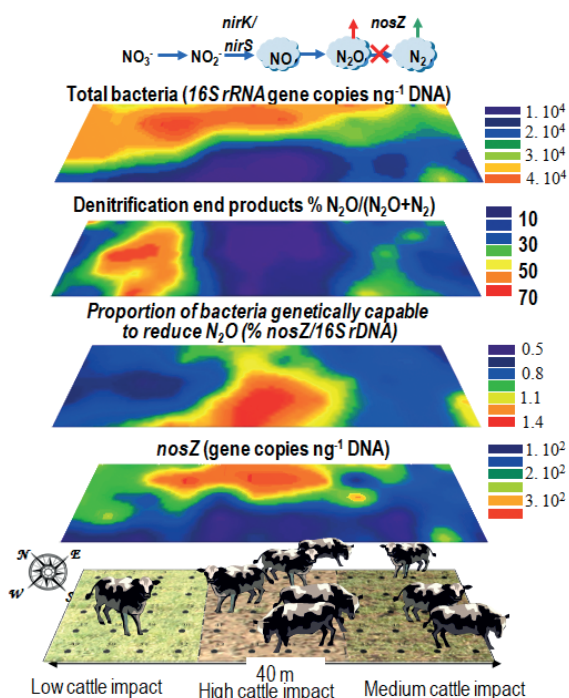


Figure 17. De haut en bas. • Les différentes étapes de la réduction des oxydes d'azote et la contribution des enzymes microbiens correspondants. • Cartographie de l'abondance de la communauté bactérienne totale. • Cartographie du niveau d'émission de N<sub>2</sub>O. • Cartographie de la proportion de bactéries génétiquement capables de réduire N<sub>2</sub>O. • Cartographie de l'abondance bactéries génétiquement capables de réduire N<sub>2</sub>O. • Les trois niveaux de pâturage de l'expérience. (Philippot et al., 2009).

Les résultats indiquent la bonne correspondance entre la proportion de bactéries capables de réduire  $N_2O$  (présentant le gène *nosZ*) dans la communauté bactérienne totale et le niveau d'émission de  $N_2O$ . Ainsi, ces émissions sont les plus faibles (couleur bleu foncé) lorsque l'abondance relative des populations capables de réduire  $N_2O$  est la plus élevée (couleur orangée), correspondant au traitement 'fort niveau de pâturage'.

Ces résultats indiquent donc que la mesure de la proportion des communautés bactériennes aptes à réduire  $N_2O$  (comportant le gène *nosZ*) au sein de la communauté bactérienne totale est un bon prédicteur de l'émission de  $N_2O$  et semble donc être un bioindicateur pertinent.

Catherine Henault et Cécile Revellin ont montré l'intérêt d'inoculer les légumineuses avec des Rhizobia qui comportent le gène *nosZ*, et présentent donc le double avantage d'assurer avec la légumineuse la fixation biologique de l'azote atmosphérique mais également la réduction de  $N_2O$  et donc la diminution de son émission (figure 18).

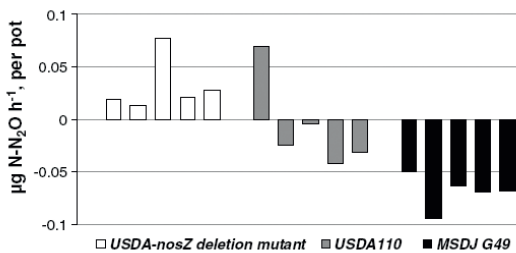


Figure 18. Réduire les fuites d'azote : inoculer des souches de Rhizobia réductrices de  $N_2O$  (Henault et Revellin, 2011).

Certains génotypes végétaux inhibent la nitrification limitant la présence d'oxydes d'azote ( $NO_2^-$  et  $NO_3^-$ ) et diminuent ainsi (figure 19) :

- › la dénitrification et donc l'émission de  $N_2O$ ,
- › les fuites d'azote par lessivage de  $NO_3^-$ .

