TECHNIQUES
DE L'INGÉNIEUR

Réf. : **GE1051 V1**

Date de publication :
**10 octobre 2019**

# Qualité écologique des sols

Cet article est issu de : **Environnement - Sécurité | Environnement**

par **Pierre-Alain MARON, Lionel RANJARD**

**Mots-clés**
biodiversité | Ecologie | agriculture | Ville durable | sol

**Résumé** Le sol ne doit plus être considéré comme un simple support inerte de production, mais comme un écosystème complexe avec un patrimoine biologique riche et fonctionnel, à même de fournir des fonctions et des services pour les sociétés humaines : production alimentaire, mitigation des changements climatiques, dépollution… Cet article décrit les grandes avancées de la recherche dans le domaine de l'écologie des sols ayant permis le développement d'outils et fortement amélioré les connaissances sur la biodiversité des sols. Ces avancées permettent aujourd'hui de développer des politiques de préservation de cette ressource en système rural et urbain afin de l'utiliser de façon durable.

**Keywords**
biodiversity | ecology | agriculture | sustainable city | soil

**Abstract** Soil must no longer be considered as a simple inert support for production but as a complex ecosystem with a rich functional biological heritage that carries out functions and services for human societies: food production, mitigation of climate change, decontamination… In this article we describe the major advances in soil ecological research over the past 20 years, which have culminated in the development of powerful tools and greatly improved our knowledge of soil biodiversity. These advances are now being used to develop strategies for the preservation and sustainable use of this resource in rural and urban systems.

**Pour toute question :**
Service Relation clientèle
Techniques de l'Ingénieur
Immeuble Pleyad 1
39, boulevard Ornano
93288 Saint-Denis Cedex

**Par mail :**
infos.clients@teching.com
**Par téléphone :**
00 33 (0)1 53 35 20 20

Document téléchargé le : **16/10/2019**
Pour le compte : **7200097598 - editions ti // nc AUTEURS // 195.25.183.157**

© Techniques de l'Ingénieur | tous droits réservés

# Qualité écologique des sols

*par* **Pierre-Alain MARON**
*Directeur de recherche*
*UMR Agro écologie, centre INRA Dijon, France*

*et* **Lionel RANJARD**
*Directeur de recherche*
*UMR Agro écologie, centre INRA Dijon, France*

**1. Écosystème sol** ..... GE 1 051 – 3
1.1 Le sol, une matrice complexe et structurée ..... — 3
1.2 Le sol, une mosaïque d'habitats riches et diversifiés ..... — 3
1.2.1 Microagrégats du sol ..... — 3
1.2.2 Macroagrégats du sol ..... — 3
1.2.3 Rhizosphère ..... — 3
1.2.4 Résidusphère ..... — 5
1.2.5 Drilosphère ..... — 5
1.3 Habitants et services rendus du sol ..... — 5
1.3.1 Micro-organismes ..... — 7
1.3.2 Microfaune ..... — 8
1.3.3 Mésofaune ..... — 8
1.3.4 Macrofaune ..... — 9
1.4 Interactions biotiques complexes dans le sol : de l'ami sincère à l'ennemi juré ! ..... — 9
1.4.1 Interactions bénéfiques ..... — 10
1.4.2 Interactions négatives ..... — 10
1.4.3 Réseaux trophiques et réseaux de cooccurrence ..... — 10

**2. Grandes techniques pour étudier la vie du sol** ..... — 10
2.1 Capture et observation ..... — 10
2.2 Écologie moléculaire ..... — 11
2.3 Référentiels nationaux au service du diagnostic de la qualité des sols ..... — 12
2.4 Principales menaces pour le sol ..... — 13

**3. La qualité écologique des sols au service d'une société durable** ..... — 14
3.1 Transition agroécologique ..... — 14
3.2 La qualité biologique des sols agricoles ..... — 15
3.3 Impact des pratiques agricoles sur la biodiversité des sols ..... — 16

**4. La qualité écologique des sols au service des villes durables** — 18
4.1 Bilan de la biodiversité des sols en ville et impact des modes d'usage ..... — 18
4.1.1 Vers de terre ..... — 19
4.1.2 Arthropodes ..... — 19
4.1.3 Nématodes ..... — 20
4.1.4 Micro-organismes ..... — 21
4.2 Vers une meilleure intégration de la biodiversité des sols dans la transition vers des villes durables ..... — 21

**5. Résilience écologique des sols** ..... — 22

**6. Les sciences participatives au service des sols** ..... — 23

**7. Conclusion** ..... — 25

**8. Glossaire** ..... — 26

**Pour en savoir plus** ..... Doc. GE 1 051

Parution : octobre 2019 - Ce document a ete delivre pour le compte de 7200097598 - editions ti // nc AUTEURS // 195.25.183.157

Copyright © - Techniques de l'Ingénieur - Tous droits réservés

*Depuis longtemps et jusqu'à récemment le sol a été le domaine des pédologues et des géologues et a été défini par ces domaines scientifiques. Pour les géologues, le sol est une couche presque insignifiante à la surface de l'écorce terrestre, qui peut représenter quelques centimètres jusqu'à plusieurs mètres d'épaisseur. Pour les pédologues, le sol est une matrice en trois dimensions (horizontale, verticale et temporelle), constitué par l'assemblage de particules minérales (sables, limons, argiles) en agrégats de différentes tailles, formes et stabilité. Cette structuration physique lui confère une forte complexité. À ce titre, le sol représente la matrice environnementale la plus hétérogène et structurée de notre planète.*

*Alors que l'écologie est un domaine scientifique qui est apparu au XVIII^e^ siècle, les écologues ont commencé sérieusement à s'intéresser au sol depuis une soixantaine d'années. Les raisons de ce désintérêt résultent dans la complexité de cette matrice, de son inaccessibilité, mais aussi sûrement dans la nature « ordinaire » de la biodiversité qu'il héberge, de loin moins porteuse médiatiquement que la diversité des espèces emblématiques connues du grand public. À tout ceci, il faut ajouter que le sol pâtit d'une image culturelle un peu négative qui l'assimile à un lieu de sépulture ou d'enfouissement de déchets. Toutefois, ce regain d'intérêt de la part des écologues, couplé à des évolutions technologiques et méthodologiques très importantes dans nos capacités à caractériser le vivant, a engendré une évolution presque exponentielle des connaissances sur la biologie et l'écologie du sol ces dernières années. Ainsi, ces cinq dernières années plus de 5 000 articles sur l'écologie du sol ont été publiés sur les 15 000 référencés depuis 1950 (source Web of science, 2019 [1]).*

*Cette accumulation de nouvelles connaissances a permis de considérer le sol différemment, non plus comme un simple support inerte de production alimentaire ou de construction, mais comme un écosystème qui renferme presque 1/3 de la diversité biologique de notre planète. De plus, cette biodiversité est maintenant démontrée comme fondamentale dans la production de services écosystémiques nécessaires au développement et à la durabilité de notre société. Son importance a notamment été réaffirmée dans le récent rapport de l'IPBES (Plateforme intergouvernementale sur la biodiversité et les services écosystémiques) pointant l'accélération du taux d'extinction des espèces et l'urgence d'entreprendre des actions de restauration et de protection des milieux, dont le sol, pour le bien de tous (pour information, consulter https://www.ipbes.net/news/Media-Release-Global-Assessment-Fr).*

*Dans cet article, nous présentons le bilan des connaissances actuelles sur le sol en tant qu'habitat pouvant héberger une très grande diversité d'organismes vivants de taille, de forme et de ressources génétiques différentes. Ce bilan de connaissances sera complété par une description des outils de caractérisation de ces différents organismes, certains pouvant être piégés et observés alors que d'autres, plus microscopiques (bactéries, champignons), ne peuvent être étudiés finement que par des approches de biologie moléculaire basées sur l'étude de l'ADN extrait du sol. Enfin, nous ferons le lien entre cette qualité écologique des sols et leur rôle dans la durabilité de nos modes de production et de vie. Plus précisément, nous décrivons l'importance de la préservation de la qualité écologique des sols comme un enjeu majeur dans le contexte actuel de transition vers des modèles de gestion durables des espaces ruraux et urbains.*

Parution : octobre 2019 - Ce document a ete delivre pour le compte de 7200097598 - editions ti // nc AUTEURS // 195.25.183.157



Copyright © - Techniques de l'Ingénieur - Tous droits réservés

# 1. Écosystème sol

**L'écologie des sols, un peu d'histoire…**

Historiquement étudié pour ses propriétés physiques et chimiques, l'importance du sol en tant qu'habitat pour la biodiversité n'a que récemment été reconnue. On a ainsi longtemps cru que le sol constituait un support inerte dans lequel plongent les racines des plantes pour y prélever les éléments nécessaires à leur développement, sauf le carbone. Les travaux pionniers sur la biologie du sol remontent au XIX$^{e}$ siècle avec les premières études naturalistes réalisées par des zoologistes cherchant à établir des inventaires de la pédofaune à partir de méthodologies d'échantillonnage nouvellement développées comme l'appareil de Berlese (du nom de son inventeur Antonio Berlese). La grande diversité des organismes du sol commence alors à être mise en évidence… On ne peut cependant pas encore parler d'« écologie du sol » car ces travaux n'intègrent ni le rôle des organismes ni les interactions entre ces organismes et la matrice sol. En 1881, l'ouvrage fondateur publié par Darwin « Rôle des vers de terre dans la formation de la terre végétale » rapporte le rôle de la faune du sol dans la pédogénèse et la fertilité des sols. Bien qu'ayant suscité un vif intérêt au moment de la publication, il faudra attendre près d'un quart de siècle pour que les thèses apportées par Darwin soient réellement reprises et développées. Ainsi, ce n'est qu'au milieu du XX$^{e}$ siècle que l'écologie du sol prend réellement son essor en tant que domaine scientifique, dans la mouvance du développement de l'écologie et des concepts associés. L'écologie du sol s'est depuis continuellement développée grâce à des avancées tant conceptuelles que méthodologiques, indispensables pour étudier les organismes peuplant cet environnement si particulier.

## 1.1 Le sol, une matrice complexe et structurée

Le sol est la matrice physico-chimique naturelle la plus complexe et la plus structurée de notre planète. La variabilité de cette matrice peut être déclinée selon trois dimensions : horizontale, verticale et temporelle.

– La **variabilité horizontale** résulte de la distribution spatiale des différents types de sols qui est sous l'influence du type de roche-mère (calcaire, granitique, métamorphique…) à grande échelle [2]. À plus petite échelle, il est aussi possible d'observer des variations significatives des caractéristiques physico-chimiques du sol avec un pixel de variation qui peut descendre jusqu'à 5 m$^2$ selon les pédologues.

– La **variabilité verticale** est organisée en différentes couches appelées « horizons », qui se sont formées au cours du temps (cf figure **1**). Les couches de surface sont souvent plus riches en matière organique et celles plus profondes plus riches en éléments minéraux.

– La **variabilité temporelle** du sol est due au processus de pédogénèse. Ce processus est à l'origine de la création du sol à partir de l'altération de la roche-mère par le climat, la végétation ou l'action de l'homme. La formation d'un sol est un processus lent avec 0,05 mm de sol formé par an en moyenne. Il faut donc, pour un sol moyennement profond (1 m à 1 m 50) environ 10 000 à 100 000 ans pour le former.

Le sol est constitué de trois phases : une phase solide, une phase liquide et une phase gazeuse. La phase solide représente à elle seule environ 50 % du volume d'un sol. Elle se compose en grande partie d'une fraction minérale (95 à 99 %) et d'une fraction organique (1 à 5 % de la masse). La fraction minérale est constituée des produits issus de la dégradation de la roche-mère qui sont classés en fonction de leur taille : graviers et cailloux (> 2 mm) ; sables (50 µm à 2 mm) ; limons (2 à 50 µm) ; argiles (< 2 µm). La proportion en argiles, sables et limons détermine la **texture** du sol. La fraction organique (ou matière organique) provient de la décomposition et du métabolisme des êtres vivants (débris végétaux, déjections animales, cadavres…) auxquels s'ajoute la matière organique vivante (racines, animaux du sol, micro-organismes). Les interactions entre les éléments minéraux (sables, limons et sables) et la matière organique induisent la formation d'agrégats qui peuvent avoir des formes, des tailles et des stabilités variées. Deux grands groupes d'agrégats sont ainsi définis : les macroagrégats (> 250 µm) et les microagrégats (< 250 µm) (cf. figure **2**). L'agencement de ces agrégats dans l'espace défini la **porosité** d'un sol et détermine sa **structure**. C'est au sein de cette structure que les organismes vivants vont se développer et vivre.

## 1.2 Le sol, une mosaïque d'habitats riches et diversifiés

La grande complexité et hétérogénéité du sol fournit une mosaïque de macro- et microenvironnements très variés qui explique que le sol renferme presque un tiers de la diversité des organismes vivants de notre planète. Pour exemple, le sol renferme environ 1 milliard de bactéries par gramme de sol et un million d'espèces. Pour des organismes appartenant à la faune du sol, 1 m$^2$ de sol peut renfermer jusqu'à 1 000 espèces d'invertébrés. Tous ces organismes ont des habitats qui leur sont propres et qui correspondent à leurs exigences écologiques (figure **2**). Parmi les différents habitats du sol, certains sont détaillés ci-dessous.

### 1.2.1 Microagrégats du sol

Les microagrégats de sol ont une taille inférieure à 50 µm. Les habitats qu'ils renferment correspondent à des micropores qui ont un diamètre inférieur à 10 µm (figure **3**). Seules les bactéries sont capables de coloniser ces habitats de par leur taille microscopique (taille d'une bactérie environ 1 µm), mais aussi leur capacité d'adaptation car les conditions de vie y sont particulières (forte anoxie, faible ressource en nutriments…).

### 1.2.2 Macroagrégats du sol

Les macroagrégats ont une taille comprise entre 50 µm et 2 mm. Les habitats qu'ils renferment correspondent à des micropores qui ont un diamètre supérieur à 10 µm (figure **4**). Ces habitats renferment une plus grande variété de micro-organismes puisqu'il est possible d'observer des micro-organismes comme les bactéries, mais aussi des champignons (filaments microscopiques) ou des nématodes (cf. section 1.3 sur les habitants du sol). En comparaison des microagrégats, ces habitats offrent des conditions de vie avec plus d'oxygène, plus d'apports en nutriments et plus d'échanges avec d'autres organismes comme les plantes ou le reste de la faune du sol. Par contre, ces habitats sont plus sensibles à des processus de déstructuration du sol, notamment lorsque ce dernier est agressé mécaniquement (labour, tassement, hydromorphie…). Ceci entraîne une destruction physique de ces habitats et la disparition des organismes qu'ils hébergent.

### 1.2.3 Rhizosphère

La rhizosphère est la zone de sol sous l'influence des racines. Cette zone peut s'étendre de quelques millimètres à quelques centimètres autour des racines selon le type de sol et le type de plante (figure **5**). L'activité des racines modifie le sol par des processus d'exsudation de matières organiques, de modification de pH et de respiration. Toutes ces modifications du milieu entraînent une augmentation locale des ressources nutritives notamment organiques, une plus grande acidité du sol et une baisse de la teneur en oxygène. Ces conditions, notamment trophiques, stimulent fortement le développement des micro-organismes (bactéries et champignons). La rhizosphère exhibe souvent des quantités de micro-organismes jusqu'à 10 à 100 fois supérieures à celles qui se trouvent dans le sol en dehors de l'influence de la racine, à seulement

Parution : octobre 2019 - Ce document a ete delivre pour le compte de 7200097598 - editions ti // nc AUTEURS // 195.25.183.157

Copyright © - Techniques de l'Ingénieur - Tous droits réservés

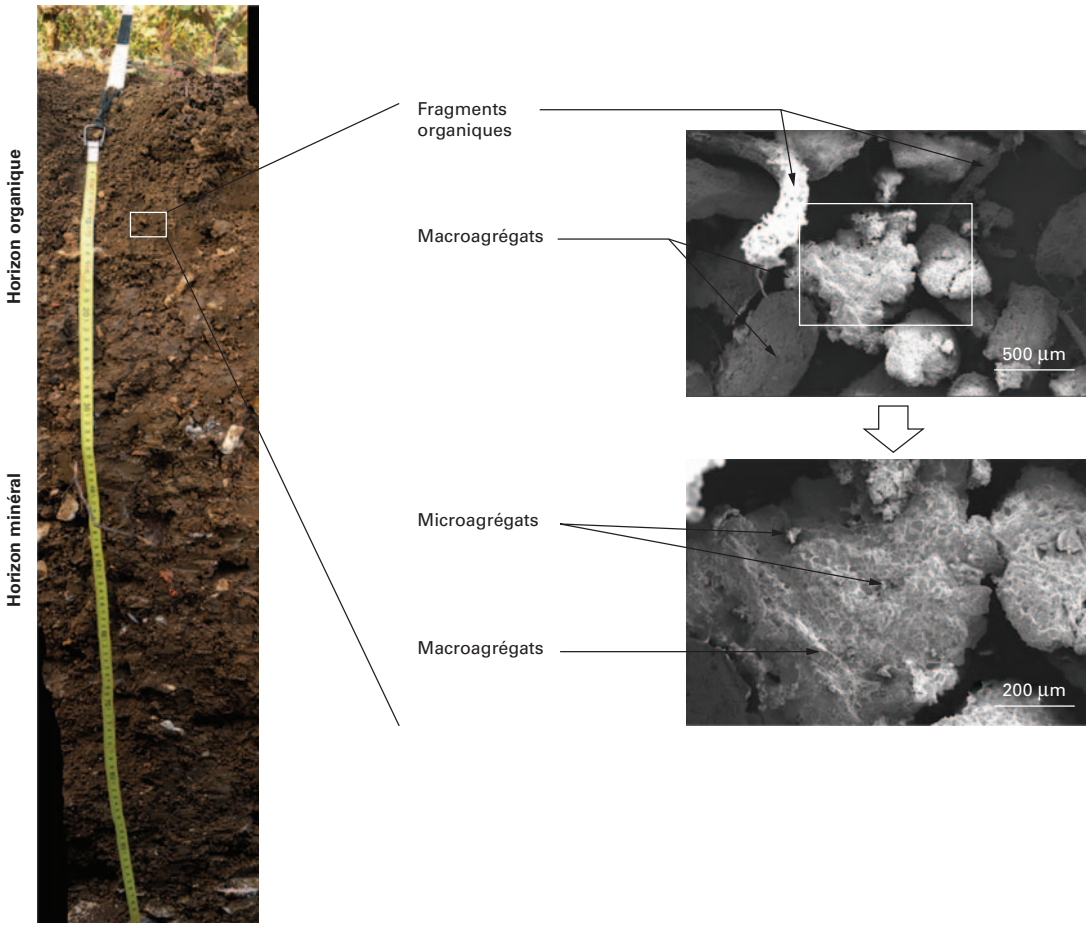



**Figure 1 – Variabilité verticale et structurale de la matrice sol** (crédits photos L. Ranjard, INRA)

**Figure 2 – Le sol : une structure complexe et un habitat pour la biodiversité**

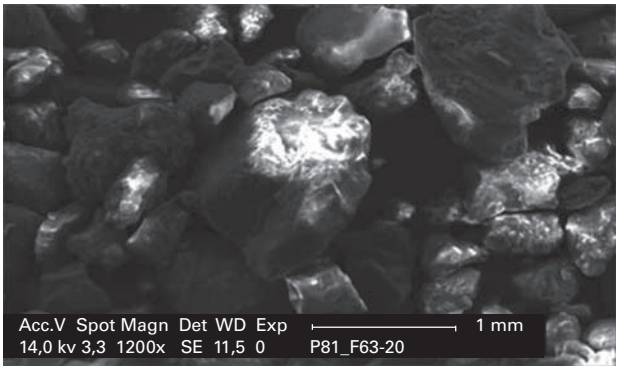



**Figure 3 – Microagrégats observés au microscope électronique (x 1200)** (crédit photo INRA)



Copyright © - Techniques de l'Ingénieur - Tous droits réservés

Parution : octobre 2019 - Ce document a ete delivre pour le compte de 7200097598 - editions ti // nc AUTEURS // 195.25.183.157

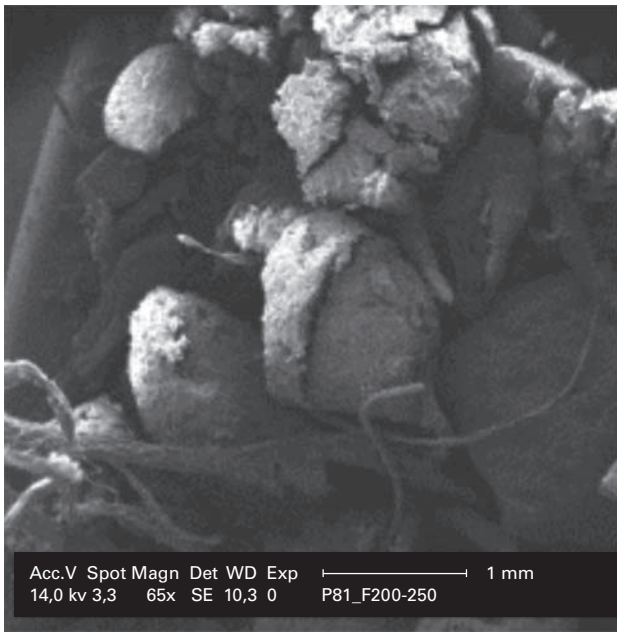



**Figure 4 – Macroagrégats observés au microscope électronique (x 65)** (crédit photo INRA)

quelques centimètres de là. Toutefois, la diversité microbienne est moins importante que dans un sol nu car la plante promeut l'élection de certaines populations au détriment d'autres.