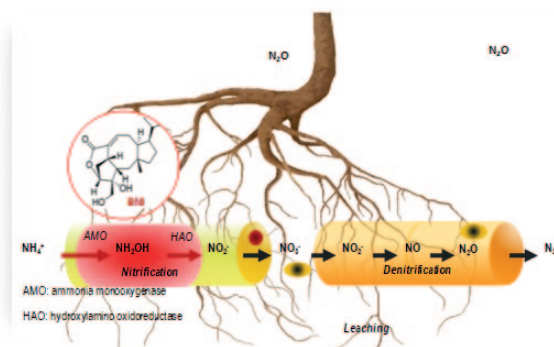


Figure 19. Réduire les fuites d'azote : sélectionner des génotypes végétaux inhibant la nitrification (Philippot et Hallin, 2011).

Par ailleurs, il est important de noter que les sols ne sont pas uniquement source de  $N_2O$ , certains peuvent également représenter un puits de  $N_2O$  (figure 20). L'équipe de Laurent Philippot a montré qu'il existe une grande variabilité selon les sols européens. La capacité des sols à se comporter comme un puits de  $N_2O$  a été principalement attribuée à un nouveau groupe bactérien. Ces bactéries représentent des bioindicateurs potentiels de la capacité des sols à réduire le  $N_2O$  en  $N_2$ .

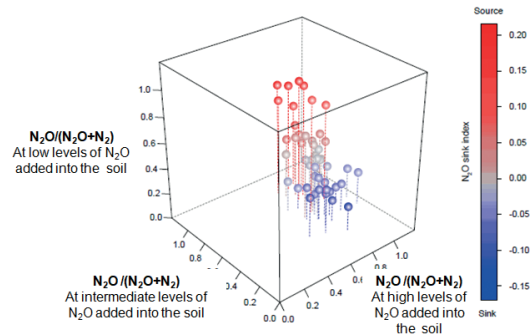


Figure 20. Les sols, puits ou sources de  $N_2O$  (Jones et al., 2014).

La figure 21 illustre l'importance de la dynamique du fer en relation avec les interactions plante-microbiote. La boucle de rétroaction indiquée sur cette figure illustre que le coût pour la plante représenté par la libération de rhizodépôts est compensé par les bénéfices apportés à la plante par les microorganismes entretenus par ces rhizodépôts. En effet, la demande en fer conjointe de la plante et des microorganismes rhizosphériques contribue à réduire la biodisponibilité en fer déjà faible dans les sols (1). Cette faible biodisponibilité en fer se traduit par le recrutement dans la rhizosphère par la plante de populations de *Pseudomonas* présentant une forte aptitude à la compétition pour le fer du fait de la synthèse de sidérophores particuliers (2). Ces sidérophores très efficaces présentent une affinité pour le fer supérieure à ceux des sidérophores d'eukaryotes phytopathogènes (champignons et oomycètes) provoquant ainsi une diminution de leur croissance saprophyte (antagonisme microbien) et donc de la fréquence des infections racinaires (3). Non seulement ces sidérophores n'entrent pas en compétition pour le fer avec la plante-hôte mais au contraire ils promeuvent sa nutrition en cet élément, de telle sorte que la santé et la nutrition en fer de la plante-hôte sont favorisées par les populations de *Pseudomonas* sélectionnées en situation de stress ferrique (4).

### Services de Régulation - Contrôle des ravageurs et des maladies – Santé des Plantes

Le piétin échaudage est une maladie grave affectant le blé provoquant des nécroses racinaires dues à un champignon phytopathogène appelé *Gaeumannomyces graminis* var. *tritici*. Lors d'une monoculture de blé en présence de ce champignon, la maladie s'aggrave au cours des premières années, puis elle

régresse progressivement les années suivantes aboutissant à une résistance naturelle de la culture à cette maladie. Cette régression a été associée à l'augmentation progressive de l'abondance de populations de *Pseudomonas* productrices de l'antibiotique DAPG (figure 22). En cas de rupture de la monoculture, la pression de sélection vis-à-vis de ces populations productrices d'antibiotique par les racines nécrosées de blé n'est plus maintenue et la culture de blé suivante est à nouveau soumise au cycle décrit ci-dessus. De façon intéressante, ce phénomène d'acquisition de résistance en monoculture et d'enrichissement des populations productrices d'antibiotiques a été enregistré dans tous les sols testés.