Dans le cas de sols couverts par des prairies ou des forêts denses, la rhizosphère peut représenter la grande majorité des habitats du sol de surface. Dans les systèmes agricoles, où les sols ont des couvertures végétales moins denses, la rhizosphère peut représenter moins de 30 % du sol de surface.

La rhizosphère est le lieu privilégié d'échanges entre la plante et les micro-organismes, que ce soit d'un point de vue symbiotique ou en termes d'infection par des pathogènes. Les micro-organismes trouvent dans la rhizosphère des ressources trophiques importantes et il y a donc une forte activité microbienne associée à la minéralisation de la matière organique qui permet un recyclage des éléments minéraux. L'activité de structuration du sol en agrégats par les bactéries et les champignons y est aussi très importante.

### 1.2.4 Résidusphère

Par analogie avec la rhizosphère, la résidusphère est la zone du sol qui est sous l'influence de la dégradation des résidus de matière organique. Ces résidus peuvent être d'origine végétale ou animale. La zone de sol sous l'influence du résidu ne fait que quelques millimètres et dépend du type de sol et du type de résidu qui influencent le mode de diffusion et la quantité des sous-produits des composés en dégradation. La résidusphère est une zone de sol enrichie en matière organique et elle est donc le lieu d'une forte densité et d'une intense activité microbienne. En système naturel (forêt, prairie), la résidusphère correspond à la zone de sol sous la litière végétale qui s'accumule en surface. En système agricole, la résidusphère se trouve autour des résidus de culture non exportés et laissés en surface ou enfouis.

### 1.2.5 Drilosphère

Le terme de « drilosphère » (*drilos* = vers) est employé pour définir l'ensemble des volumes de sol qui ont été impactés par les **activités lombriciennes**. La drilosphère peut être observable dans un

**Figure 5 – Sol rhizosphérique associé aux racines de plantes en plein champ à gauche** (crédit photo : association Soin de la terre ©) **et au laboratoire** (crédit photo : M Lamboeuf, 4PMI, INRA©)

**Figure 6 – Sols remaniés en fonction de l'activité des vers de terre : à gauche galeries de vers de terre et à droite déjections de vers de terre** (crédit photos, D. Piron)

profil le sol où l'activité de bioturbation des lombrics laisse des traces visibles et persistantes. La drilosphère inclut deux grands types de « biostructures » : les galeries et les amas de déjections (figure **6**). La porosité au sein de ces biostructures influence la circulation des fluides (eau, air), la mobilité des organismes de plus petite taille ainsi que des systèmes racinaires. Par ailleurs, la drilosphère constitue un ensemble d'habitats microbiens singuliers puisque la bioturbation lombricienne y a modifié (i) les conditions locales d'aération et d'humidité du sol et (ii) la disponibilité des ressources trophiques par la production de mucus et la redistribution des matières organiques du sol au sein des biostructures. L'observation de la drilosphère atteste ainsi d'une modification profonde de l'environnement sol par les lombriciens et de l'impact sur le fonctionnement hydrique (infiltration, rétention) et biologique des sols.

## 1.3 Habitants et services rendus du sol

Le sol abrite environ 30 % de la biodiversité totale de notre planète déterminée à ce jour. Cette biodiversité, bien que largement invisible puisque « cachée » sous la surface du sol, représente une biomasse vivante de plusieurs tonnes à l'hectare (de 2,5 à plus de 10 tonnes selon les sols et les pratiques de gestion). Force est toutefois de constater que cette vie reste encore généralement bien mal connue des utilisateurs des sols, et ce qu'ils opèrent en milieu urbain ou rural. S'il existe bien des représentants très médiatisés, comme les vers de terre que tout le monde connaît ou bien encore certains agents responsables de maladies affectant les cultures, la grande majorité des organismes reste inconnue hors des milieux scientifiques spécialisés. Par soucis de simplification, les habitants du sol

Parution : octobre 2019 - Ce document a ete delivre pour le compte de 7200097598 - editions ti // nc AUTEURS // 195.25.183.157

Copyright © - Techniques de l'Ingénieur - Tous droits réservés

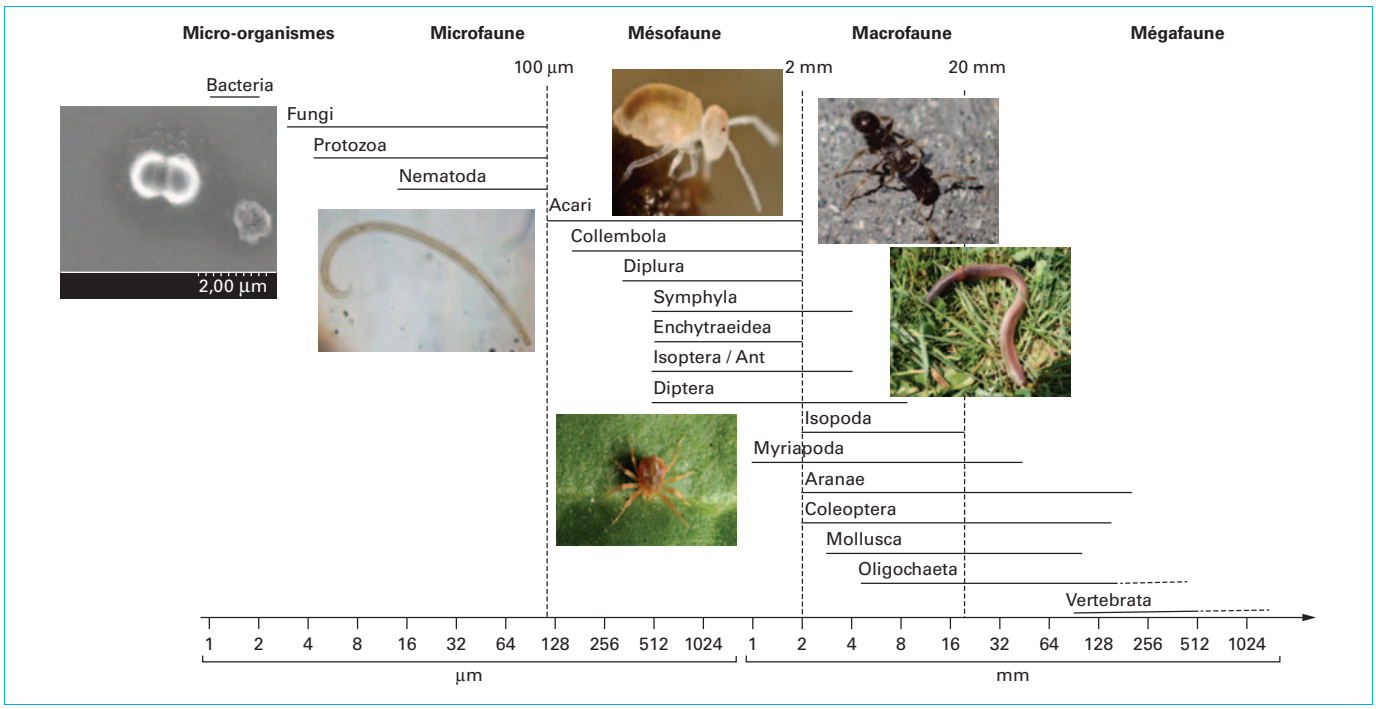



**Figure 7 – Classification des principaux groupes d'organismes du sol selon leur taille** (modifié d'après Swift *et al.*, 1979 [3])

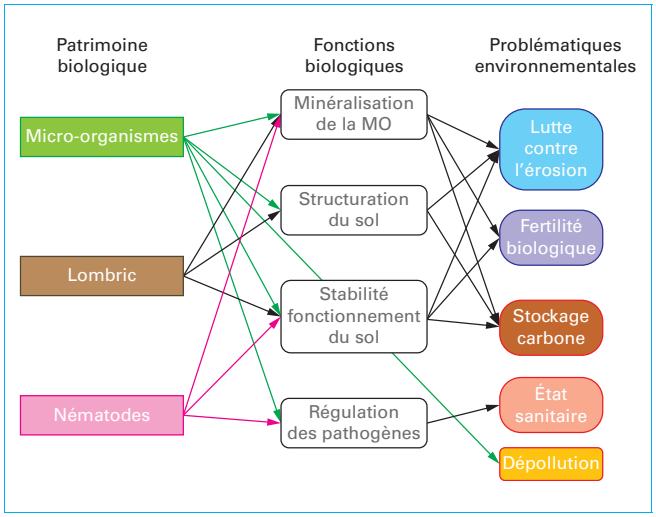



**Figure 8 – Lien entre le patrimoine biologique, les fonctions qu'il remplit et les problématiques environnementales de notre société**

sont généralement distingués en plusieurs familles en fonction de leur taille. On distingue ainsi cinq classes allant des micro-organismes à la microfaune, mésofaune, macrofaune, jusqu'aux organismes les plus gros appartenant à la mégafaune (figure **7**).

L'ampleur de cette biodiversité confère au sol une valeur patrimoniale qui est aujourd'hui de plus en plus reconnue et qui contribue à changer notre regard et notre considération de cet écosystème trop longtemps considéré comme un simple support inerte. Au-delà de cette dimension patrimoniale, les organismes du sol représentent également un formidable moteur du fonctionnement du sol et donc des services qu'il peut fournir pour le bien-être des sociétés humaines (voir encadré **1**). Chaque groupe d'organismes du sol contribue à la fourniture de l'un ou de plusieurs de ces services (figure **8**). Dans les sections suivantes, nous détaillerons les principales caractéristiques des différents groupes d'organismes du sol et les services auxquels ils contribuent.

**Encadré 1 – Fonctions et services écosystémiques rendus par le sol**

L'écosystème sol, *via* ses différentes composantes (flore, faune, environnement physique) et leurs interactions, assure la réalisation de fonctions écologiques comme la rétention de l'eau, la formation de la structure du sol, l'approvisionnement en matière organique, le recyclage des nutriments, les interactions biotiques, etc. (figure **9**). Ces dernières sont à l'origine de services écosystémiques correspondant aux multiples avantages que la nature apporte à la société (d'après [4]).

Les services écosystémiques sont classiquement regroupés en quatre catégories [6] :

– **services de support ou de soutien** : ce sont les services nécessaires pour la production de tous les autres services écosystémiques, c'est-à-dire qui créent les conditions de base au développement de la vie sur Terre (formation des sols, production primaire, air respirable, etc.) ;

– **services d'approvisionnement ou de production** : ce sont les avantages matériels que les personnes tirent des écosystèmes, par exemple la fourniture de nourriture, d'eau douce, de fibres, de bois et de combustibles, de produits biochimiques et pharmaceutiques, etc. ;

– **services de régulation** : ce sont les avantages tirés de la régulation des processus écosystémiques (régulation de la qualité de l'air et de la fertilité des sols, du climat, lutte contre l'érosion, les inondations et les maladies, pollinisation des cultures, etc.) ;

– **services culturels** : ce sont les bénéfices non matériels que l'Homme tire des écosystèmes, par exemple l'inspiration esthétique, l'éducation, l'identité culturelle, la religion, etc.



Copyright © - Techniques de l'Ingénieur - Tous droits réservés

Parution : octobre 2019 - Ce document a ete delivre pour le compte de 7200097598 - editions ti // nc AUTEURS // 195.25.183.157

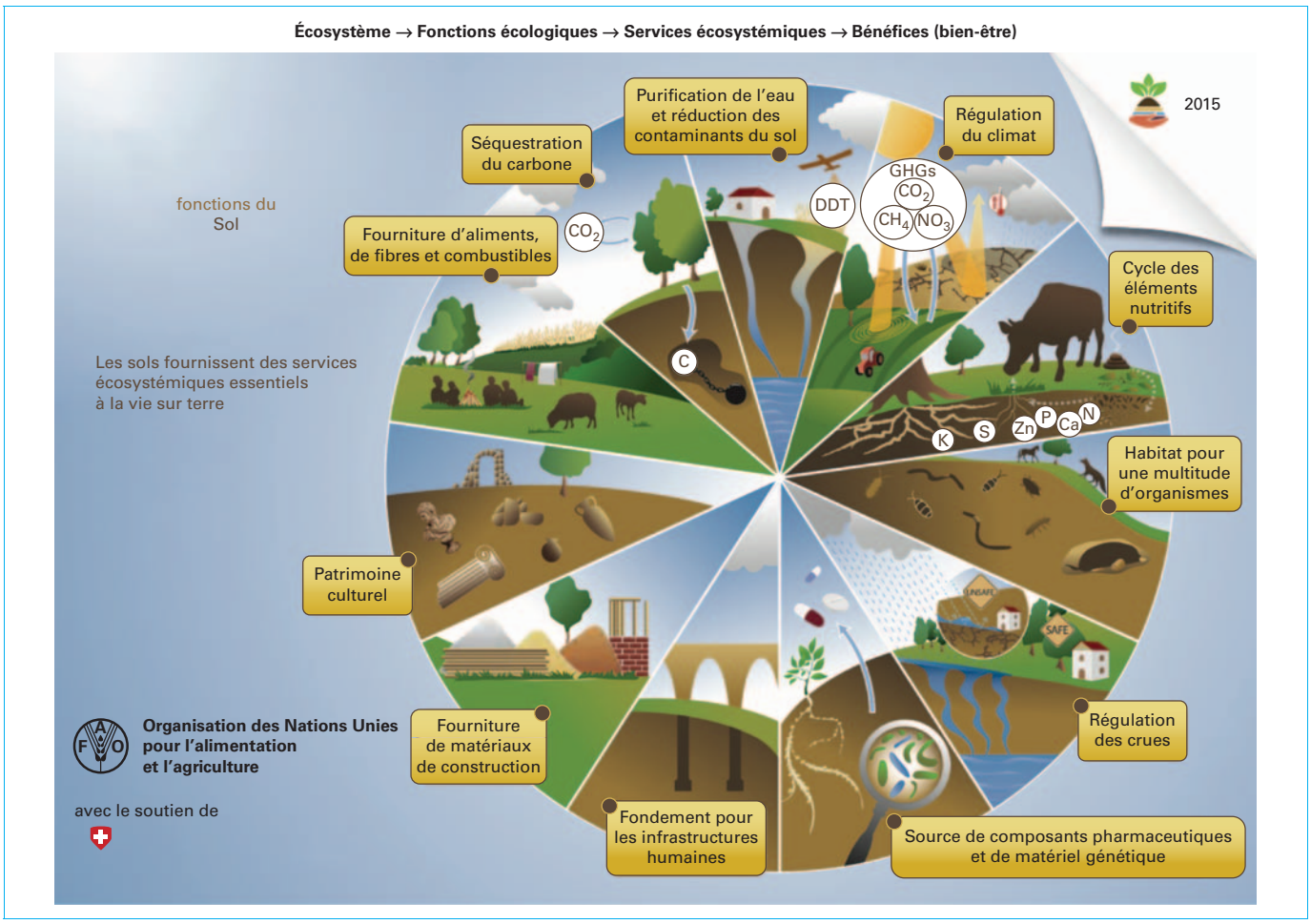



**Figure 9 – Services écosystémiques rendus par le sol** (FAO 2015 [5])

### 1.3.1 Micro-organismes

Les **micro-organismes** sont des organismes microscopiques (< 10 µm) et donc invisibles à l'œil nu. Dans le sol, deux types principaux d'organismes peuvent être distingués (figure **10**) :

– les **bactéries** et les **archées** qui sont des micro-organismes unicellulaires procaryotes, c'est-à-dire dont la cellule ne contient pas de noyau. Ces deux grands domaines du vivant sont très différents en termes de caractères biochimiques ;

– les **champignons** qui sont des micro-organismes eucaryotes (*i.e.* dont la cellule contient un noyau) qui peuvent être unicellulaires (levures) ou pluricellulaires. Lorsqu'ils sont pluricellulaires, ils se présentent sous forme de mycélium. L'appellation courante « champignon » ne se réfère en réalité qu'à la fructification temporaire et visible à la surface ou dans le sol.

Bien qu'étant les plus petits des habitants du sol, les micro-organismes sont les plus abondants et les plus diversifiés tant taxonomiquement que fonctionnellement. Grâce à une extraordinaire capacité d'adaptation génétique aux variations de leur environnement, les micro-organismes ont colonisé sans exception l'ensemble des sols de notre planète. Ainsi, en plus des milieux offrant des conditions favorables au développement de la vie, on trouve des micro-organismes dans les milieux aux conditions

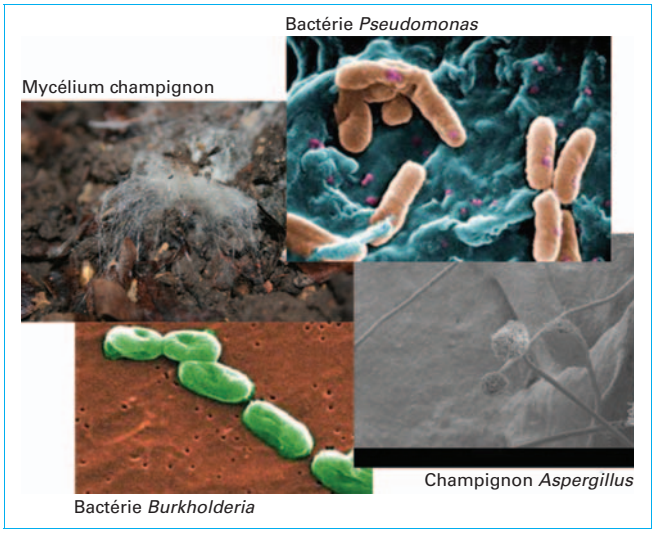



**Figure 10 – Exemple de micro-organismes du sol** (Sources : mycélium champignon [7], bactérie *Burkholderia* [8], bactérie *Pseudomonas* [9] et champignon *Aspergillus* [10])

Parution : octobre 2019 - Ce document a ete delivre pour le compte de 7200097598 - editions ti // nc AUTEURS // 195.25.183.157

Copyright © - Techniques de l'Ingénieur - Tous droits réservés

extrêmes tels que les déserts chauds et secs, les sous-sols profonds, les sols contaminés… Cette répartition ubiquitaire s'explique par l'extraordinaire diversité génétique qui caractérise le monde microbien. Ainsi, on estime à 1 million d'espèces de bactéries et 100 000 espèces de champignons la diversité microbienne par gramme de sol. Au-delà de la diversité génétique, ces communautés représentent également une part très importante de la biomasse vivante du sol, de l'ordre de 2 à 10 tonnes de carbone par hectare, soit l'équivalent d'une dizaine de vaches pâturant sur la même surface ! Cette richesse formidable confère aux micro-organismes une place particulière au sein du règne du vivant en termes de réservoir de ressources génétiques qui peut être considéré comme un véritable patrimoine. L'énorme diversité des micro-organismes se traduit également par une implication forte dans les fonctions et les services écosystémiques assurés par le sol. Ainsi, les communautés microbiennes contribuent aux services de soutien, notamment à travers leur rôle dans les cycles biogéochimiques d'éléments majeurs tels que le carbone, l'azote, le phosphore, le soufre… La composante microbienne est par exemple responsable des transformations du cycle de l'azote comme la fixation de l'azote atmosphérique, l'ammonification, la nitrification et la dénitrification. De même, la minéralisation de la matière organique, processus central du cycle du carbone, se réalise en grande partie par les micro-organismes qui transforment des molécules organiques complexes en éléments minéraux, dont certains sont facilement assimilables par les plantes. De par leur plasticité métabolique, les micro-organismes interviennent aussi dans la dégradation et le transfert de polluants (métaux, pesticides…). Certains micro-organismes ont également un impact important sur la santé et la croissance des plantes en réalisant par exemple des symbioses ou en induisant des maladies.

### 1.3.2 Microfaune

La **microfaune** du sol correspond aux organismes eucaryotes microscopiques (taille généralement inférieure à 200 µm) vivant dans le sol. Ils sont principalement représentés par les protozoaires, les nématodes, mais aussi d'autres groupes bien moins connus, comme les tardigrades et les rotifères (figure **11**).

Les protozoaires sont des organismes souvent unicellulaires qui sont particulièrement abondants dans les premiers centimètres du sol. Leur abondance est très dépendante de la présence d'eau, et donc de l'humidité du sol. Beaucoup sont hétérotrophes et puisent leur source de carbone de la consommation de bactéries qu'ils ingèrent par phagocytose, agissant ainsi comme des régulateurs de la densité bactérienne du sol et permettant la remobilisation de nutriments à partir de cette ressource. Ainsi, l'activité des protozoaires permet de libérer dans le sol une quantité d'azote importante, principalement sous forme d'azote ammoniacal qui peut être transformé par certaines bactéries du sol (*i.e.* bactéries nitrifiantes) en nitrate assimilable par les plantes.