Il ne s'agit bien évidemment pas de prôner la monoculture qui pose d'autres problèmes agronomiques et environnementaux. Mais, au-delà de l'intérêt académique que représente l'analyse des interactions multitrophiques impliquées, les recherches correspondantes ont des retombées opérationnelles. En effet, la culture de cultivars de blé choisis pour leur aptitude à promouvoir les populations de *Pseudomonas* productrices de DAPG a été testée avec succès pour limiter le développement de *Rhizoctonia solani* responsable du syndrome 'replanting disease' dans les vergers de la vallée de Salinas en Californie (figure 23).

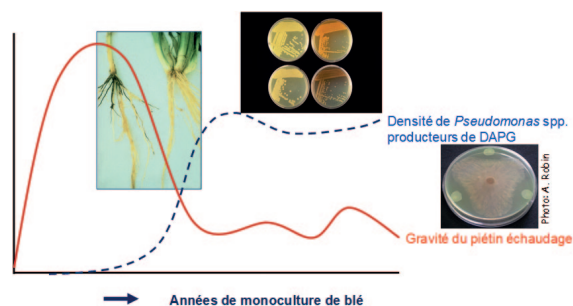


Figure 22. Résistance au piétin échaudage chez le blé (illustration basée sur Raaijmakers et Weller, 1998).

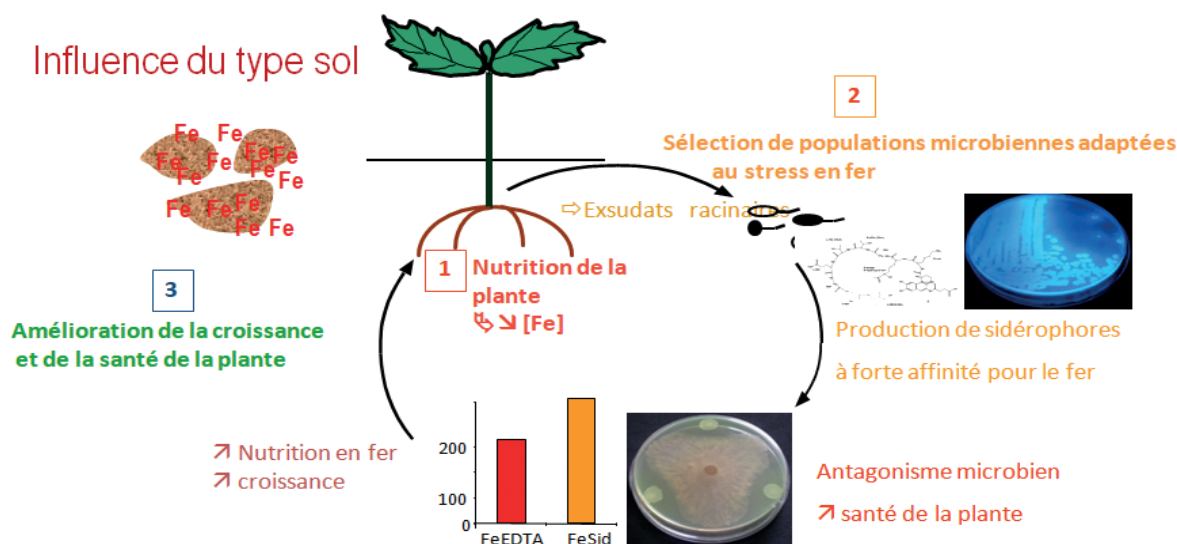


Figure 21. Dynamique du fer dans la rhizosphère (Lemanceau et al., 2018).