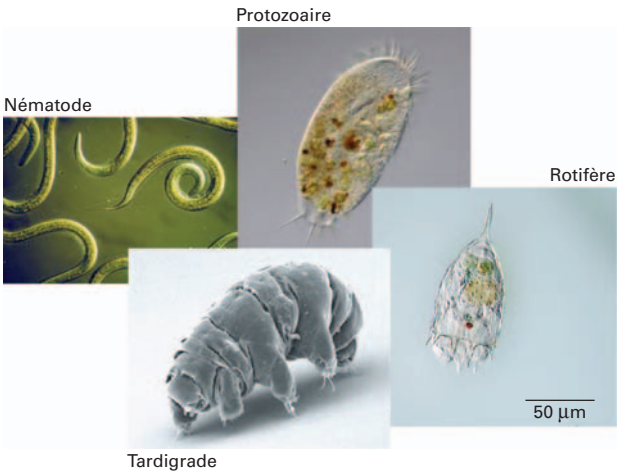



**Figure 11 – Exemple d'organismes de la microfaune du sol** (Sources : nématode [11], tardigrade [12], protozoaire [13], rotifère [14])

**Figure 12 – Exemple de racines de plant de tomate nécrosées par des nématodes** [15]

Les nématodes sont des vers microscopiques (de l'ordre de 10 à 200 µm de longueur). Ils sont ubiquistes dans le sol, abondants (en général 1 million d'individus par $m^2$) et diversifiés taxonomiquement et fonctionnellement. Ils jouent un rôle clé dans la chaîne trophique, notamment en tant que régulateurs/prédateurs des micro-organismes (bactéries et champignons), et sont sensibles aux conditions du milieu et aux perturbations physiques ou chimiques. Les nématodes peuvent être distingués selon leur comportement alimentaire :

– les nématodes libres (*i.e.* vivant indépendamment des plantes) qui comprennent :

- les nématodes microbivores (bactérivores et fongivores) qui sont des régulateurs des populations microbiennes ;
- les nématodes omnivores ou prédateurs d'autres nématodes, de protozoaires et d'enchytréides ;

– les nématodes phytophages (obligatoires ou facultatifs) qui se nourrissent des racines des végétaux. Certains individus phytophages sont des ravageurs de culture en formant des kystes ou des galles dans les racines des plantes qui pourrissent et meurent (figure **12**).

### 1.3.3 Mésofaune

La **mésofaune** du sol correspond aux organismes invertébrés dont la taille est comprise entre 200 µm et 2 mm. Elle inclut généralement des micro-arthropodes dont les plus gros sont à peine visibles à l'œil nu comme les collemboles, les diploures, les acariens et les petites fourmis (figure **13**).

Ces organismes ont un rôle important dans le cycle du carbone *via* leur activité de fragmentation de la matière organique qui facilite son incorporation dans le sol et augmente l'activité de



Copyright © - Techniques de l'Ingénieur - Tous droits réservés

Parution : octobre 2019 - Ce document a ete delivre pour le compte de 7200097598 - editions ti // nc AUTEURS // 195.25.183.157

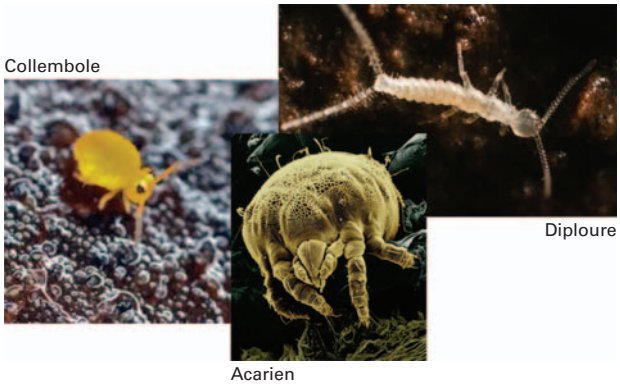



**Figure 13 – Exemple d'organismes de la mésofaune du sol** (Sources : collembole [16], acarien [17], diploure [18])

décomposition des communautés microbiennes. Beaucoup sont également des prédateurs de la microfaune, comme les tardigrades qui se nourrissent de rotifères, nématodes et protozoaires, mais aussi des micro-organismes, comme les collemboles qui se nourrissent de champignons et de bactéries. Ils jouent ainsi un rôle important au sein de la chaîne trophique du sol.

### 1.3.4 Macrofaune

La **macrofaune** du sol correspond aux organismes invertébrés dont la taille est supérieure à 2 mm. Ils sont principalement représentés par les vers de terre, les carabes et vers blancs, les termites et fourmis, les diplopodes et chilopodes, les araignées, les isopodes, les limaces et escargots (figure **14**).

Les organismes appartenant à la macrofaune sont les plus connus des organismes du sol, probablement parce que ce sont aussi les plus visibles car les plus gros des invertébrés du sol. Ainsi, on ne présente plus les vers de terre, véritables emblèmes de la fertilité biologique du sol pour le grand public. Ces organismes, également appelés « lombriciens », sont invertébrés et font partie de l'embranchement des annélides. Ils sont présents dans tous les sols où ils peuvent être particulièrement abondants (entre 100 et 450 individus/m$^2$ en moyenne dans un sol de prairie). Plus de 3 000 espèces sont recensées à l'échelle mondiale, avec une centaine répertoriée en France. Les lombriciens sont considérés comme des ingénieurs du sol en raison de leur capacité à modifier la structure physique du sol en creusant des galeries ou en ingérant la terre. Le réseau de galeries créé par ces organismes impacte l'oxygénation du sol et sa capacité d'infiltration et de rétention de l'eau, limitant ainsi le ruissellement et l'érosion du sol. L'action d'enfouissement de la litière par les lombrics permet un brassage de la matière organique et induit une activation des micro-organismes décomposeurs, avec des conséquences positives sur la remobilisation de nutriments et *in fine* sur la croissance des plantes. Leurs déjections, riches en phosphore, azote et potassium, sont selon les espèces soit rejetées à la surface, soit dans des cavités du sol. Elles représentent entre 50 et 100 tonnes de matière excrétée par an et par hectare dans les sols. On peut donc considérer qu'en une cinquantaine d'années, toute la terre d'un champ transite par le tube digestif des vers de terre !

Les vers de terre ne sont pas les seuls à jouer un rôle important dans le cycle de la matière organique dans le sol. Ainsi, les isopodes, les fourmis, les termites se nourrissent aussi de débris végétaux dont ils accélèrent la décomposition. Beaucoup d'organismes de la macrofaune, comme les chilopodes, les carabes ou les araignées sont des prédateurs d'autres arthropodes. D'autres représentants de la macrofaune peuvent avoir des effets négatifs sur les cultures. C'est le cas des vers blancs (*i.e.* larves de coléoptères) qui vivent dans le sol et attaquent les racines des plantes.

## 1.4 Interactions biotiques complexes dans le sol : de l'ami sincère à l'ennemi juré !

Au sein de la matrice sol, les organismes ne vivent pas de façon isolée mais cohabitent en établissant des relations complexes qui déterminent leur fonctionnement individuel, mais aussi de façon globale le fonctionnement de la communauté des organismes du sol. Ces interactions peuvent être bénéfiques ou négatives en fonction de l'impact qu'elles engendrent pour les espèces impliquées. Nous sommes encore loin de comprendre le jeu complexe des règles régissant ces interactions entre les organismes et entre les organismes et l'environnement. Ceci implique entre autres de

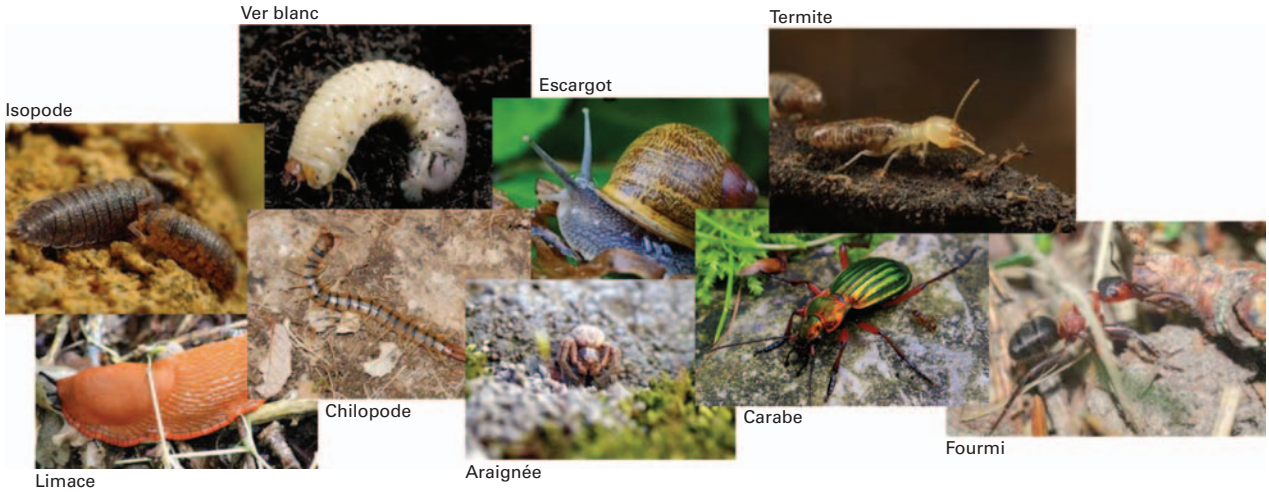



**Figure 14 – Exemple d'organismes de la macrofaune du sol** (Sources : chilopode [19], araignée [20], escargot [21], limace [22], isopode [23], carabe [24], termite [25], fourmi [26], ver blanc [27])

Parution : octobre 2019 - Ce document a ete delivre pour le compte de 7200097598 - editions ti // nc AUTEURS // 195.25.183.157

Copyright © - Techniques de l'Ingénieur - Tous droits réservés

développer de nouvelles méthodes d'analyses et de modélisation pour intégrer les différents types de données d'abondance et de diversité de ces organismes entre elles et en relation avec la mesure de paramètres environnementaux.

### 1.4.1 Interactions bénéfiques

Le **commensalisme** est une relation facultative pour laquelle le bénéfice ne s'exerce que sur l'un des deux partenaires, l'autre n'en retirant ni avantage, ni nuisance. Ce type de relation est très diffusé au sein de la communauté des organismes du sol. On peut citer l'exemple de petits cloportes (genre *Platyarthrus*) vivant dans les fourmilières creusées dans le sol où ils se nourrissent des déjections des fourmis. Ce statut de « nettoyeur » de fourmilière n'est cependant pas obligatoire car ces petits arthropodes peuvent également vivre dans d'autres habitats (composte, surfaces abritées sous pierres ou autre…).

Le **mutualisme** est une situation « gagnant-gagnant » dans laquelle les deux espèces tirent profit de l'interaction. Ces interactions mutualistes prennent place entre végétaux et animaux, entre bactéries et vertébrés, ou encore entre micro-organismes et végétaux. Au sens strict, le mutualisme n'implique pas une relation obligatoire entre les partenaires. Dans le cas où l'interaction est indispensable à la maintenance et à la croissance d'au moins un des deux partenaires, on parle plutôt de « symbiose mutualiste ». Dans le sol, l'un des exemples les plus connus de symbiose est l'association entre bactéries fixatrices d'azote et/ou champignons mycorhiziens avec les plantes. Cette association permet aux plantes capables de les établir de couvrir jusqu'à 80 % de leurs besoins en azote et 75 % de leurs besoins annuels en phosphore. Ainsi, la part de productivité végétale (ou fertilité biologique) imputable aux interactions symbiotiques avec les micro-organismes du sol peut atteindre jusqu'à 50 %.

### 1.4.2 Interactions négatives

La **prédation** correspond aux interactions biotiques où l'un des deux partenaires (le prédateur) tue et mange l'autre (la proie). Les relations proie-prédateur sont les plus répandues des interactions antagonistes. Dans le sol, on peut citer l'exemple des amibes qui sont des protozoaires prédateurs au régime alimentaire très varié allant des bactéries, micro-algues, cyanobactéries et des champignons sous formes d'hyphes ou de spores, à d'autres amibes, des ciliés, et même des nématodes.

La relation **hôte-parasite** se distingue de la prédation par le fait que le parasite est physiquement associé à son hôte, au moins pendant une partie de son cycle biologique, alors que le prédateur reste libre. Ces relations correspondent notamment aux interactions qu'établissent les champignons phytopathogènes avec leurs plantes hôtes. C'est par exemple le cas de certains *Fusarium*, champignons phytopathogènes d'un grand nombre d'espèces végétales qui peuvent induire des pertes de rendement de 30 à 100 % selon les cultures.

La **compétition** est une relation « perdant-perdant » qui décrit les interactions biotiques entre des organismes ayant des besoins très proches et convoitant une même ressource, qu'il s'agisse de l'eau, de nutriment, de l'espace, de la lumière... La compétition peut avoir lieu entre espèces de niveaux trophiques équivalents ou entre organismes de niveaux trophiques différents, voire même entre des règnes différents. La compétition peut parfois déboucher sur de l'antibiose, c'est-à-dire l'émission d'antibiotique par l'un des compétiteurs, mécanisme exploité en lutte biologique. C'est par exemple le cas de *Pseudomonas fluorescens*, bactérie utilisée dans le biocontrôle de *Fusarium*, un champignon phytopathogène.

### 1.4.3 Réseaux trophiques et réseaux de cooccurrence

Plusieurs méthodes d'analyses et de modélisation ont été développées pour étudier la complexité des interactions au sein des communautés d'organismes du sol et la relier à la variabilité des paramètres environnementaux. Elles permettent la construction de réseaux dont les propriétés (complexité du réseau, nature des interactions…) sont liées au fonctionnement du sol et au maintien de sa biodiversité. En fonction de la nature des interactions utilisées pour leur construction, il est possible de distinguer différents types de réseaux dont nous ne présenterons brièvement ici que deux représentants : les réseaux trophiques et les réseaux de cooccurrence.

#### 1.4.3.1 Réseaux trophiques

Très largement étudiés, les réseaux trophiques se réfèrent uniquement aux relations alimentaires entre les consommateurs et leur(s) ressource(s). Un même consommateur peut avoir plusieurs ressources et une ressource peut avoir plusieurs consommateurs. Un réseau trophique est constitué d'un enchevêtrement de chaînes trophiques, avec à la base les producteurs primaires ou les décomposeurs (les bactéries et les champignons), puis trois à cinq niveaux trophiques hétérotrophes : un niveau de consommateurs secondaires qui consomme les producteurs primaires ou les décomposeurs, plusieurs niveaux de prédateurs qui se nourrissent de consommateurs secondaires et d'autres prédateurs, et un niveau de prédateurs de sommet de chaîne. La qualité de ces réseaux (complexité et nature des relations trophiques entre les organismes qui les composent) influence le fonctionnement du sol. Elle est sensible aux perturbations associées aux activités humaines (pratiques agricoles, industrialisation, urbanisation…) ainsi qu'aux changements climatiques.

#### 1.4.3.2 Réseaux de cooccurrence

Contrairement aux réseaux trophiques basés uniquement sur l'analyse des relations alimentaires entre les organismes, les réseaux de cooccurrence fournissent une vision intégrant l'ensemble des relations entre les micro-organismes au sein du sol. Deux espèces peuvent interagir de façon multiple simultanément. La résultante de l'ensemble de ces interactions aboutit, soit à l'évolution conjointe des organismes dans le milieu (relation positive appelée « cooccurrence »), soit à leur évolution opposée (relation négative appelée « co-exclusion ») ou à une absence de relation. À l'échelle des communautés, l'ensemble de ces relations positives ou négatives constitue un réseau de cooccurrence. Comme évoqué pour les réseaux trophiques, la qualité des réseaux de coocurrence détermine le fonctionnement de la communauté des organismes du sol et est sensible aux changements globaux (*i.e.* activités humaines et changement climatique).

La figure **15** présente une illustration de l'utilisation de cette approche pour étudier l'influence de mode d'usage du sol sur la structure des réseaux de coocurrence bactériens dans le sol. Ils ont été construits en utilisant les données moléculaires de séquençage des communautés bactériennes obtenues par l'analyse des sols du Réseau de Mesures de la Qualité du Sol (RMQS, [28]) qui couvre l'ensemble du territoire national.

Cette analyse montre que l'intensité d'usage du sol entraîne une réduction importante de la complexité des réseaux bactériens dans le sol. Dans un contexte d'utilisation durable du sol intégrant la biodiversité du sol comme levier, elle illustre aussi l'importance du choix des pratiques de gestion.

# 2. Grandes techniques pour étudier la vie du sol

## 2.1 Capture et observation

Pour l'étude de la macro/mésofaune, un grand nombre d'approches existe. En raison de la grande diversité de forme, de taille, de mode de vie et d'habitat de ces organismes, il n'existe pas une méthode unique pour échantillonner et caractériser l'ensemble de la biodiversité du sol. Pour information, un grand nombre de ces



Copyright © - Techniques de l'Ingénieur - Tous droits réservés

Parution : octobre 2019 - Ce document a ete delivre pour le compte de 7200097598 - editions ti // nc AUTEURS // 195.25.183.157

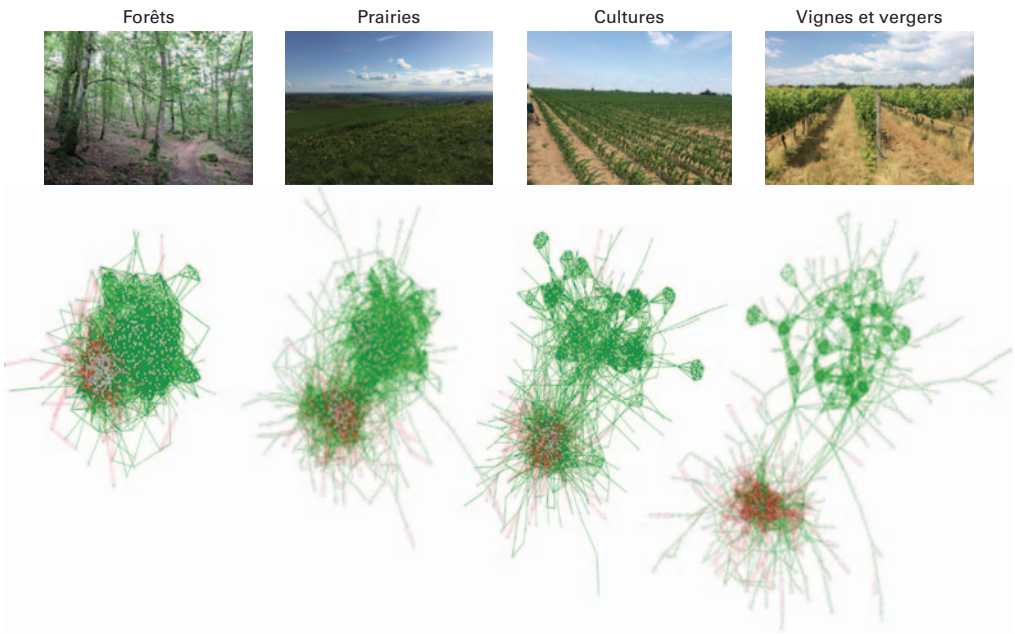



**Figure 15 – Influence de l'intensité d'usage du sol (forêts < prairies < cultures < vignes et vergers) sur la complexité des réseaux de cooccurrence bactériens dans le sol**

méthodes a été recensé dans le catalogue établi dans le cadre du projet CAMPanule piloté par le MNHN (Muséum national d'histoire naturelle) : http://campanule.mnhn.fr/acces_base/.

Pour les organismes de plus grande taille (macrofaune), une approche classique est de procéder par capture et collecte, puis d'identifier les individus sur le terrain ou au laboratoire. L'utilisation de pièges de type « **pots Barber** » est par exemple une pratique courante pour piéger la macrofaune invertébrée circulant à la surface du sol. Ces pièges consistent simplement en un pot enterré rempli d'un liquide, ses bords rasant la surface. Il est laissé sur le terrain pendant plusieurs jours au cours desquels les organismes de passage tombent et sont piégés dans le liquide.

La capture des vers de terre peut, quant à elle, se faire par différentes méthodes plus ou moins invasives. Le **protocole moutarde** est une méthode courante actuellement utilisée par l'Observatoire participatif de vers de terre (OPVT, université de Rennes). Le principe est simple [29] : on déverse une solution de moutarde sur le sol. Cette solution contient de l'isothiocyanate qui est irritant pour les lombrics et qui a pour effet de les faire remonter à la surface, où ils peuvent être collectés facilement pour comptage et identification. Une autre approche est le **test bèche** qui consiste en l'excavation d'un petit bloc de sol à partir duquel est effectué un tri manuel des individus présents. Cette seconde approche présente l'avantage d'être plus opérationnelle que la méthode à la moutarde, qui nécessite le transport de volumes importants d'eau sur le terrain.

Pour les organismes de plus petite taille, il est généralement utile de prélever des échantillons de sol qui sont ensuite analysés au laboratoire par des observations à la loupe et/ou au microscope. Pour la capture des microarthropodes par exemple, on utilise en général un **appareil de Berlèse** (du nom de son inventeur) qui repose sur une réaction de fuite de la microfaune et mésofaune face à une exposition à une source de chaleur intense. Un échantillon prélevé au terrain est ainsi déposé dans un entonnoir au fond duquel se trouve une grille métallique. Il est ensuite placé pendant trois à quatre jours sous une lampe puissante qui induit un dessèchement de l'échantillon. La faune fuit alors ce stress en quittant l'échantillon par le bas et tombe dans un pot contenant de l'alcool.

La capture des nématodes repose sur un système proche, faisant appel à un entonnoir surmontant un filtre. Dans ce cas toutefois, on parle d'une « **élutriation** » car l'entonnoir contenant l'échantillon de sol est à demi rempli d'eau dans laquelle les vers se réfugient. Ils passent alors au travers du filtre et sont recueillis dans un pot.

Les méthodes les plus opérationnelles, en termes de facilité de mise en œuvre et d'appropriation des résultats par les participants, sont de plus en plus déployées dans le cadre de projets de recherche participatifs. Outre un intérêt en termes de sensibilisation d'un public large et non expert à la biodiversité du sol, ces projets permettent de récolter un très grand nombre de données qui alimentent notre connaissance sur les organismes du sol. On peut citer pour exemple le projet SPIPOLL piloté par le Muséum national d'histoire naturelle qui consiste en un suivi photographique des insectes pollinisateurs (http://www.spipoll.org) ; l'Observatoire participatif des vers de terre (https://ecobiosoil.univ-rennes1.fr/OPVT_accueil.php) piloté par l'université de Rennes, l'observatoire participatif de la biodiversité des sols dans les jardins urbains (JardiBioDiv http://ephytia.inra.fr/fr/P/165/jardibiodiv) piloté par l'INRA et l'université de Lorraine, ou encore le réseau OPAL (https://www.opalexplorenature.org) qui se propose de sensibiliser et d'inventorier la biodiversité, dont certains représentants des organismes du sol, sur le territoire anglais.