## Services de régulation - Cycle de l'eau – Régulation des flux

Le microbiote tellurique influence également la régulation des flux d'eau. Sur la figure 24 est représenté le taux de l'infiltration de l'eau dans le sol en fonction de la biomasse de vers de terre anéciques (établissant des galeries verticales) et endogés (évoluant principalement sous la surface du sol ou au contact des racines). La figure 25 indique l'effet du mode d'usage du sol sur le nombre de galeries, on voit ainsi que ce nombre est supérieur dans le sol soumis à une rotation intégrant une prairie comparée à un sol soumis à une rotation sans prairie.

## Services de régulation - Biorémédiation - Biofiltration - Qualité de l'eau

Le microbiote tellurique contribue également à la dégradation de pesticides dans les sols. À titre d'exemple, sur la figure 26 est représentée la cinétique de biodégradation du diuron (herbicide) dans un sol ayant précédemment reçu ce pesticide ('sol adapté') ou non. On voit clairement que dans le 'sol adapté' la biodégradation de l'herbicide est plus rapide que dans le sol témoin. Cette biodégradation accélérée est associée à un enrichissement au sein du microbiote du 'sol adapté' d'une séquence d'ADN impliquée dans la biodégradation du diuron (*puhB*).

Densités de <i>Pseudomonas</i> producteurs de PhlD dans la rhizosphère de cultivars de blé cultivés en sols de verger	Sols			
	Cultivars de blé	CV	WVC-A	WVC-GS
Eltan		ND	ND	ND
Hill-81		$2.09 \times 10^4 a^7$	ND	ND
Lewjain		$2.15 \times 10^6 b$	$2.75 \times 10^5 a$	12,500
Madsen		$3.63 \times 10^4 a$	ND	ND
Penawawa		$4.80 \times 10^4 ab$	$3.20 \times 10^5 a$	ND

Figure 23. Choix de graminées promouvant les populations bactériennes productrices d'antibiotiques (Mazzola et al., 2004).

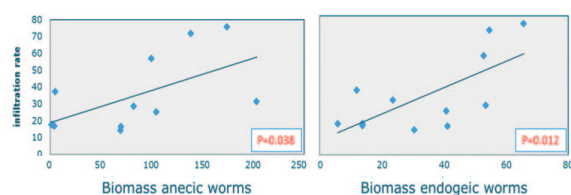


Figure 24. Relation entre la biodiversité des vers de terre et la régulation de l'eau (Résultats J. Faber, projet EcoFINDERS).

## Diuron mineralization potential (radiorespirometric approach <sup>14</sup>C-diuron)

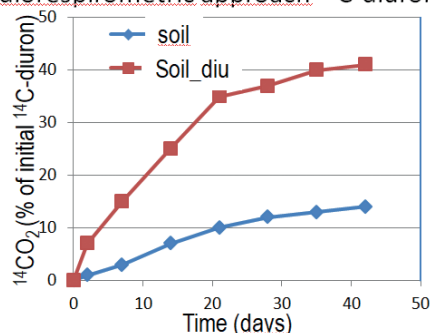


Figure 26. Biodégradation du diuron (herbicide) dans un sol ayant précédemment reçu cet herbicide ou non (Norme ISO 17601, Pesce et al., 2013).

La figure 27 représente l'antagonisme entre la durée minimale de la présence de l'herbicide dans le sol pour remplir son rôle (enjeu agronomique) et la rapidité de sa biodégradation (enjeu environnemental).

Les avancées correspondantes obtenues dans le groupe de Fabrice Martin-Laurent ouvrent des perspectives d'applications pratiques en agroécologie, pour l'établissement de bandes enherbées de seconde génération, en contrebas de zones de ruissellement à la rupture entre cette zone de ruissellement et la rivière, qui comprennent des bioréacteurs pour l'accélération du processus de biodégradation de pesticides.

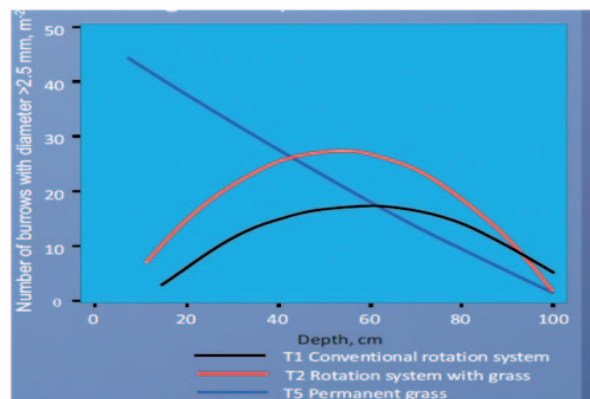


Figure 25. Impact du niveau d'intensification (Résultats J. Faber, projet EcoFINDERS).

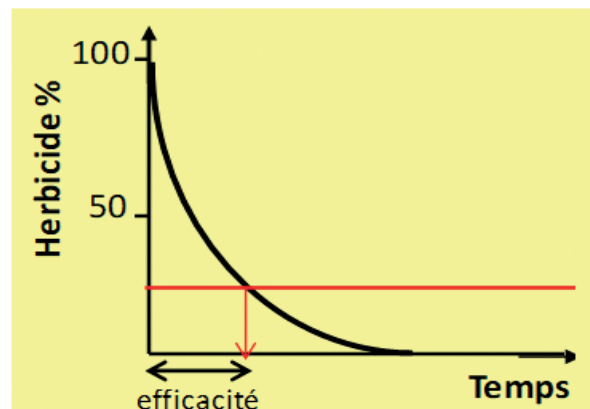
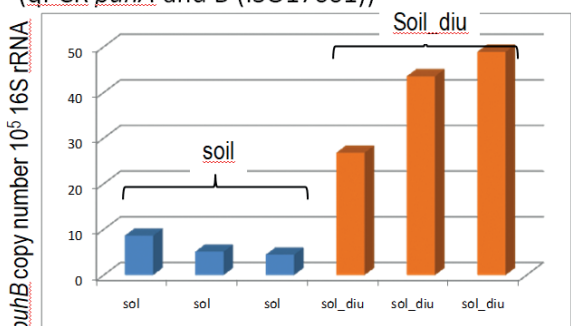


Figure 27. Dégradation de l'herbicide dans un sol au cours du temps. La ligne rouge représente le seuil d'efficacité de cet herbicide (Martin-Laurent et Therond, 2018).

## Diuron degrading genetic potential (qPCR *puhA* and B (ISO17601))



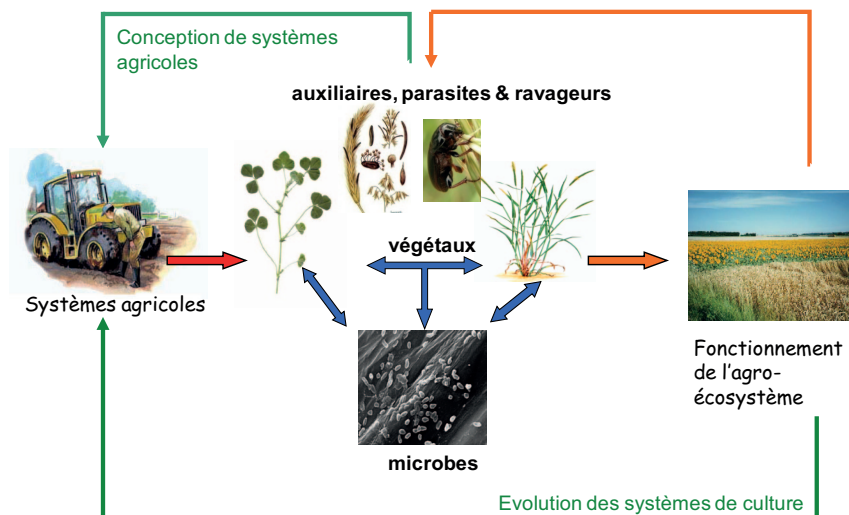


Figure 28. Rôle du microbiote tellurique dans le fonctionnement biologique des sols (Illustration Ph. Lemanceau).