## 2.2 Écologie moléculaire

L'**écologie moléculaire** applique les techniques de la biologie moléculaire et de la génétique à des problématiques écologiques. Cette branche de l'écologie a pris beaucoup d'importance au cours de ces 40 dernières années grâce au développement d'outils permettant, par l'étude de marqueurs moléculaires (ADN/ARN/protéines), d'accéder à de nouvelles informations jusqu'alors inaccessibles, telles que les niveaux de diversité génétique et de structure des populations, des communautés…

Parution : octobre 2019 - Ce document a ete delivre pour le compte de 7200097598 - editions ti // nc AUTEURS // 195.25.183.157

Copyright © - Techniques de l'Ingénieur - Tous droits réservés

Le développement des outils moléculaires et leur application pour la caractérisation des organismes du sol ont représenté une révolution particulièrement importante pour l'étude de la diversité et de l'écologie des communautés microbiennes pour lesquelles les méthodes classiques d'observation utilisées pour la faune du sol sont difficiles à utiliser. Les outils historiques de microbiologie pasteurienne (isolement et croissance sur des milieux de culture, observations au microscope, etc.), basés sur la culture des organismes, ne permettaient de travailler que sur une faible fraction de la diversité microbienne du sol, de l'ordre de 1 à 5 %. L'application des outils moléculaires s'affranchissant de la culture a permis de réaliser l'ampleur de l'immensité de la diversité de ces organismes dans le sol, avec plus d'un million d'espèces d'archées et de bactéries et plusieurs centaines de milliers d'espèces de champignons par gramme de sol. L'aboutissement de ces développements est représenté aujourd'hui par l'ère des approches « omiques », par référence à la possibilité de caractériser la diversité génétique et fonctionnelle des micro-organismes dans leur ensemble, sans *a priori* et par l'analyse en haut débit des ADN (génomique), ARN (transcriptomique), protéine (protéomique) ou des métabolites (métabolomique). Ces technologies, telles que la génomique et le séquençage de l'ADN à grande échelle, sont apparues dans les années 1990 dans la dynamique du projet de séquençage du génome humain et ont été rapidement adaptées à l'étude des communautés d'êtres vivants, et notamment des micro-organismes du sol.

Des développements sont actuellement en cours pour parvenir à appréhender par ces approches moléculaires la diversité de l'ensemble des organismes du sol (faune et micro-organismes). Outre le challenge technique que cela représente encore aujourd'hui, la question se pose aussi de l'échantillonnage qu'il faut imaginer et adapter pour capter de façon robuste l'énorme biodiversité des organismes vivants du sol.

## 2.3 Référentiels nationaux au service du diagnostic de la qualité des sols

Les recherches réalisées en écologie du sol depuis plus de trente ans ont débouché sur l'accumulation de nombreuses données d'observation visuelle et plus récemment d'analyses moléculaires de l'ADN environnemental. Ces données sont, depuis une dizaine d'années, traduites en référentiel qui permettent de faire des bilans nationaux de l'abondance et de la diversité des organismes vivants du sol mais aussi, d'un point de vue opérationnel, de développer un diagnostic pour évaluer la qualité des sols et l'impact des modes d'usage. Au niveau national, les référentiels les plus aboutis existent pour les vers de terre (https://ecobiosoil.univ-rennes1.fr/OPVT_accueil.php), pour les nématodes (https://www.elisol.fr) et pour les micro-organismes (bactéries et champignons, voir figure **16**). Ceci permet aujourd'hui, pour les usagers des sols, d'avoir des outils robustes et sensibles provenant de la recherche et à même d'évaluer la qualité de leur sol et donc de les aider dans la prise de décision sur leurs changements de pratiques. Ces outils et référentiels sont en phase de transfert des laboratoires de recherche vers des laboratoires de prestation analytique pour les rendre totalement disponibles et moins coûteux pour les futurs utilisateurs (agriculteurs, aménageurs urbains, politiques publiques, gestion de parc naturel, jardiniers…) (projet AgroEco-Sol, https://www.ademe.fr/agro-eco-sol).

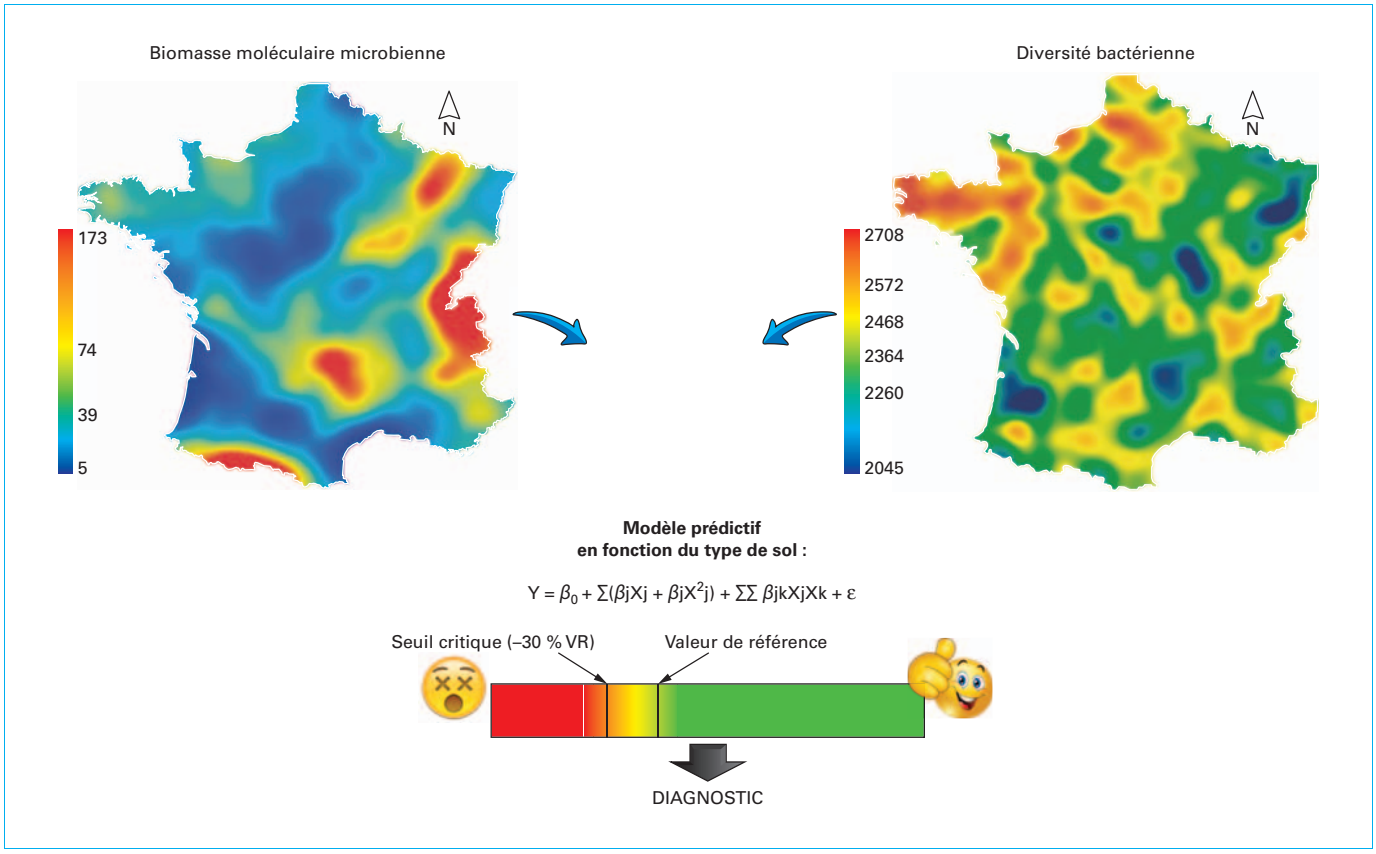



**Figure 16 – Référentiels nationaux de l'abondance et de la diversité microbienne ayant servi à la mise en place du diagnostic de la qualité microbiologique des sols français**



Copyright © - Techniques de l'Ingénieur - Tous droits réservés

Parution : octobre 2019 - Ce document a ete delivre pour le compte de 7200097598 - editions ti // nc AUTEURS // 195.25.183.157

**Un diagnostic opérationnel pour les micro-organismes**

Les importantes avancées techniques de la biologie moléculaire ces 30 dernières années ont permis le développement d'outils de caractérisation des communautés microbiennes du sol basés sur l'extraction et la caractérisation de l'ADN extrait directement du sol. Ces outils puissants ont permis d'acquérir de nombreuses données de façon rapide et sur des réseaux d'observation des sols à l'échelle nationale. L'accumulation de ces données a permis de construire des modèles statistiques prédictifs de l'abondance et de la diversité des communautés microbiennes du sol en fonction des caractéristiques physico-chimiques de ces sols (cf. figure **16**). En d'autres termes, pour chaque nouveau sol analysé, il suffit de connaître le pH, la texture, la teneur en carbone organique, le rapport C/N pour alimenter le modèle et obtenir la valeur de référence du sol étudié. Le diagnostic se fait par la comparaison entre cette valeur de référence et la valeur mesurée pour ce même sol. Un écart positif entre ces deux valeurs signifie que les pratiques appliquées au sol sont bénéfiques pour la microbiologie du sol, et un écart négatif que les pratiques sont néfastes. Il a été défini un seuil critique à 30 % en dessous de la valeur de référence, qui signifie qu'en dessous de ce seuil la baisse d'abondance et de diversité microbienne entraîneront une altération significative du fonctionnement biologique du sol (fertilité, stabilité physique, dépollution…).

## 2.4 Principales menaces pour le sol

Le sol est une ressource fragile, à la fois renouvelable si on l'utilise de façon durable et non renouvelable quand sa destruction est irréversible (perte par érosion par exemple). Si plusieurs siècles sont nécessaires pour le former, il peut être dégradé très rapidement sous l'effet notamment des activités humaines. Huit menaces principales sont aujourd'hui clairement identifiées et font l'objet d'une surveillance particulière, tant par les scientifiques que les pouvoirs publics. Il s'agit du tassement, de l'érosion, des glissements de terrain et inondations, de l'artificialisation, des contaminations, de la salinisation, de la baisse des teneurs en matière organique et de la baisse de la biodiversité (figure **17**).

Concernant le dernier point qui nous intéresse particulièrement dans le cadre de cet article, un consortium international d'experts scientifiques a rendu en 2005 un rapport qui montre une baisse mondiale de 50 % de la biodiversité des espèces terrestres et aquatiques (figure **18**). Cette baisse est majoritairement expliquée par les activités humaines (agricoles, industrielles et urbaines) qui génèrent des pollutions toxiques et une destruction des habitats naturels. Cette tendance est comparable aux grandes extinctions biologiques qu'a subies notre planète, la dernière en date (la 5$^{e}$) étant celle des dinosaures.

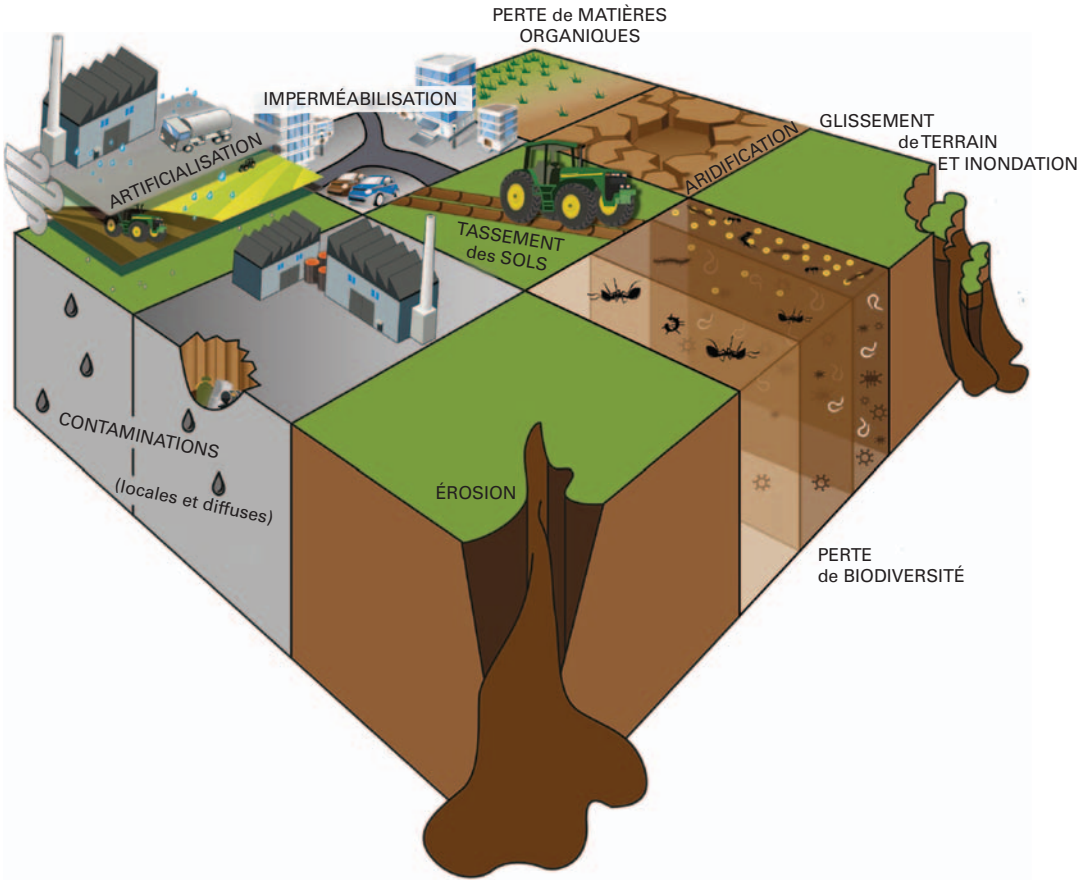



**Figure 17 – Illustration des huit menaces qui pèsent sur les sols**

Parution : octobre 2019 - Ce document a ete delivre pour le compte de 7200097598 - editions ti // nc AUTEURS // 195.25.183.157

Copyright © - Techniques de l'Ingénieur - Tous droits réservés

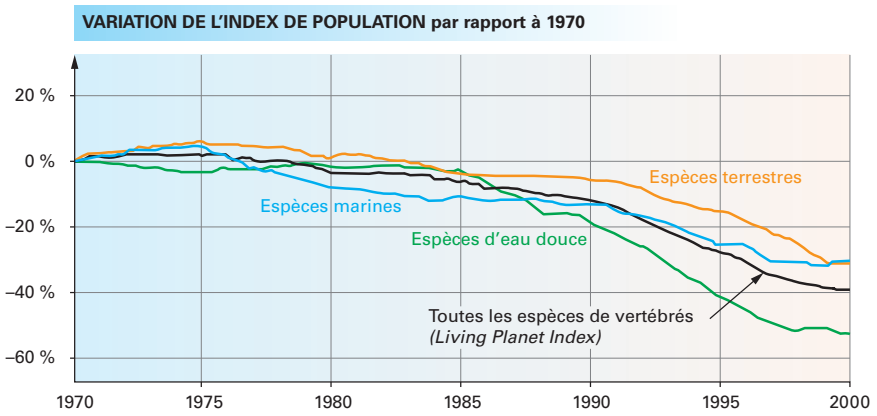



**Figure 18 – Baisse de la diversité des espèces aquatiques et terrestres depuis 1970** (modifié d'après WWF)

**Tableau 1 – Principales perturbations impactant la biodiversité des sols**

| Principaux facteurs de perturbation anthropique altérant la biodiversité des sols | Niveau de biodiversité impacté | | |
|---|---|---|---|
| | Écosystème | Espèces | Gènes |
| Changement d'utilisation des terres/perturbation et fragmentation de l'habitat | +++ | +++ | ++ |
| Exploitation humaine intensive | +++ | ++ | ++ |
| Diminution de la matière organique du sol | ++ | +++ | |
| Compaction et érosion du sol | + | ++ | |
| Pollutions du sol (chimique et biologique) | + | ++ | +++ |
| Espèces invasives | | ++ | |
| Imperméabilisation du sol | + | + | |
| Changement climatique, biens et services | +++ | ++ | + |

Au niveau du sol, il est très difficile de confirmer cette tendance car la plupart des espèces indigènes ne sont inventoriées que depuis très peu de temps. Il est toutefois possible de donner quelques résultats qui montrent que le sol n'échappe pas à ce phénomène (tableau **1**) :

– dans les sols industriels contaminés avec des métaux lourds il est possible d'observer une perte de plus de 90 % de la diversité bactérienne ;

– certains sols agricoles ont perdu la totalité de leur cheptel en vers de terre, à cause notamment du labour qui les agresse directement et qui détruit leurs habitats ;

– les sols de vignes présentent l'abondance microbienne la plus faible à cause notamment de l'usage intensif de pesticides et de la faible couverture végétale du sol ;

– dans les sols urbains, l'imperméabilisation de leur surface par le béton entraîne une baisse significative de l'abondance et de la diversité des organismes vivants indigènes ;

– dans des milieux semi-naturels comme les prairies, le pâturage par des animaux peut engendrer un tassement du sol qui peut mener à une perte significative de biodiversité.

# 3. La qualité écologique des sols au service d'une société durable

## 3.1 Transition agroécologique

Pour répondre aux besoins alimentaires croissants d'une population mondiale en forte croissance démographique depuis les années 50, l'agriculture a évolué vers la mise en place d'un modèle productiviste basé sur le recours intensif à la mécanisation et à l'utilisation d'intrants chimiques. Il est maintenant reconnu que ce type d'agriculture entraîne de nombreuses externalités négatives sur l'environnement et la santé humaine. Plus de soixante ans de travail intensif des sols, d'utilisation de produits phytosanitaires et d'engrais chimiques ont amené à une dégradation de la qualité physique, chimique et biologique des sols. Aujourd'hui il est acté qu'en France, 20 % des sols sont soumis à des processus d'érosion importants, que plus de 4 000 sites pollués sont référencés, et qu'il y a une baisse globale de la teneur en carbone des sols agricoles (rapport 2011 sur l'état des sols en France, GisSol, [30]). Dans ce contexte, il devenait urgent de changer de modèle d'agriculture, ce qui a mené dans les années 2000 à la mise en place du concept de transition agroécologique porté par le ministère de l'Agriculture et dont les instituts de recherche comme l'INRA, l'IRD et l'IRSTEA se sont emparés.

Dans le cas des sols agricoles, la transition agroécologique a mené à une meilleure connaissance de la biodiversité et de l'écologie des sols, puisque le concept de base est de se baser sur les fonctions portées par les organismes vivants du sol pour pallier la réduction des intrants chimiques (pesticides, engrais) et la mécanisation de l'agriculture moderne. En d'autres termes, l'objectif est de préserver la qualité biologique du sol pour mieux l'utiliser, voire la piloter. Ce pilotage se fera par des pratiques agricoles adaptées qui seront démontrées comme vertueuses pour les organismes du sol. En prérequis à ce pilotage, il faut donc connaître l'état biologique



Copyright © - Techniques de l'Ingénieur - Tous droits réservés

Parution : octobre 2019 - Ce document a ete delivre pour le compte de 7200097598 - editions ti // nc AUTEURS // 195.25.183.157

des sols agricoles et l'impact des pratiques actuelles pour sélectionner les plus vertueuses ou en inventer des nouvelles.

**Agroécologie**

L'agroécologie est un nouveau domaine scientifique et technique qui combine (ou réconcilie) les concepts de l'agronomie et de l'écologie pour développer une agriculture durable et vertueuse d'un point de vue environnemental, sociale et économique. En termes de gestion des sols, l'agroécologie doit amener à piloter le patrimoine biologique pour lui faire exprimer ses fonctions et services d'intérêts pour les productions agricoles (fertilité biologique, dépollution, réduction de l'érosion, stockage du carbone…). À terme, le pilotage de ces fonctions doit permettre de réduire significativement l'usage des intrants chimiques (engrais, pesticides) et entraînera la modulation de certaines pratiques agricoles connues pour être délétères pour le patrimoine biologique (travail intensif du sol, mauvaise couverture végétale, pesticides…). En grande culture, les pratiques agroécologiques identifiées sont la réduction du labour, de l'utilisation des intrants chimiques de synthèse, l'augmentation de la couverture végétale des sols en termes de période et de diversité par la complexification de la rotation, l'incorporation d'intercultures et de cultures associées. En grande culture, l'agroécologie serait donc un savant mélange entre l'agriculture de conservation des sols et l'agriculture biologique. En viticulture, l'agroécologie correspondrait à une viticulture biologique avec des sols couverts en permanence. À plus petite échelle, la permaculture peut être aussi une alternative pertinente (F Léger, Techniques Ingénieur ref [GE 1 035]).

## 3.2 La qualité biologique des sols agricoles

Il est très compliqué de lancer des études exhaustives capables d'appréhender l'analyse de la qualité biologique des sols agricoles à grande échelle. Pour répondre à cet objectif, il faut posséder i) des réseaux d'observations des sols à des échelles nationales, sans discrimination sur leur mode d'usage (forêt, prairie, grande culture vignes…), et en complément ii) des réseaux de parcelles agricoles où les sols et les pratiques sont bien identifiés. La France possède ces deux types de réseau.

Depuis le début des années 2000, le ministère de l'Écologie, celui de l'agriculture, l'ADEME et l'INRA ont mis en place le Réseau de Mesures de la Qualité des Sols (RMQS). Ce réseau couvre tout le territoire national avec plus de 2 200 sols échantillonnés tous les 15 ans selon une grille systématique de 16 km de côté. Depuis l'année 2005 des équipes de chercheurs en écologie travaillant sur les communautés microbiennes du sol se sont impliquées pour caractériser la diversité microbienne sur l'ensemble de ce réseau. Presque 15 ans après, il en ressort un bilan national de la qualité microbiologique des sols.

La première conclusion de cette étude est que les sols français ont tous une vie microbienne abondante et diversifiée, dont la variabilité observée à l'échelle nationale dépend tout d'abord du type de sol (figure **19**). Seulement 9 % des sols montrent une biomasse microbienne très faible. Par conséquent, les sols français agricoles ne sont pas morts ! Toutefois, il ne faut pas minimiser pour autant l'impact négatif de certaines pratiques agricoles puisque l'abondance des micro-organismes est systématiquement plus faible dans les sols agricoles en comparaison des sols de systèmes naturels (forêts) et semi-naturels (prairie) (figure **20**).

Concernant la faune du sol, et plus particulièrement les vers de terre, une étude similaire a été produite à l'échelle nationale, basée non pas sur un réseau systématique comme le RMQS, mais sur la compilation de données issues de différents projets menés par l'Observatoire participatif des vers de terre de 2006 à 2015 (OPVT, https://ecobiosoil.univ-rennes1.fr/OPVT_accueil.php).

La moyenne d'abondance des vers de terre des sols français est de 264 individus/m$^2$ de sol avec une grande variabilité en fonction des types de sols et des types d'usage des sols. La figure **20** montre aussi que seulement 12 % des sols français ont une abondance très faible (> 25 vdt/m$^2$) de vers de terre et 29 % une abondance faible (< 150 ind/m$^2$). Pour d'autres organismes de la faune du sol comme les nématodes, les collemboles ou encore les carabes, des initiatives de référencement similaires sont en cours et

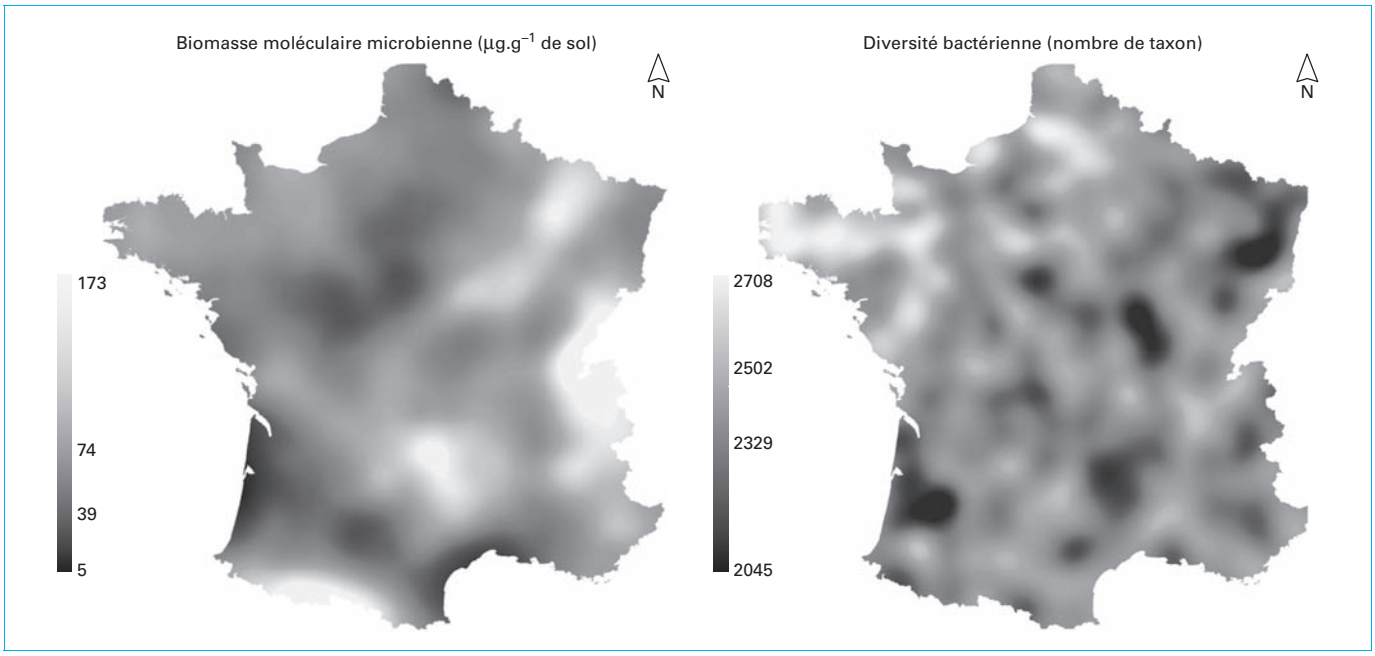



**Figure 19 – Cartographies nationales de la biomasse microbienne (gauche) et de la diversité bactérienne (droite) à l'échelle de la France** [31] [32]

Parution : octobre 2019 - Ce document a ete delivre pour le compte de 7200097598 - editions ti // nc AUTEURS // 195.25.183.157

Copyright © - Techniques de l'Ingénieur - Tous droits réservés

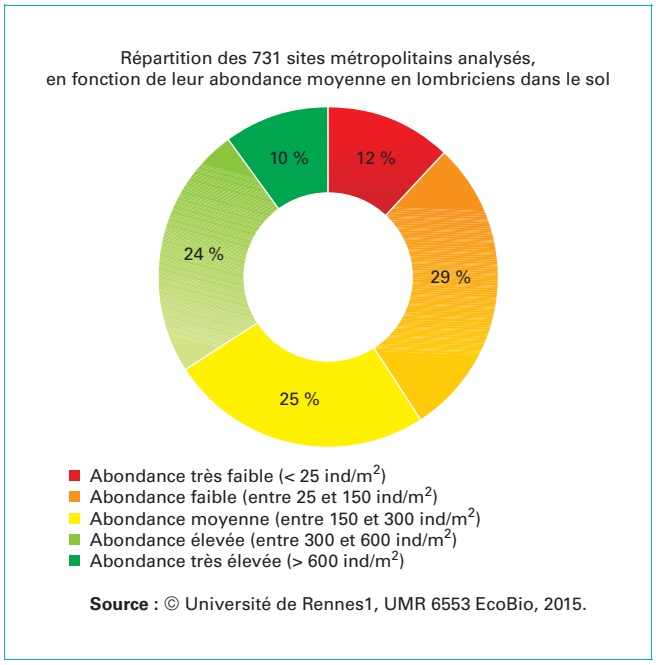



**Figure 20 – Abondance des vers de terre dans les sols français** [33]

devraient donner le jour à des cartographies et bilans nationaux très prochainement.

De 2011 à 2015, le projet AgrInnov, financé par le ministère de l'Agriculture, a permis de tester et valider un diagnostic de la qualité biologique des sols sur plus de 240 parcelles agricoles, dont la moitié était en grande culture et l'autre en viticulture. Ce diagnostic prenait en compte des indicateurs d'abondance et diversité de nématodes, de vers de terre et de micro-organismes (bactéries et champignons). Tous ces indicateurs ont été agrégés pour élaborer un indicateur de synthèse capable d'évaluer l'état du patrimoine biologique des sols agricoles. Ce projet a donc abouti à une première analyse nationale de la qualité biologique des sols agricoles et les résultats obtenus montrent que seulement 10 % des parcelles sont fortement altérés dans leur qualité biologique alors que 35 % des parcelles sont de très bonnes qualités biologiques. Toutefois, 55 % des parcelles se trouvent dans un état intermédiaire où le patrimoine biologique n'est pas critique mais à surveiller.

L'ensemble des résultats obtenus à ce jour confirme donc que les sols français ne sont pas morts ! Toutefois, un nombre non négligeable de sols, et notamment de sols agricoles, est à surveiller car ils sont altérés en termes d'abondance et de diversité d'organismes vivants.

## 3.3 Impact des pratiques agricoles sur la biodiversité des sols

Dans le paragraphe précédent les études menées à grande échelle ont montré que les sols français n'étaient pas dans un état d'urgence mais plutôt dans un état de surveillance écologique. Une analyse plus fine de ces réseaux d'observation montre l'impact des modes d'usages sur l'abondance de ces organismes du sol.

Les micro-organismes (bactéries et champignons) sont plus abondants dans les systèmes naturels (forêts) et semi-naturels (prairies) que dans les systèmes agricoles. Pour les vers de terre, la tendance est similaire avec une abondance plus importante dans les sols de prairie et la plus faible dans les sols agricoles (grandes cultures céréalières, vignes) (figure **21**).

Ceci peut s'expliquer par différentes pratiques agricoles qui sont connues pour altérer l'abondance des organismes dans le sol. Ces pratiques sont i) l'absence de couvert végétal permanent (rotation sans interculture, vignes non enherbées), ii) le travail du sol, iii) la fertilisation par des engrais chimiques au détriment d'apports organiques, et iv) l'ajout de pesticides (herbicide, antifongique, insecticide) qui ne tuent pas que les organismes indésirables visés. Toutes ces pratiques mènent à une destruction des agrégats et de la porosité du sol qui déterminent les habitats du sol pour les organismes, mais aussi à un épuisement des ressources nutritives (baisse de la quantité et de la qualité du carbone organique du sol) et quelquefois à des contaminations toxiques pour les micro-organismes (métaux lourds, pesticides, antibiotiques, HAP…).

En parallèle de ces réseaux d'observation, de nombreuses études ont été menées sur des sites expérimentaux qui ont permis d'évaluer assez finement l'impact des pratiques agricoles sur la qualité écologique des sols. Après 15 ans d'étude sur ce sujet, les pratiques démontrées comme plus délétères sont :

– le travail du sol couplé à l'absence de couverture végétale pérenne ;
– l'utilisation de pesticides de synthèse ;
– l'apport d'engrais chimiques au détriment d'amendements organiques ;
– les rotations (ou couverture végétale) peu diversifiées.

Pour essayer de réduire les effets néfastes de certaines pratiques, les agriculteurs ont développé des nouveaux types d'itinéraires techniques basés soit sur une réduction voire une absence de travail du sol, soit sur une indépendance vis-à-vis des pesticides et des engrais de synthèse. La première catégorie est appelée « **agriculture de conservation** » (AC) et n'utilise plus de charrue car elle ne laboure plus le sol. Elle est de plus en plus couplée à une couverture permanente des sols avec la présence d'intercultures qui succèdent aux cultures de l'année. Ce type d'agriculture est souvent synonyme d'une bonne quantité d'organismes dans les sols car l'absence de labour et la couverture végétale permettent le maintien de l'intégrité des habitats du sol et un bon niveau de ressources nutritives. Toutefois, cette agriculture est encore fortement dépendante de l'utilisation de pesticides de synthèse comme les herbicides, ce qui limite encore son côté vertueux. Le deuxième type d'agriculture, qui est indépendante des pesticides de synthèse, est l'**agriculture biologique** (AB). Si elle se développe fortement en France et en Europe sur la base d'une demande sociétale soucieuse de sa santé et de son environnement, son impact sur l'écologie du sol est important (cf. encadré **2**).

**Encadré 2 – Le Bio, pas si vivant !**

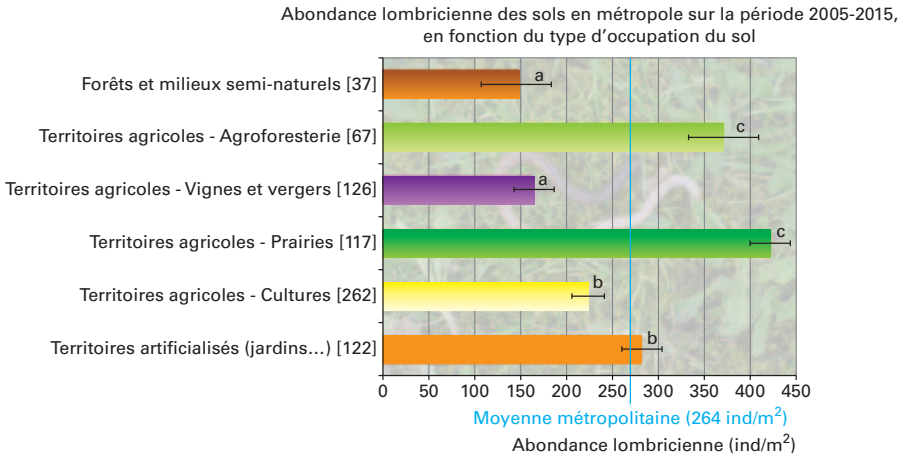
Différentes études scientifiques menées à l'échelle nationale montrent que la qualité des sols issus de parcelles menées en agriculture biologique n'est pas toujours meilleure, voire des fois plus mauvaise que celle issue de parcelles conduites en agriculture conventionnelle. Ceci s'explique principalement par le fait que l'agriculture biologique est une grande consommatrice de désherbage mécanique (pour pallier le désherbage chimique), et donc de travail du sol répété. Or le travail du sol, même superficiel, altère fortement les habitats des organismes vivants (macroagrégats, galeries). Il en résulte donc une baisse de leur abondance et de leur diversité. De plus, les capacités physiques mêmes du sol sont aussi altérée, comme la résistance à l'érosion et au tassement, la réserve hydrique et les capacités d'enracinement des plantes.

En conclusion, ces deux types d'agriculture présentent certains aspects vertueux pour la santé et l'environnement mais sont encore perfectibles. L'avenir réside donc sans doute notamment dans l'association de ces modes de production afin de cumuler les bénéfices d'une réduction du travail du sol, d'une bonne couverture végétale (pérenne et diversifiée) et d'une réduction significative de l'utilisation des pesticides et des engrais de synthèse.

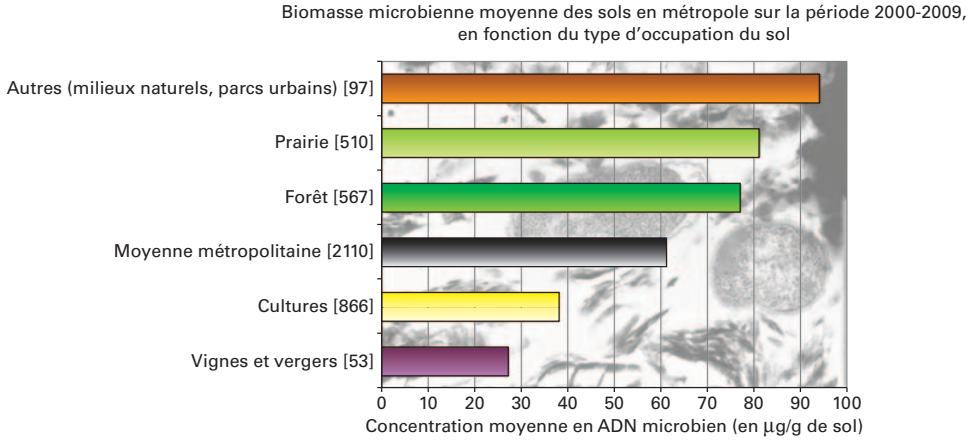


Copyright © - Techniques de l'Ingénieur - Tous droits réservés

Parution : octobre 2019 - Ce document a ete delivre pour le compte de 7200097598 - editions ti // nc AUTEURS // 195.25.183.157




**Note :** le nombre entre crochets indique le nombre de sites/observations
les barres d'erreurs correspondent aux erreurs standards
les différentes lettres (a,b ou c) indiquent des différences statistiques significatives
(< 2,2e-16 ***) des valeurs en fonction de l'occupation du sol
**Source :** © Université de Rennes1, UMR 6553 EcoBio, 2015




**Note :** le nombre entre crochets indique le nombre de sites analysés
**Source :** © Inra Dijon, plateforme GenoSol-Gis Sol, 2015

**Figure 21 – Impact du mode d'usage des sols sur l'abondance lombricienne et des micro-organismes dans les sols français** [34] [35]

### Le cuivre, le poids de l'histoire plombe les possibilités d'avenir !

Le cuivre est un métal lourd naturel qui, à faible dose, est un oligoélément indispensable pour le métabolisme de tout organisme vivant, mais qui devient toxique et létal à forte dose. En agriculture, le cuivre est utilisé depuis le début du XX$^{e}$ siècle sous forme de « bouillie bordelaise » pour lutter contre certaines maladies des cultures et notamment le mildiou et l'oïdium en vignes. Il a été largement utilisé pendant plus de 80 ans à des doses dépassant plusieurs dizaines de kilos par hectare et par an. Ceci a mené à une contamination chronique des sols pouvant atteindre plusieurs centaines de mgCu/kg sol alors que le fond naturel géochimique des sols français est aux alentours de 20-30 mg/kg sol. Aujourd'hui l'utilisation du cuivre est fortement réglementée avec un maximum de 4 kg Cu par hectare et par an. L'objectif de la Commission européenne serait d'interdire définitivement l'utilisation du cuivre à la vue de la contamination historique du sol de certaines zones agricoles ou viticoles. Une telle interdiction entraînerait de grandes difficultés pour certains modes de production comme l'agriculture biologique, car c'est un des rares pesticides naturels qu'elle peut utiliser en protection des cultures pour pallier les pesticides de synthèse. Un calcul rapide démontre qu'un hectare de cuivre contaminé à 200 mg par kg de sol (contamination moyenne) équivaut à un stock de cuivre d'environ 800 kg par hectare. L'ajout chaque année de 4 kg de cuivre par hectare ne changera pas significativement le stock de cuivre, même à long terme, et n'impactera pas les organismes du sol qui, de toutes façons, se sont adaptés à cette dose historique importante.

Parution : octobre 2019 - Ce document a ete delivre pour le compte de 7200097598 - editions ti // nc AUTEURS // 195.25.183.157

Copyright © - Techniques de l'Ingénieur - Tous droits réservés

# 4. La qualité écologique des sols au service des villes durables

La révolution démographique de la population mondiale opérée au siècle dernier a vu le nombre d'habitants passer de 3 milliards en 1960 à 7,5 milliards aujourd'hui. Ce mouvement se poursuit puisque les prévisions affichent 9 milliards en 2050 ! Dans le même temps, l'Homme est devenu une espèce principalement urbaine, avec des environnements urbanisés qui concentrent plus de la moitié de la population mondiale. Cette évolution rapide a été accompagnée par de nombreuses externalités négatives (*i.e.* multiplication des déchets, production d'espaces de relégation, pollution, artificialisation, extension des villes sur les terres arables, développement d'îlots de chaleur, réduction de la biodiversité, aléas et vulnérabilité des territoires au regard du changement climatique). Pour exemple, les grandes métropoles d'Europe du Nord s'approprient pour leur consommation de ressources et le stockage de leurs déchets une surface forestière ou agricole au moins 565 à 1 130 fois plus grande que la surface des villes elles-mêmes [36].

Ce constat d'une dégradation importante de la qualité de l'environnement urbain impose aujourd'hui un changement important des méthodes de conception et de gestion des espaces urbains puisqu'elles entament la base même du potentiel de renouvellement. Il amène aujourd'hui à orienter les politiques d'aménagements vers le « retour de la nature en ville », un mouvement qui s'inscrit dans le concept de « ville durable ». Longtemps opposées, la nature et la ville recherchent ainsi une nouvelle manière de coexister et la présence de la nature en ville s'impose aujourd'hui comme un facteur clé dans l'évaluation de la qualité de vie urbaine.

Pour relever ce défi, une meilleure connaissance de l'écologie de l'environnement urbain est indispensable, et en particulier celle liée à l'écosystème sol. En effet, comme nous l'avons évoqué précédemment, le sol doit jouer un rôle crucial dans cette transition en raison de son positionnement en tant que i) support des activités humaines (construction, production végétale), ii) interface avec l'atmosphère et l'hydrosphère, et iii) source de fonctions et de services clés pour la durabilité des systèmes urbains. Comme évoqué dans le cadre de la transition agroécologique, la connaissance de la biodiversité des sols urbains représente un challenge important pour le développement des villes durables au titre de sa valeur patrimoniale, d'une part, et de son implication dans les fonctions et services dont dépend le bien-être des citadins (*i.e.* dépollution, cycles biogéochimiques, fertilité, stockage du C).

Toutefois, bien que l'accumulation des connaissances sur la biodiversité des sols ait connu une croissance exponentielle depuis les années 2000, il existe peu de travaux aux échelles nationale et internationale sur la qualité biologique des sols urbains (environ 1 % des travaux sur les sols portent sur les sols urbains [37]). La forte hétérogénéité des écosystèmes urbains amenant à la notion de mosaïque urbaine avec des sols fortement modifiés par les activités humaines (*i.e.* anthroposols, cf. encadré **3**), d'importants niveaux de dépôt en azote atmosphérique, des effets d'îlots de chaleur urbains mais également d'importants niveaux de contamination en agents polluants (notamment métaux lourds) et des changements hydrologiques suggèrent une écologie particulière des communautés d'organismes qui colonisent les sols urbains. Il en résulte que la simple transposition des connaissances présentées dans les parties précédentes sur les sols ruraux et l'impact de leur usage n'est pas triviale et qu'il faut investir fortement sur la production de connaissances nouvelles et propres à l'écologie des sols urbains.

**Figure 22 – Exemple d'anthroposol**

**Encadré 3 – Sol urbain : des sols façonnés par l'action de l'Homme**

En milieu urbain, les sols sont formés durant le processus d'urbanisation et l'action de l'Homme apparaît comme le facteur déterminant pour leur genèse et leur évolution. À ce titre, ces sols sont qualifiés de façon générique d'« anthropisés » ou « anthroposols », c'est-à-dire modifiés par les activités humaines (figure **22**).