## CONCLUSION

Le microbiote tellurique joue donc un rôle central dans le fonctionnement biologique des sols et la fourniture de services écosystémiques (figure 28). L'abondance, la diversité et les activités de ce microbiote sont directement influencées par les interactions plantes-microorganismes et par les pratiques agricoles. Un enjeu de l'agroécologie est de développer des systèmes agricoles qui préservent et valorisent la biodiversité et les interactions plantes-microorganismes pour la fourniture de services écosystémiques.

Les plantes entretiennent en effet dans leur rhizosphère un microbiote abondant et actif via la libération d'une part importante de leurs photosynthétats sous forme de rhizodépôts. Cependant, les systèmes de culture intensifs minimisent la contribution de la biodiversité et des interactions biotiques, en particulier plantes-microorganismes, et reposent plus sur l'apport d'intrants de synthèse et la mécanisation.

Pour finir cette présentation, il est important de souligner l'importance du paiement des services écosystémiques comme levier pour promouvoir les pratiques et les systèmes qui les favorisent. La biodiversité des sols et la fourniture de services écosystémiques associés représentent une valeur importante. Dans ce contexte, la FAO<sup>4</sup> propose une démarche dans laquelle l'ensemble des acteurs (les producteurs, l'industrie agro-alimentaire, les consommateurs, les politiques) sont associés la valorisation des services écosystémiques en suivant une démarche gagnant-gagnant.

## Notes

- 1/ Source et informations actualisées jusqu'en 2019 : <https://www.genome.gov/about-genomics/fact-sheets/DNA-Sequencing-Costs-Data>
- 2/ <https://www.gissol.fr/le-gis/programmes/rmq-34>
- 3/ <http://agriculture.gouv.fr/cop22-linitiative-4-pour-1000>
- 4/ Food and Agriculture Organization : Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture

## Références bibliographiques

- Dequiedt *et al.* (2011) *Glob. Ecol. Biogeogr.* 20:641-652.
- Hénault et Revellin (2011) *Plant Soil* 346:289-296.
- Karimi *et al.* (2018) *Sci Adv*4(7): eaat1808. doi: 10.1126/sciadv.aat1808.
- Jones *et al.* (2014) *Nat. Clim. Chang.* 4:801-805.
- Lemanceau *et al.* (2018) Interactions plantes/micro-organismes dans la rhizosphère. In Lemanceau P., Blouin M. eds 'Les sols au cœur de la zone critique 6', 'Collection Système Terre – Environnement, Série Les Sols'. Chap. 4, p. 57-81.
- Maron *et al.* (2018) *Appl. Environ. Microbiol.* 84 :9 e02738-17.
- Martin-Laurent et Therond. 2018. *Biofutur* 388:54-59.
- Mazzola *et al.* (2004). *Microbiol. Ecol.* 48:338-348.
- Orgiazzi *et al.* (2016) A knowledge-based approach to estimating the magnitude and spatial patterns of potential threats to soil biodiversity. *Science of the Total Environment* 545-546;11-20.
- Perveen *et al.* (2014) *Glob. Change Biol.* 20:1174-1190.
- Pesce *et al.* (2013) *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 97:1661-1668
- Philippot *et al.* (2009) *Environ. Microbiol.* 11:3096-3104.
- Philippot & Hallin (2011) Towards food, feed and energy crops mitigating climate change *Trends Plant Science.* 16:476-480.
- Pivato B., Chemidlin Prévost-Bouré N., Lemanceau P. (2015) Microbiome du sol. In Champomier-Vergès M.C., Zagorec M. eds. «La métagénomique. Développements et futures applications.» Editions Quae. Chap. 6, 71-87.
- Raaijmakers & Weller (1998) *MPMI* 11:144-152 ; xxxx
- Ranjard *et al.* (2013) *Nat. Commun.* 4:1434, doi:10.1038/ncomms2431.
- Van der Heijden *et al.* (1998) *Nature* 396:69-72.