Différents types d'**anthroposols** peuvent être distingués. Ainsi, le référentiel pédologique français en différencie cinq types [38] :

– les anthroposols transformés qui résultent de modifications volontaires, anciennes et de longues durées, le plus souvent pour améliorer la fertilité des sols et assurer une meilleure production alimentaire ;

– les anthroposols artificiels qui résultent entièrement d'apports par l'Homme de matériaux d'origine non pédologique comme des déblais de carrières, des gravats à partir desquels il va se développer ;

– les anthroposols reconstitués qui résultent de l'utilisation de matériaux pédologiques, comme la terre végétale, transportés et/ou remaniés pour y installer une végétation pérenne ou non ;

– les anthroposols construits qui résultent d'une action volontaire de construction d'un « sol » en utilisant des matériaux technologiques, le plus souvent considérés comme des déchets, pour l'installation d'une végétation ;

– les anthroposols archéologiques qui ont subi des modifications anthropiques anciennes sur plus de 50 cm, avec la présence de plus de 20 % de débris issus d'activités humaines.

## 4.1 Bilan de la biodiversité des sols en ville et impact des modes d'usage

En comparaison des sols ruraux, très peu de données sont disponibles sur la biologie des sols urbains. De plus, tous les organismes vivants du sol n'ont pas été étudiés en contexte urbain, ou alors de façon trop peu significative pour en tirer des conclusions. Les travaux réalisés ont porté essentiellement sur la macrofaune (vers de terres, carabes, araignées et fourmis), la mésofaune (collemboles et acariens), la microfaune (nématodes), les micro-organismes (bactéries et champignons) et les tendances qui s'en dégagent vont être présentées dans cette section. Nous nous appuierons à la fois sur des travaux basés sur l'analyse de gradients rural-suburbain-urbain



Copyright © - Techniques de l'Ingénieur - Tous droits réservés

Parution : octobre 2019 - Ce document a ete delivre pour le compte de 7200097598 - editions ti // nc AUTEURS // 195.25.183.157

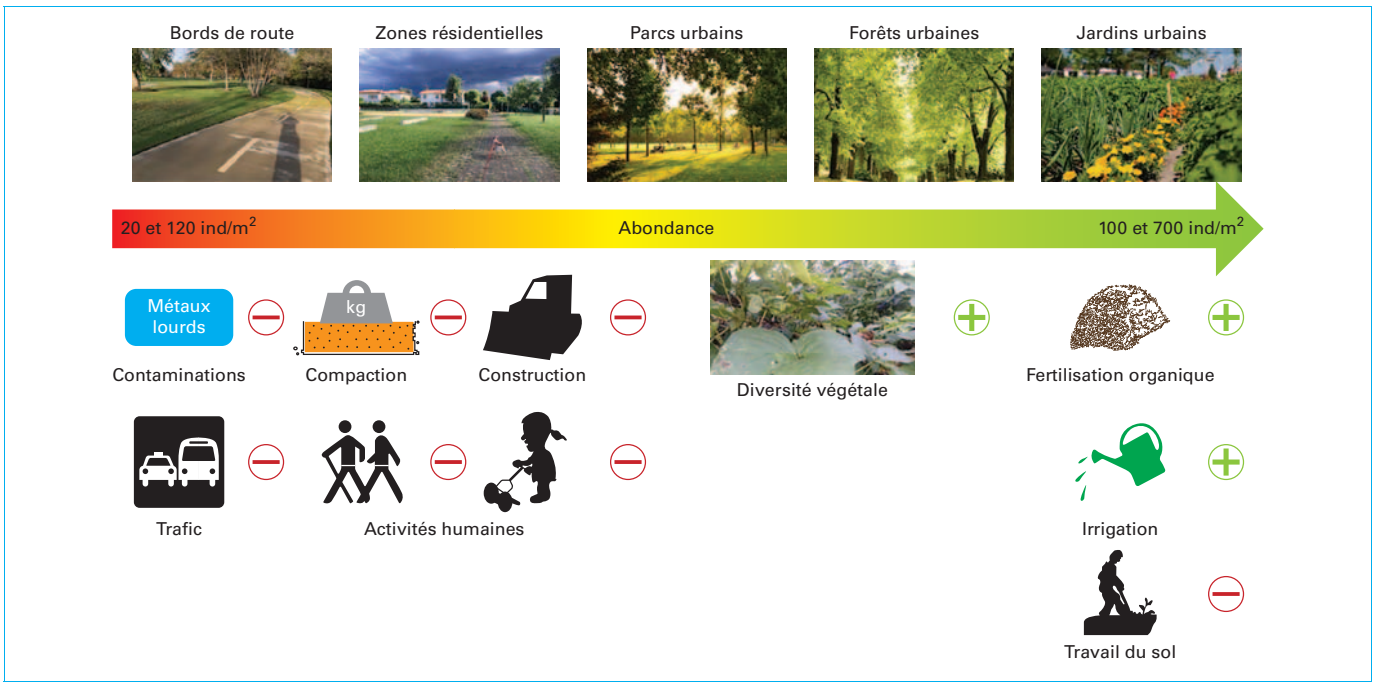



**Figure 23 – Représentation schématique du gradient d'abondance lombricienne en fonction du mode d'occupation du sol en milieu urbain ainsi que des facteurs pouvant contribuer aux différences observées**

pour évaluer l'impact de l'urbanisation au sens large ; et sur la comparaison des données de biodiversité obtenues entre différents modes d'occupation en contexte intra-urbain (surfaces enherbées, arbres en ville, friches urbaines, terrains de sport, jardins urbains, toitures végétalisées) pour évaluer l'impact des pratiques de gestion associées à la conduite de ces différents espaces urbains.

### 4.1.1 Vers de terre

Les communautés de vers de terre ont été relativement peu étudiées en contexte urbain, et notamment selon l'approche prenant en compte un gradient urbain-rural. Les rares travaux apportent des résultats contradictoires. Ainsi, Szlavecsz *et al.* [39] ont observé des valeurs d'abondance et de biomasse supérieures au niveau des sites les plus urbanisés (e.g. urbain *vs.* rural : 204 *vs.* 24 ind/m$^2$ et 107 *vs.* 17 g/m$^2$) alors que Smetak *et al.* [40] ont mesuré des abondances et des biomasses lombriciennes plus importantes dans les sites les moins urbanisés (e.g. urbain *vs.* rural : 26 *vs.* 437 ind/m$^2$). Difficile donc de conclure quant à l'effet de l'urbanisation sur l'abondance et la diversité des vers de terre ! Ces résultats contradictoires montrent principalement le manque de généricité lié au très faible nombre de données disponibles.

Lorsque l'on s'intéresse à l'impact du mode d'occupation urbain, c'est au niveau des jardins urbains que l'abondance et la diversité lombriciennes sont les plus élevées. Dans le cadre d'un projet sur les jardins de grandes métropoles françaises (Paris, Marseille et Nantes), les densités mesurées variaient ainsi de 100 à 700 ind/m$^2$ pour des diversités allant de 4,5 à 9,5 espèces différentes (Daniel Cluzeau, communication personnelle, programme ANR JASSUR) (figure **23**). Les forêts et parcs urbains apparaissent, quant à eux, comme des zones présentant des niveaux de colonisation sensiblement plus faibles en moyenne, avec entre 100 et 550 ind/m$^2$ et entre 2 et 6 espèces différentes [41] [42]. Enfin, les pelouses bordant les routes et présentes dans les zones résidentielles semblent être les moins propices au développement des lombrics, puisque c'est dans ces milieux que sont rapportés les niveaux d'abondance et de diversité les plus faibles (e.g. 26 ind/m$^2$ et entre 1 et 3 espèces différentes dans une zone résidentielle). Différents facteurs peuvent expliquer ces tendances observées entre modes d'occupation, comme la compaction, le taux de pollution et la présence du trafic pour les milieux les moins peuplés, et l'augmentation de la diversité végétale, l'irrigation ou encore la fertilisation organique pour les milieux les plus peuplés par les vers de terre (figure **23**).

### 4.1.2 Arthropodes

Les arthropodes ont été relativement bien étudiés en milieu urbain. Les travaux réalisés rapportent pour les macroarthropodes, comme les carabes et les fourmis, une augmentation de l'abondance et de la diversité des espèces le long du gradient urbain-rural, mais aussi pour les microarthropodes, comme les collemboles et les acariens [43]. Pour les araignées, c'est à des niveaux d'urbanisation intermédiaires qu'elles semblent être plus abondantes et diversifiées [44]. Une explication à la baisse de diversité et d'abondance des communautés d'arthropodes dans le centre des villes pourrait résider dans l'agencement spatial de la mosaïque urbaine qui agirait comme un filtre excluant des espèces, notamment *via* l'isolement géographique qui limite les flux de populations et/ou la fragmentation des habitats qui réduit la surface disponible pour les arthropodes.

Macroarthropodes et microarthropodes répondent différemment aux différents modes d'occupation urbains. Ainsi, les macroarthropodes sont particulièrement abondants et diversifiés dans les forêts et les friches urbaines, probablement en lien avec l'importante diversité végétale de ces milieux qui offre une gamme variée d'habitats pour ces organismes, mais aussi avec la diminution des perturbations anthropiques. Les jardins urbains abritent généralement une densité d'arthropodes supérieure aux parcs urbains, probablement en raison des différences de pratiques de gestion associées à ces deux modes d'occupation en termes de fertilisation, d'irrigation et de diversification du couvert végétal (figure **24**). « Abondance » ne rime toutefois pas avec « biodiversité » dans ce cas puisque le nombre d'espèces d'arthropodes est plus important dans les parcs urbains, probablement en raison de la plus grande

Parution : octobre 2019 - Ce document a ete delivre pour le compte de 7200097598 - editions ti // nc AUTEURS // 195.25.183.157

Copyright © - Techniques de l'Ingénieur - Tous droits réservés

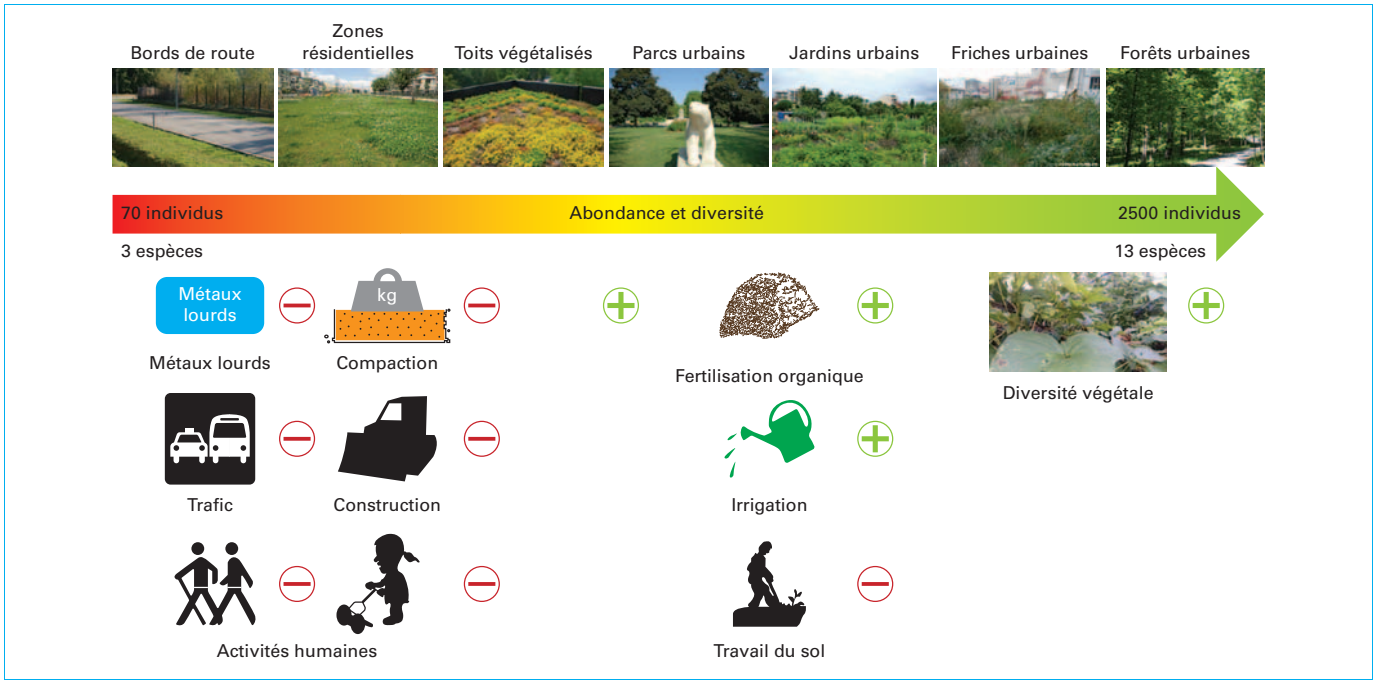



**Figure 24 – Représentation schématique du gradient d'abondance et de diversité de macroarthropodes en fonction du mode d'occupation du sol en milieu urbain ainsi que des facteurs pouvant contribuer aux différences observées**

stabilité de ces milieux. Les toits végétalisés, majoritairement de type extensif, ne semblent pas favorables au développement des macroarthropodes. Des données collectées à New York ont ainsi mis en évidence une baisse de 50 % de l'abondance de ces organismes au niveau de ces espaces en comparaison de parcs urbains [45], cette baisse allant de pair avec une diversité réduite. La diversité végétale réduite au niveau de ces surfaces pourrait contribuer à expliquer les faibles niveaux de colonisation observés. Enfin les pelouses situées en bordure de route et dans les zones résidentielles représentent les milieux les moins riches en termes d'abondance et de diversité de macroarthropodes, en raison notamment de niveaux de pollution et de compaction généralement élevés.

Contrairement au macroarthropodes, les microarthropodes, et plus précisément les collemboles, sont plus abondants et diversifiés dans les parcs urbains (abondance de l'ordre de 20 000 ind/m$^2$ et 20 espèces différentes). Bien que légèrement inférieure, l'abondance de microarthropodes reste très élevée et comparable entre les substrats de toits végétalisés et les sols de jardins urbains. Les fortes abondances observées sur les toits végétalisés pourraient être dues à la faible abondance de macroarthropodes prédateurs comme les carabes ou les araignées dans ces milieux. Si dans ces deux milieux les niveaux d'abondance sont proches, la diversité des collemboles semble en revanche nettement supérieure dans les jardins urbains (21 espèces) par rapport aux toits végétalisés, avec respectivement 21 et 6 espèces identifiées dans le cadre de l'étude récente de Joimel *et al.* [46]. Bien que plus abondants dans les substrats de toits végétalisés, les résultats de Rzeszowski et Sterzyńska [47] suggèrent que les microarthropodes sont moins diversifiés dans ces milieux en comparaison de pelouses situées dans des zones résidentielles ou bordant des axes routiers (14 espèces différentes).

### 4.1.3 Nématodes

L'impact de l'urbanisation sur l'abondance et la diversité des nématodes a été peu étudié. Certains travaux suggèrent une baisse de l'abondance totale des nématodes dans les sols ruraux par rapport aux sols urbains. L'augmentation de la concentration en métaux lourds dans les sols urbains est généralement présentée comme facteur explicatif de cette baisse. Toutefois, la généricité de ces conclusions est discutable car d'autres travaux ont observé des niveaux d'abondance totale équivalents entre sols urbains et sols ruraux. S'il reste un doute lorsque l'on considère l'abondance totale des nématodes, tous les travaux s'accordent au contraire sur une chute de la densité des nématodes carnivores et omnivores, dans les sols urbains. Ceci est probablement dû à la plus forte sensibilité aux métaux lourds de ces organismes de haut niveau trophique.

Cette perturbation de la chaîne trophique se traduit dans les valeurs de plusieurs indices calculés sur la base de la composition et de l'abondance de la nématofaune du sol, et en particulier sur l'indice de structure (SI) qui est d'autant plus élevé que le milieu est stable ; et l'indice d'enrichissement (EI) qui augmente avec la disponibilité du milieu en nutriments (pour plus d'information sur ces indices et leurs mode de calcul, voir https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/nematofaune-bio-indicateur-pertinent-2011.pdf). Ainsi, des valeurs de SI plus faibles en contexte urbains sont généralement observées, rendant compte d'un milieu plus perturbé par rapport aux sols ruraux. Toutefois, ceci ne semble pas affecter la disponibilité en nutriments puisque des valeurs similaires d'indice d'enrichissement ont été observées entre les contextes urbains et ruraux.

Les différents modes d'occupation urbains impactent la diversité des communautés de nématodes. Les valeurs d'indices d'enrichissement et de structure des populations de nématodes rapportés dans plusieurs études indiquent que la stabilité du milieu augmente (valeur croissante du SI) selon un gradient allant des jardins aux forêts urbaines en passant par les friches urbaines et les parcs urbains (SI allant de 20 à 80). À l'inverse, l'EI décroît selon ce gradient, passant de valeurs élevées, proches de 80 pour les jardins urbains, à des valeurs moyennes aux alentours de 50 pour les forêts urbaines. Ces tendances observées soulignent l'effet bénéfique des pratiques de fertilisation qui favorisent la disponibilité en nutriments dans les sols de jardins, mais aussi l'effet négatif d'autres pratiques telles que le travail du sol très utilisé dans les



Copyright © - Techniques de l'Ingénieur - Tous droits réservés

Parution : octobre 2019 - Ce document a ete delivre pour le compte de 7200097598 - editions ti // nc AUTEURS // 195.25.183.157

jardins et qui impacte la stabilité du milieu et affecte les organismes du sol. Les sols de friches urbaines semblent être également très enrichis en nutriments, mais cependant plus stables que les jardins urbains même si, de par leur historique d'exploitation, ces milieux demeurent plus perturbés que les parcs et les forêts urbaines [48].

### 4.1.4 Micro-organismes

En milieu urbain, les travaux sur l'abondance et la diversité des communautés microbiennes du sol sont rares et l'écologie de ces communautés reste donc encore mal connue. La majorité des études publiées porte sur des travaux réalisés aux États-Unis, et plus précisément sur les systèmes urbains de la ville de New York, mais aussi sur des métropoles chinoises. Une baisse de la biomasse microbienne est généralement observée dans les sols urbains par rapport au sols ruraux, probablement en raison de niveaux importants de perturbation, de la texture particulière et de la compaction souvent importante du sol. Certains travaux rapportent également une baisse de la diversité bactérienne dans les systèmes urbains par rapport aux système ruraux, mais d'autres n'observent pas de telles tendances. Comme évoqué précédemment pour les vers de terre et les nématodes, ces apparentes contradictions révèlent le manque de travaux sur le sujet, avec des données trop peu nombreuses pour pouvoir tirer des conclusions génériques.

Tous les travaux réalisés s'accordent toutefois sur le fait que l'urbanisation modifie la composition et la structure des communautés microbiennes. Bien que les groupes microbiens dominants soient similaires à ceux observés dans les sols ruraux, l'abondance relative de ces groupes au sein de la communauté est modifiée par le niveau d'urbanisation et les pratiques de gestion des différents espaces urbains. Comme en milieu rural, les propriétés physico-chimiques du sol ressortent comme les principaux facteurs déterminant la structure des communautés microbiennes en milieu urbain, le pH étant le paramètre le plus important. En comparaison, le niveau d'urbanisation en tant que tel semble peu déterminant, de même la diversité du couvert végétal, que ce soit en milieu de parcs urbains ou de toitures végétalisées [49]. Les variations du microclimat ne semblent pas non plus influencer significativement la diversité des communautés à l'échelle d'une métropole [49]. Toutefois, une étude comparant 16 villes distribuées sur l'ensemble du territoire chinois montre qu'il peut contribuer au déterminisme de la diversité microbienne observée entre les parcs des différentes métropoles [50].

Les différents modes d'occupation urbains impactent la diversité des communautés de micro-organismes du sol. Une augmentation de la fréquence de populations potentiellement pathogènes dans le sol de Central Park a ainsi été observée, sans doute en raison de sa forte fréquentation ou encore de l'intensité et la fréquence des perturbations anthropiques auxquelles il a été soumis au cours de son histoire. Des travaux comparant les communautés bactériennes entre des noues, des parcs et des pieds d'arbres du quartier du Bronx (NY, États-Unis) [51] montrent également une augmentation de la diversité de ces communautés dans les sols construits des noues par rapport aux parcs et pieds d'arbres. Ils mettent aussi en évidence une augmentation de la fonctionnalité de ces communautés, c'est-à-dire une augmentation de la fréquence de gènes impliqués dans la dégradation de polluants, dans les transformations des cycles biogéochimiques, probablement en réponse aux fortes concentrations d'éléments polluants. En termes d'ingénierie, ces résultats illustrent la possibilité d'orienter les communautés *via* la construction de sols qui peuvent stimuler la diversité microbienne et le développement de populations porteuses de fonctions d'intérêt pour les villes durables (dépollution, recyclage des nutriments…). Les substrats de toitures végétalisées, bien que souvent très artificiels, représentent également un habitat pour les communautés microbiennes. Ainsi, des travaux réalisés sur un réseau de toitures de la ville de New York montrent qu'ils abritent d'importants niveaux de biomasse microbienne, toutefois inférieurs à ceux mesurés dans différents parcs de la même ville. Ils servent également d'habitat à une importante diversité de populations de champignons connues pour leurs aptitudes à survivre dans des environnements pollués et très perturbés [52].

## 4.2 Vers une meilleure intégration de la biodiversité des sols dans la transition vers des villes durables

Une enquête menée en 2017 à l'échelle de la France métropolitaine auprès du réseau de l'association Plante&Cité (https://www.plante-et-cite.fr) et ciblant les différents types d'acteurs de l'aménagement urbain (bureaux d'étude, architectes, collectivités/municipalités, paysagistes, fournisseurs de produits, établissements de formation, jardiniers privés et amateurs…) a montré que la gestion du sol est perçue par tous comme un enjeu et un levier pour limiter l'empreinte environnementale de la ville.

Toutefois le sol représente encore un enjeu secondaire dans les politiques d'aménagements urbains, principalement en raison d'une méconnaissance scientifique et technique par les acteurs du développement urbain. Toutes les cibles s'accordent sur la nécessité de communiquer pour pallier cette situation, avec un triple objectif : pédagogique (sensibiliser tous les acteurs), opérationnel (déterminer les modalités d'action) et politique (volonté de s'engager, notamment financièrement).

Favoriser la communication entre les parties prenantes scientifiques et professionnelles apparaît donc comme un enjeu prioritaire, pour ensuite réussir à synchroniser tous les acteurs sur cette thématique commune. Dans ce sens, une démarche pertinente serait la mise en place d'un projet participatif co-construit entre scientifiques, experts de la biologie des sols et acteurs de l'aménagement urbain. Des projets thématiques dans ce sens sont en cours au niveau national. On peut citer pour exemple le projet SPIPOLL (http://www.spipoll.org, coord. Muséum national d'histoire naturelle) qui consiste en un suivi photographique des insectes pollinisateurs ou encore l'observatoire participatif de la biodiversité des sols dans les jardins urbains (JardiBioDiv http://ephytia.inra.fr/fr/P/165/jardibiodiv) piloté par l'INRA et l'université de Lorraine.

Un projet plus ambitieux encore permettant de couvrir l'ensemble du territoire national, mettant en réseau les métropoles et intégrant les différents espaces urbains/périurbains/ruraux ainsi que l'ensemble de la biodiversité du sol serait décisif dans la construction du savoir commun nécessaire à l'intégration de la biodiversité comme levier dans la construction des villes durables. Des initiatives dans ce sens se développent afin de catalyser la mise en place de formations sur la biologie du sol à destination des acteurs de la gestion des espaces urbains et la mise en réseau de métropoles pour faciliter le partage d'expériences. Un projet est ainsi en cours de soumission pour financement à l'ANR (Agence nationale de la recherche) en ciblant différentes villes (Montpellier, Angers, Nancy, Paris), et un autre aux « Investissements d'avenir » ciblant l'aire urbaine de Dijon métropole.

Pour répondre au besoin opérationnel formulé, un enjeu réside dans la standardisation des méthodes d'analyse de la biodiversité du sol, et notamment des outils de biologie moléculaire pour le moment réservé au monde de la recherche, afin de mettre en place un tableau de bord d'indicateurs éprouvés techniquement et scientifiquement pour permettre un diagnostic robuste de la qualité biologique des sols urbains. Ceci est en cours dans le cadre d'un projet « Investissements d'Avenir » AgroEcoSol (coord. Aurea Agrosciences, http://www.ea.inra.fr/Toutes-les-actualites/agro-eco-sol) qui vise le développement d'une offre de conseils agroécologiques incluant des bioindicateurs de la qualité des sols. Ces outils devront être également accompagnés de préconisations afin de proposer à terme une approche opérationnelle et concrète. Ceci passera par la construction de référentiels de manière à évaluer la qualité biologique des sols urbains par et pour les acteurs professionnels de l'aménagement urbain.

Parution : octobre 2019 - Ce document a ete delivre pour le compte de 7200097598 - editions ti // nc AUTEURS // 195.25.183.157

Copyright © - Techniques de l'Ingénieur - Tous droits réservés

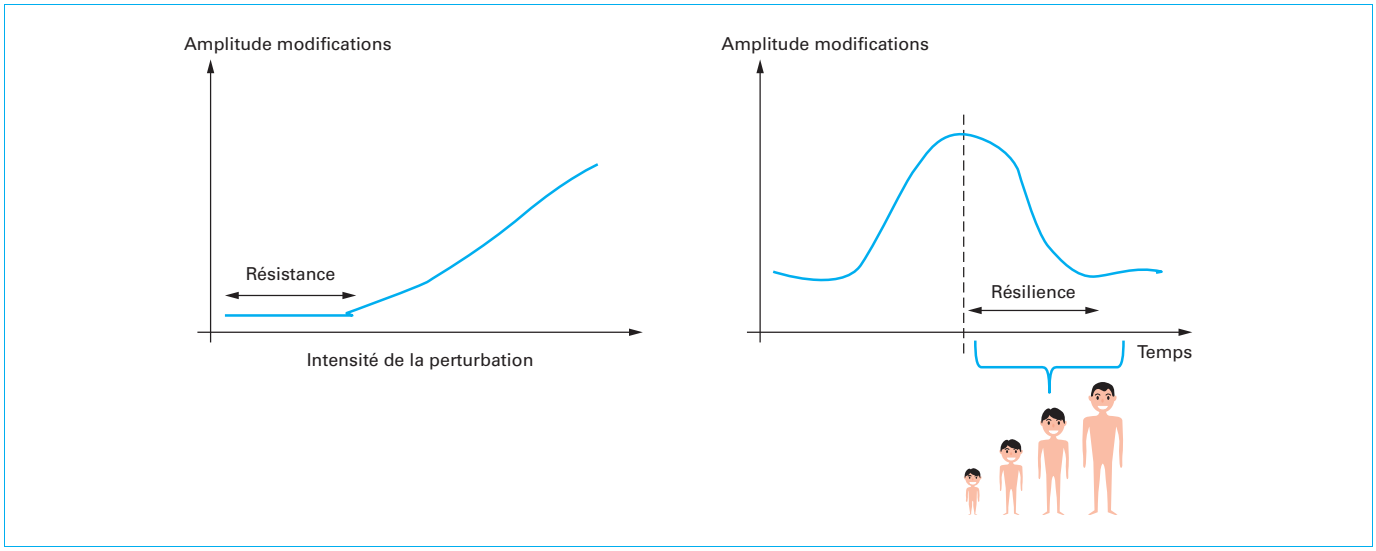



**Figure 25 – Représentation schématique de la part statique (résistance) et dynamique (résilience) de la stabilité**

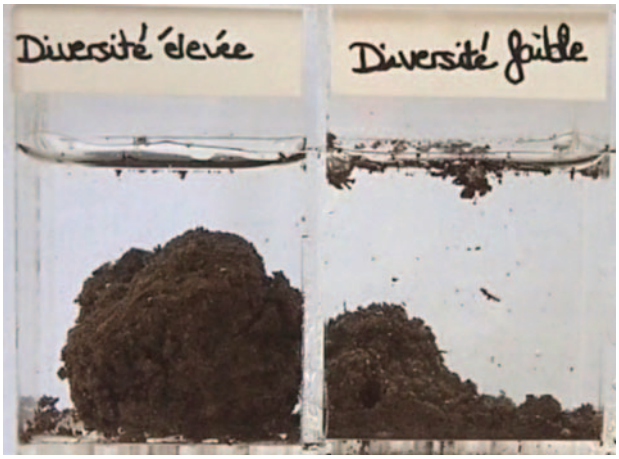
# 5. Résilience écologique des sols

La **résilience d'un sol** correspond à la vitesse à laquelle il est capable de se réhabiliter lorsqu'il est dégradé. D'un point de vue écologique, cela correspond à la capacité des communautés d'organismes qui l'habitent à retrouver un niveau d'abondance, de diversité et d'activité identique à celui avant la perturbation. La résilience représente la part dynamique de la stabilité d'une communauté alors que la résistance représente la part statique de cette stabilité (cf. figure **25**).

Comme la résilience est une vitesse et donc un processus dynamique, ce qui importe pour les productions agricoles, c'est que la résilience ne soit pas supérieure à une génération humaine pour que le sol puisse remplir de nouveau ses fonctions de productivité alimentaire. La résilience est fonction du type d'organismes et de fonctions dégradées par la perturbation car les capacités de réhabilitation biologique vont être plus ou moins rapides en fonction des organismes impliqués.

Par exemple, dans le cas des micro-organismes qui possèdent le temps de génération le plus court et la plus grande capacité d'adaptation aux perturbations environnementales, la résilience pourra être assez rapide. En conditions contrôlées et optimales, la capacité d'un sol à réhabiliter sa stabilité structurale sur la base de la réinoculation d'une vie microbiologique riche et diversifiée peut ainsi s'obtenir en quelques semaines (cf. figure **26**).

La figure **27** montre une expérience qui a été faite en plein champ pour évaluer la réponse des communautés bactériennes indigènes à un apport répété de métal lourd. Cette expérience montre que les deux doses d'apport de métal lourd provoquent des modifications significatives de la composition bactérienne et ceci à chaque apport répété. L'amplitude des modifications est fonction de la dose apportée. Ces modifications disparaissent avec le temps, ce qui correspond au processus de **résilience écologique**. Pour la dose faible, l'amplitude des modifications est de plus en plus faible à chaque nouvel apport. Ceci s'explique par un processus de **préadaptation** de la communauté, menant à une meilleure résistance au métal, qui s'ajoute au processus de résilience écologique. Ceci




Les deux sols ont été inoculés avec un niveau faible (droite) ou élevé (gauche) de diversité microbienne. Il en résulte après 4 semaines d'incubation en conditions optimales (T° et humidité), une moins forte sensibilité à la déstructuration du sol par l'eau (slake test, © VertCarbone) avec la plus forte diversité microbienne (crédit photo PA Maron, INRA ©). Ces résultats peuvent donc être interprétés en tant que résilience écologique de la fonction stabilité du sol portée par les micro-organismes

**Figure 26 – Illustration du rôle de la diversité microbienne pour la stabilité structurale du sol**

n'est pas observé pour les doses fortes. De plus, pour cette même dose forte le processus de résilience n'apparaît plus dès le 3$^{e}$ apport, ce qui peut s'expliquer par une accumulation trop importante de métal dans le sol et l'obligation, pour la communauté bactérienne, de changer profondément et définitivement dans sa composition taxonomique pour pouvoir survivre dans ce nouvel environnement contaminé.

En conditions de plein champ, la résilience suite à l'arrêt de certaines pratiques agressives pour la qualité écologique du sol peut prendre plus de temps. Pour exemple, un sol de grande culture



Copyright © - Techniques de l'Ingénieur - Tous droits réservés

Parution : octobre 2019 - Ce document a ete delivre pour le compte de 7200097598 - editions ti // nc AUTEURS // 195.25.183.157

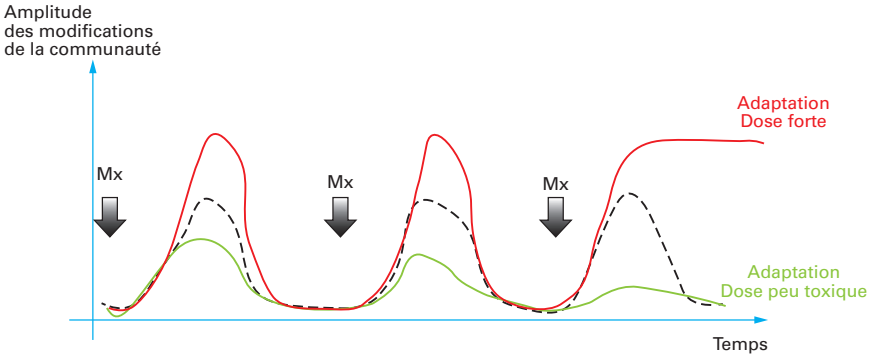



**Figure 27 – Représentation schématique de la dynamique de l'amplitude des modifications observées dans la composition des communautés de bactéries d'un sol suite à un apport répété de métal à des doses fortes (supérieures au seuil toxique) et faibles (inférieures au seuil toxique)**

céréalière qui est en arrêt de labour peut mettre entre trois et six ans pour se réhabiliter, ce temps dépendant du type de sol et de l'historique plus ou moins prononcé de la pratique appliquée. L'association de plusieurs pratiques agroécologiques vertueuses peut accélérer la résilience écologique d'un sol, comme la bonne couverture des sols en plus de l'arrêt du labour et/ou l'utilisation d'amendements organiques.

Pour des organismes plus gros comme la mésofaune ou la macrofaune du sol, les temps de génération et la capacité d'adaptation étant moindre, la résilience écologique pourra prendre plus de temps. Pour exemple, un sol fortement déprécié en vers de terre mettra dans certains cas entre 5 et 10 ans pour récupérer un cheptel satisfaisant de lombrics, et ceci même si différentes pratiques agroécologiques sont appliquées.

**Les biostimulants, poudre de perlimpinpin ?**

Depuis les années 2000 et le démarrage de la transition agroécologique, qui répond à la remise en question de certaines pratiques agricoles et notamment à l'apport d'engrais chimiques et de pesticides de synthèse, de nombreuses sociétés d'agrofourniture se sont orientées vers des produits naturels pour la fertilisation des sols ou la protection des cultures. Certains de ses produits sont inertes, à base organique ou minérale et utilisés à faible dose (quelques dizaines de grammes par hectare) et d'autres sont des micro-organismes vivants de types bactéries, champignons ou virus. Si certains du premier type ont été démontrés comme efficaces, notamment par une stimulation de l'activité microbiologique à même d'améliorer la fertilité biologique des sols, tous ces produits ne sont pas toujours évalués de façon scientifique et robuste et avec un maximum d'indépendance. Pour la deuxième catégorie de produits qui sont des organismes vivants ajoutés au niveau du sol pour pallier un déficit de vie biologique ou de biodiversité, leur effet peut être rationnellement mis en cause. En effet, dans le sol la flore microbienne indigène va faire barrière à l'implantation de germes exogènes, à l'image de ce qui se passe dans le tube digestif où la flore microbienne empêche l'implantation de germes ingérés au quotidien et donc protège l'organisme de ceux potentiellement pathogènes. À ce titre, les micro-organismes apportés ne doivent pas avoir le temps de s'implanter et donc d'avoir une action. Ceci est d'autant plus vrai que l'on implante généralement des micro-organismes originaires d'autres sols, voire d'autres régions du globe et que leur chance de survie est encore plus faible. Lorsqu'un sol agricole à un faible niveau de biodiversité et d'activité biologique, il vaut mieux essayer de le réhabiliter avec des pratiques agricoles plus vertueuses dans un premier temps que d'ajouter de la biodiversité qui ne pourra sûrement pas s'implanter.

**La biodiversité, le plus le mieux ?**

Si la qualité biologique d'un sol est souvent démontrée comme reliée positivement à la biodiversité des organismes que celui-ci héberge, ceci n'est pas toujours vrai pour les micro-organismes du sol et notamment pour les bactéries. En effet, sur le RMQS les sols sous prairies et forêts qui représentent des écosystèmes naturels ou semi-naturels présentent les niveaux de diversité bactérienne les plus bas par rapport aux sols agricoles ou viticoles. Ceci s'explique par le concept écologique dit de la « perturbation intermédiaire ». La biodiversité d'un écosystème est maximum lorsque ce dernier subit une perturbation intermédiaire (ni trop forte et ni trop faible) et minimum lorsqu'il subit une perturbation faible (phénomène d'exclusion compétitive des espèces) ou forte (sélection des espèces). Ainsi, les sols sous forêts et prairies représentent des écosystèmes qui subissent des perturbations faibles par la quasi-absence de l'action de l'Homme et renferment donc une diversité plus faible de bactéries. À l'inverse, les sols agricoles et viticoles qui subissent généralement une multitude d'interventions correspondent à des systèmes plus perturbés (mais pas trop) et présentent donc une diversité bactérienne plus élevée. Toutefois, ce niveau de diversité ne renseigne cependant pas sur la présence d'espèces bénéfiques d'intérêt ou au contraire néfastes comme les pathogènes par exemple. Plusieurs travaux suggèrent ainsi que les sols agricoles qui renferment une plus grande diversité de bactéries possèdent aussi plus d'espèces néfastes pour les productions agricoles comme des bactéries pathogènes ou des bactéries impliquées dans une dégradation trop rapide de la matière organique du sol.

# 6. Les sciences participatives au service des sols

Les **sciences participatives**, aussi appelées « sciences citoyennes », correspondent à un processus de recherche qui associe des non-experts avec des experts scientifiques. En d'autres termes, c'est un processus de recherche qui associe des citoyens et des chercheurs, chacun amenant un niveau de connaissance ou d'implication utile à l'autre.

Les sciences participatives sont apparues dans les années 1980 dans le domaine de la santé et dans les pays anglo-saxons. Le but

Parution : octobre 2019 - Ce document a ete delivre pour le compte de 7200097598 - editions ti // nc AUTEURS // 195.25.183.157

Copyright © - Techniques de l'Ingénieur - Tous droits réservés

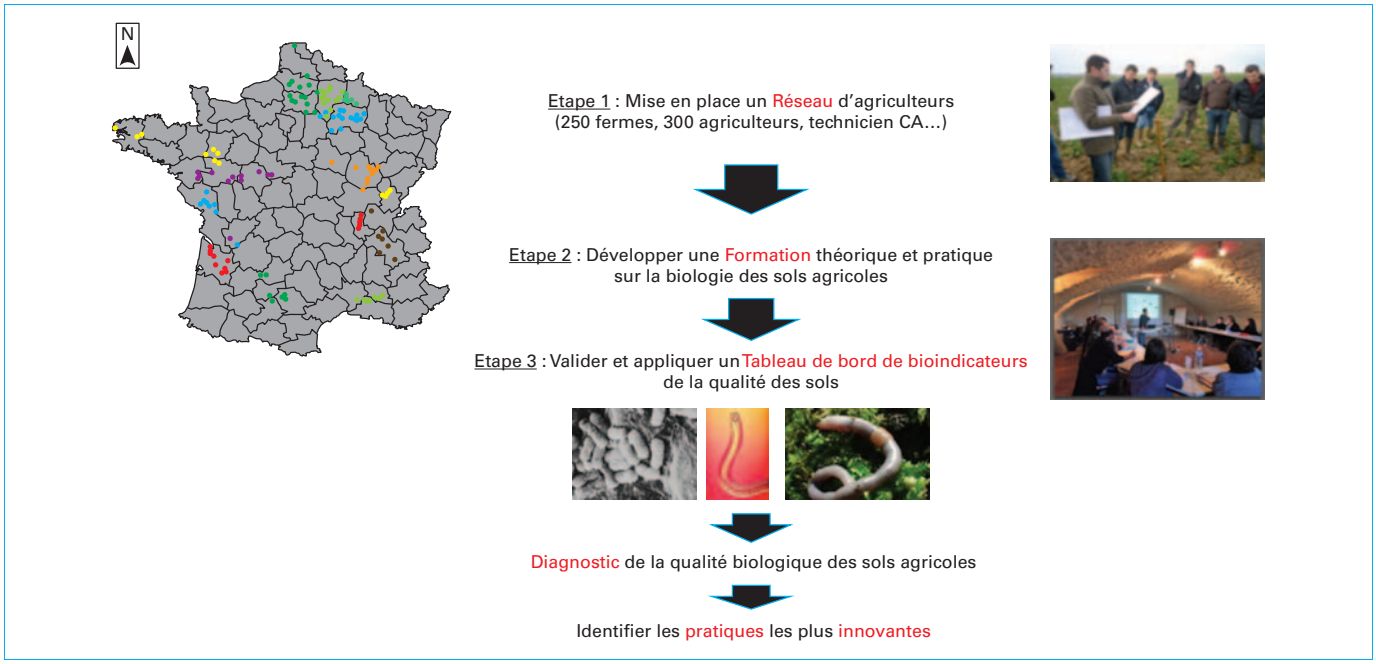



**Figure 28 – Étapes clés du projet AgrInnov**

était d'associer les malades aux développements de nouveaux traitements et d'associer leur ressenti à la finalisation des nouveaux médicaments (bien-être, effets secondaires, efficacité du traitement…). Ce n'est que dans les années 2000 que les sciences participatives sont apparues dans le domaine des sciences environnementales et de la biodiversité (http://www.inra.fr/Grand-public/Economie-et-societe/Tous-les-magazines/Sciences-participatives).

Il existe quatre niveaux d'implication croissante des citoyens dans les processus de recherche participative. Le premier niveau est appelé « *crowd sourcing* » et consiste uniquement à capter de l'information par les citoyens qui serait utile à la recherche. De nombreuses initiatives à l'échelle nationale sont basées sur ce premier niveau, comme les observatoires participatifs qui permettent de référencer certains animaux ou végétaux. Le plus connu en France est « Vigie-Nature » porté par le Muséum national d'histoire naturelle, qui permet à tout citoyen d'observer, de communiquer et de référencer différentes espèces animales afin de participer à des inventaires nationaux sur l'évolution de la biodiversité (https://www.mnhn.fr/fr/participez/contribuez-sciences-participatives/observatoires-vigie-nature). Le deuxième niveau consiste en une implication des non-experts dans la co-interprétation des résultats obtenus par le projet de sciences participatives avec les chercheurs. Le troisième niveau implique les citoyens dans la coconstruction du projet en amont et enfin le quatrième niveau consiste en une coresponsabilisation des citoyens, notamment par un acte de cofinancement du projet.

Dans le domaine de la qualité écologique des sols, le premier projet développé avec une stratégie de sciences participatives est le projet AgrInnov financé par le ministère de l'Agriculture entre 2011 et 2015, et porté par une association (Observatoire français des sols vivants, http://www.ofsv.org) et l'INRA. Ce projet a permis de faire travailler directement les agriculteurs et les chercheurs en écologie du sol et a donc permis d'établir un contexte d'échange des savoirs dans lequel les agriculteurs intervenaient en tant qu'experts en agriculture, face à des chercheurs experts en sciences [53]. Ils ont ensemble développé, validé et appliqué un tableau de bord d'indicateurs biologiques (comprenant des indicateurs de faune du sol, de microbiologie et agronomiques) de la qualité des sols sur un réseau de 250 parcelles en grande culture et en viticulture dans toute la France (figure **28**). En parallèle du tableau de bord, des formations sur la biologie des sols ont été élaborées ainsi qu'un mode opératoire de transfert. Les agriculteurs ont rempli des enquêtes sur leurs pratiques et leur système de culture, ce qui a permis de dégager différents critères agronomiques pertinents pour faire le lien entre les pratiques et les indicateurs de qualité biologique des sols. Ce projet a permis d'équiper théoriquement et techniquement les agriculteurs sur la biologie du sol afin qu'ils soient capables d'évaluer eux-mêmes l'impact de leurs pratiques sur la qualité de leur sol.

D'un point de vue technique, ce projet a permis de valider l'opérationnalité d'une séquence technique de diagnostic de la qualité des sols agricoles par les agriculteurs eux-mêmes. Ce projet a aussi permis de répondre à la volonté des agriculteurs de disposer d'indicateurs de synthèse qui agrégeaient les différents indicateurs mis en place dans le tableau de bord. Ces indicateurs de synthèse ont été développés par les chercheurs avec l'objectif de répondre aux questionnements des agriculteurs sur le patrimoine biologique de leur sol et sur son implication dans sa fertilité biologique.

D'un point de vue scientifique, il a été démontré que moins de 10 % des parcelles testées étaient dans un état critique en termes de patrimoine biologique du sol. Ceci est plutôt encourageant sur la qualité des sols agricoles en France, même s'il faudrait développer leur surveillance sur un plus grand nombre de fermes et de systèmes de production afin d'avoir un diagnostic plus exhaustif et représentatif.

D'un point de vue opérationnel, plus de 97 % des agriculteurs ont suivi le projet jusqu'au bout, avec un fort investissement de leur part. Le projet AgrInnov est donc une démonstration opérationnelle de l'intérêt des agriculteurs pour la qualité de leur sol et aussi des capacités de transferts techniques de la recherche vers les utilisateurs des sols. De plus, une enquête effectuée à la fin du projet a montré que 60 % des agriculteurs et viticulteurs du réseau ont commencé à modifier certaines de leurs pratiques sur la base du diagnostic et de réflexions initiées dans ce projet.

Dans ce contexte et à la suite d'AgrInnov, des structures de prestation ont été confortées dans leur position et d'autres ont vu le



Copyright © - Techniques de l'Ingénieur - Tous droits réservés

Parution : octobre 2019 - Ce document a ete delivre pour le compte de 7200097598 - editions ti // nc AUTEURS // 195.25.183.157

jour. La société ELISOL environnement (https://www.elisol.fr) et l'OPVT (Observatoire participatif des vers de terre, https://ecobiosoil.univ-rennes1.fr/OPVT_accueil.php) ont pu, grâce au projet, consolider leur rôle d'expert sur la faune du sol en lien avec les pratiques agricoles. De plus, l'ESA a développé une nouvelle structure (LEVAbag MD) qui permettra de diffuser une nouvelle prestation de service dans le monde agricole basée sur l'évaluation de la capacité de dégradation de la matière organique dans le sol. Par conséquent, les filières de formation et de diffusion du tableau du bord analytique sur les indicateurs de la biologie de sols agricoles ont été initiées et consolidées grâce au projet AgrInnov.

Suite au succès du projet AgrInnov, le REVA (Réseau de veille à l'innovation agricole) a été mis en place avec l'objectif de pérenniser et déployer l'initiative AgrInnov. La coordination nationale de ce réseau est assurée par l'Observatoire français des sols vivants (http://www.ofsv.org) et la coordination locale par les différents organismes impliqués dans AgrInnov (AgroSup Dijon, IFV, ESA, CA, univ. Rennes…). À ce jour, plus de 400 domaines agricoles et viticoles sont référencés dans le REVA. L'approche participative reste d'actualité avec des agriculteurs de plus en plus structurants au sein de ce réseau. Les analyses de qualité biologique ne sont plus suivies sur une seule année mais sur une période de cinq ans, afin de mettre en place un monitoring des sols en fonctions des changements de pratiques et de déterminer notamment les modalités de résilience du sol suite à ces changements (cf. section 4). Le REVA devient aussi pour la recherche un terrain de validation pour tester la robustesse, la sensibilité et l'opérationnalité de nouveaux indicateurs de la qualité des sols avant leur intégration dans le tableau de bord pour compléter ou remplacer d'autres indicateurs. De son côté, la recherche a accès aux données accumulées et met en place des stratégies de *datamining* pour évaluer l'impact des pratiques agricoles sur la biodiversité des sols et les fonctions associées et donc déduire les pratiques les plus innovantes à même de remplir les objectifs de la transition agroécologique.

En parallèle, et sur la base de la démonstration faite par AgrInnov, d'autres projets de sciences participatives se sont développés. Le projet EcoVitisol, financé par l'Agence française de la biodiversité (AFB) et le Bureau interprofessionnel des vins de Bourgogne (BIVB), a démarré en 2019 et a pour objectif d'évaluer l'impact des modes de production viticole (conventionnel, viticulture biologique, biodynamie) sur la qualité microbiologique du sol. Piloté par l'INRA de Dijon, ce projet va accumuler les résultats obtenus sur un réseau de plus de 150 parcelles en Alsace et en Bourgogne. L'objectif est de combler le manque de connaissances sur l'impact de ces modes de production tout en associant les viticulteurs afin de les impliquer dans le référencement des pratiques, l'échantillonnage de leurs sols et la co-interprétation des résultats. Ce type de projet doit amener les viticulteurs à mieux considérer la qualité de leur sol, l'impact de leurs pratiques et la possibilité de changer de mode de production.

En 2018, une initiative similaire a été lancée sur les sols urbains par la constitution d'un groupe de réflexion composé de chercheurs spécialistes de l'écologie du sol mais aussi des sciences participatives. Ce groupe de réflexion, appelé REV-Urbain, a pour objectif d'identifier les partenaires scientifiques et opérationnels pour monter des projets de recherche participative sur la qualité biologique des sols urbains et l'impact de modes d'aménagement. À ce jour, un projet a été soumis pour financement « ANR » en ciblant différentes villes (Montpellier, Angers, Nancy, Paris) et un autre aux « Investissement d'avenir » ciblant l'aire urbaine de Dijon métropole. Ces deux projets doivent améliorer nos connaissances sur l'écologie de sols urbains mais aussi impliquer directement les politiques publiques et les aménageurs urbains pour organiser « la ville autour des sols » et non l'inverse. Ces projets se positionnent dans la dynamique actuelle de tendre vers des villes durables à même de stimuler différents services rendus en ville par les sols (mitigation des îlots de chaleur, augmentation de la biodiversité, amélioration de la qualité de vie…).

# 7. Conclusion

Le sol est un écosystème vivant à part entière, capable d'héberger une grande quantité et diversité d'organismes et de fournir un grand nombre de services à notre société. Parmi ces services, nous pouvons citer la production alimentaire, la dépollution de l'environnement, la mitigation des changements climatiques par le stockage du carbone ou encore la fourniture d'un support stable pour nos constructions. Les connaissances sur la qualité écologique et la biodiversité des sols s'accumulent depuis peu, mais très rapidement. Ceci est dû notamment au développement de nouveaux outils de caractérisation, mais aussi à la mise en place de réseaux d'observation des sols gérés par les institutions publiques ou par la société civile (association, fondation, citoyen…). Ces nouvelles connaissances ont démontré que les sols français, même agricoles, ne sont pas morts. Toutefois, il ne faut pas minimiser pour autant l'impact de certaines pratiques comme l'utilisation intensive de produits chimiques et de mécanisation en agriculture, ou l'artificialisation des sols en zone urbaine. Ces connaissances ont aussi permis de confirmer l'importance du sol et son rôle pivot pour deux transitions sociétales en cours : la transition agroécologique et le développement de ville durable par le retour de la nature en ville. La biodiversité du sol sera le principal atout de l'agriculture de demain, dans une société qui ne veut plus d'intrants chimiques. Au sein des mosaïques urbaines, le sol sera aussi un pivot pour améliorer la qualité de vie en ville en tant que support du verdissement des futurs aménagements urbains. Enfin, la dynamique citoyenne lancée autour de la qualité de sols montre aussi le réel engouement du grand public pour cette matrice, source de vie et de richesses non renouvelables.

Maintenant que la société ne peut plus ignorer l'importance de la qualité des sols dans la durabilité de son avenir et le fait qu'il existe des outils de diagnostic pour évaluer cette qualité, il faut aller au-delà de la production de connaissances. La première étape sera de continuer l'effort de sensibilisation des usagers des sols et des citoyens. Ceci passera par des vecteurs de communication grand public qui doivent être utilisés par le monde de la recherche afin de garantir l'objectivité des connaissances transmises. Il faut aussi aller en amont et développer des programmes d'éducation dès l'école primaire et à tous les niveaux d'éducation. Ceci est un enjeu important car le sol reste encore le grand absent des programmes scolaires… les jeunes générations doivent combler l'absentéisme de leurs ainés sur ce sujet !

La deuxième étape sera de développer des outils juridiques, voire règlementaires pour protéger les sols afin de mieux pouvoir les utiliser. Ces outils passent par l'intégration de la qualité des sols dans les SCOT, PLU et tout autre document ou instance qui gère l'utilisation ou l'occupation des sols. À un autre niveau, il faut aussi développer des lois sur la protection des sols aux échelles nationales voire européennes à l'image de la directive sol qui n'a pas abouti en 2007 au niveau de la Commission européenne. Il faut donc aujourd'hui réaffirmer l'importance du sol à nos instances politiques pour qu'elles le mettent au centre des débats règlementaires à venir. Sans réelle règlementation, la qualité du sol ne sera qu'une mesure incitative dont la prise en compte sera laissée au bon vouloir des usagers des sols.

Enfin, la dernière étape sera de « monétariser » la qualité écologique des sols. Comme démontré dans cet article, il existe aujourd'hui des indicateurs de qualité des sols à même de rendre un diagnostic robuste et objectif. Il n'est pas illogique de penser que cette qualité du sol pourrait être transformée en « une plus-value foncière » lors des échanges, ventes ou location de terre. Le monde des experts fonciers et des notaires réfléchit déjà à la possibilité d'améliorer leurs outils de notations par des caractéristiques environnementales. À terme, un utilisateur ou un propriétaire foncier qui n'a pas altéré, voire qui a amélioré son sol avec son usage, doit pouvoir valoriser son patrimoine écologique synonyme de durabilité de sa production.

Parution : octobre 2019 - Ce document a ete delivre pour le compte de 7200097598 - editions ti // nc AUTEURS // 195.25.183.157

Copyright © - Techniques de l'Ingénieur - Tous droits réservés

Toutes ces perspectives sont ambitieuses mais elles peuvent être finalisées d'ici une dizaine d'années si la recherche, les politiques publiques, les citoyens et toutes les autres parties prenantes se mettent de concert pour aller dans le même sens, sans mettre de blocage culturel ou économique à cette urgence environnementale. N'oublions pas que le sol est une matrice fondamentale dans notre société, vivante, non renouvelable et surtout empruntée aux générations futures.

# 8. Glossaire

**ADN** ; *DNA*

Acide désoxyribonucléique, macromolécule biologique présente dans toutes les cellules ainsi que chez de nombreux virus. L'ADN contient toute l'information génétique, appelée « génome », permettant le développement et le fonctionnement des êtres vivants.

**Anoxie** ; *Anoxia*

Diminution de la quantité de dioxygène ($O_2$) dans le milieu.

**Hydromorphie** ; *Hydromorphy*

Saturation du sol en eau pendant des périodes plus où moins prolongées. Ceci s'accompagne d'une anoxie du milieu qui impacte les organismes du sol et les plantes.

**Phagocytose** ; *Phagocytosis*

Mécanisme par lequel certains organismes unicellulaires (protistes) internalisent des particules étrangères (bactéries, débris cellulaires) pour les digérer.

**Bactéries nitrifiantes** ; *Nitrifying bacteria*

Bactéries impliquées dans la nitrification, c'est-à-dire le processus microbiologique aérobie transformant l'ammonium ($NH_4$) en nitrate en deux étapes appelées respectivement « nitritation » et « nitratation ».

**Génomique** ; *Genomic*

Science très récente étudiant l'ensemble des ADN présents dans une cellule, un organe, un organisme.

**Transcriptomique** ; *Transcriptomic*

Science étudiant l'ensemble des ARN (acide ribonucléique) présents dans une cellule, un organe, un organisme.

**Protéomique** ; *Proteomic*

Science étudiant l'ensemble des protéines présentes dans une cellule, un organe, un organisme.

**Métabolomique** ; *Metabolomic*

Science très récente étudiant l'ensemble des métabolites (sucres, acides aminés, acides gras, etc.) présents dans une cellule, un organe, un organisme. C'est l'équivalent de la génomique pour l'ADN.

**Référentiel** ; *Reference*

Accumulation de grands jeux de données obtenus à partir d'environnements variés, permettant de connaître la gamme de variation d'un indicateur en la valeur de référence pour un environnement donné.

**Fonctionnalité** ; *Functionnality*

Ensemble des activités potentielles portées par un organisme ou une communauté de micro-organismes.



Copyright © - Techniques de l'Ingénieur - Tous droits réservés

Parution : octobre 2019 - Ce document a ete delivre pour le compte de 7200097598 - editions ti // nc AUTEURS // 195.25.183.157

# Qualité écologique des sols

par **Pierre-Alain MARON**
*Directeur de recherche*
*UMR Agro écologie, centre INRA Dijon, France*

et **Lionel RANJARD**
*Directeur de recherche*
*UMR Agro écologie, centre INRA Dijon, France*

## Sources bibliographiques

**[1]** Web of science : http://apps.webofknowledge.com/WOS_GeneralSearch_input.do?product=WOS&search_mode=GeneralSearch&SID=E6eXswEf5X4ibQRj9aw&preferencesSaved= (2019).

**[2]** https://www.gissol.fr/donnees/cartes/les-sols-dominants-de-france-metropolitaine-1491

**[3]** SWIFT (M.J.), HEAL (O.W.) et ANDERSON (J.M.). – *Decomposition in Terrestrial Ecosystems*. Blackwell, Oxford (1979).

**[4]** *Rapport de l'Évaluation française des écosystèmes et des services écosystémiques*. https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/levaluation-francaise-des-ecosystemes-et-des-services-ecosystemiques#e1 (2017).

**[5]** FAO. – http://www.fao.org/soils-2015/fr/ (2015).

**[6]** Millennium Ecosystem Assessment (MEA). – *Four Volumes : Current State and Trends ; Scenarios ; Policy Responses ; Sub-global Assessments*. Washington, D.C. : Island Press (2005).

**[7]** https://www.flickr.com/photos/nojhan/3015423617

**[8]** https://pixnio.com/fr/science-fr/microscopie-images/balayage-micrographie-electronique-burkholderia-cepacia

**[9]** https://pixnio.com/fr/science-fr/microscopie-images/balayage-microscopie-electronique-pseudomonas-aeruginosa-bacteries

**[10]** https://pxhere.com/fr/photo/702784

**[11]** Fichier : CSIRO ScienceImage 2818 Group of Nematodes.jpg.

**[12]** https://fr.wikipedia.org/wiki/Fichier:SEM_image_of_Milnesium_tardigradum_in_active_state_-_journal.pone.0045682.g001-2.png

**[13]** https://pxhere.com/fr/photo/364031

**[14]** https://fr.wikipedia.org/wiki/Fichier:Keratella_cochlearis.jpg

**[15]** https://www.flickr.com/photos/scotnelson/38706032911

**[16]** https://www.flickr.com/photos/philgar/45552475214

**[17]** https://pxhere.com/fr/photo/871978

**[18]** https://www.flickr.com/photos/andybadger/8300785731

**[19]** https://fr.wikipedia.org/wiki/Fichier:Scolopendra_fg01.JPG

**[20]** https://pxhere.com/fr/photo/1384293

**[21]** https://pixnio.com/fr/faune-animaux/escargots-et-limaces/escargot-crustaces-mollusque-gasteropode-invertebre-limace-slime-insecte

**[22]** https://www.flickr.com/photos/_jamez/6059852561

**[23]** https://pxhere.com/fr/photo/803757

**[24]** https://pixabay.com/fr/photos/coléoptère-nature-insectes-fermer-1432943/

**[25]** https://www.flickr.com/photos/patrick_k59/40316043934

**[26]** https://pixabay.com/fr/photos/insecte-fourmi-macro-closeup-3391728/

**[27]** https://commons.wikimedia.org/wiki/File:CSIRO_ScienceImage_2200_A_Curl_Grub_larvae.jpg

**[28]** https://www.gissol.fr/le-gis/programmes/rmqs-34

**[29]** https://ecobiosoil.univ-rennes1.fr/page/protocole-participatif-moutarde

**[30]** Rapport sur l'état des sols en France, GisSol : https://www.gissol.fr/publications/rapport-sur-letat-des-sols-de-france-2-849 (2011).

**[31]** http://indicateurs-biodiversite.naturefrance.fr/fr/indicateurs/evolution-de-la-biomasse-microbienne-des-sols-en-metropole

**[32]** http://indicateurs-biodiversite.naturefrance.fr/fr/indicateurs/evolution-de-la-biodiversite-bacterienne-des-sols

**[33]** http://indicateurs-biodiversite.naturefrance.fr/fr/indicateurs/abondance-des-vers-de-terre

**[34]** http://indicateurs-biodiversite.naturefrance.fr/fr/indicateurs/abondance-des-vers-de-terre

**[35]** http://indicateurs-biodiversite.naturefrance.fr/fr/indicateurs/evolution-de-la-biomasse-microbienne-des-sols-en-metropole

**[36]** ALBERTI (M.). – *Eco-evolutionary dynamics in an urbanizing planet*. Trends in Ecology & Evolution 30, p. 114-26 (2015).

**[37]** WOS (2018).

**[38]** BAIZE (D.) et GIRARD (M.C.) *et al.* – *Référentiel pédologique 2008*. Quae, 6-26 p. Barles, Breysse D, Guillerme A, Leyval C, 1999. Le Sol urbain. Collection Villes, 131. 11. 137. 185. 16 p. (2008).

**[39]** SZLAVECZ (K.), PLACELLA (S.A.), POUYAT (R.V.), GROFFMAN (P.M.), CSUZDI (C.) et YESILONIS (I.). – *Invasive earthworm species and nitrogen cycling in remnant forest patches*. Applied Soil Ecology, 32, p. 54-62 (2006).

**[40]** SMETAK (K.M.), JOHNSON-MAYNARD (J.L.) et LLOYD (J.E.). – *Earthworm population density and diversity in different-aged urban systems*. Applied Soil Ecology, 37, p. 161-168 (2007).

**[41]** AMOSSÉ (J.), DÓZSA-FARKAS (K.), BOROS (G.), ROCHAT (G.), SANDOZ (G.), FOURNIER (B.) et LE BAYON (R.C.) *et al.* – *Patterns of earthworm, enchytraeid and nematode diversity and community structure in urban soils of different ages*. European Journal of Soil Biology 73, p. 46-58 (2016).

**[42]** VERGNES (A.), BLOUIN (M.), MURATET (A.), LERCH (T.Z.), MENDEZ-MILLAN (M.), ROUELLE-CASTREC (M.) et DUBS (F.). – *Initial conditions during technosol implementation shape earthworms and ants diversity*. Landscape and Urban Planning, 159, p. 32-41 (2017).

**[43]** VAN NULAND (M.E.) et WHITLOW (W.L.). – *Temporal effects on biodiversity and composition of arthropod communities along an ur-*

Copyright © - Techniques de l'Ingénieur - Tous droits réservés



Parution : octobre 2019 - Ce document a ete delivre pour le compte de 7200097598 - editions ti // nc AUTEURS // 195.25.183.157

*ban-rural gradient*. Urban Ecosystems, 17, p. 1047-1060 (2014).

**[44]** VERGNES (A.), PELLISSIER (V.), LEMPERIERE (G.), ROLLARD (C.) et CLERGEAU (P.). – *Urban densification causes the decline of ground dwelling arthropods*. Biodiversity and Conservation, 23, p. 1859-1877 (2014).

**[45]** MACLVOR (J.S.) et LUNDHOLM (J.). – *Insect species composition and diversity on intensive green roofs and adjacent level-ground habitats*. Urban Ecosystems, 14, p. 225-241 (2011).

**[46]** JOIMEL (S.), SCHWARTZ (C.), HEDDE (M.), KIYOTA (S.), KROGH (P.H.), NAHMANI (J.) et CORTET (J.). – *Urban and industrial land uses have a higher soil biological quality than expected from physicochemical quality*. Science of the Total Environment, 584, p. 614-621 (2017).

**[47]** RZESZOWSKI (K.) et STERZYŃSKA (M.). – *Changes through time in soil Collembola communities exposed to urbanization*. Urban Ecosystems, 19, p. 143-158 (2016).

**[48]** SHARMA (K.), CHENG (Z.) et GREWAL (P.S.). – *Relationship between soil heavy metal contamination and soil food web health in vacant lots slated for urban agriculture in two post-industrial cities*. Urban Ecosystems, 18, p. 835-855 (2015).

**[49]** RAMIREZ (K.S.), LEFF (J.W.), BARBERÁN (A.), BATES (S.T.), BETLEY (J.), CROWTHER (T.W.), KELLY (E.F.), OLDFIELD (E.E.), SHAW (E.A.), STEENBOCK (C.), BRADFORD (M.A.), WALL (D.H.) et FIERER (N.). – *Biogeographic patterns in below-ground diversity in New York City's Central Park are similar to those observed globally*. Proc Biol Sci., 281, 1795. pii:20141988. doi:10.1098/rspb.2014.1988 (2014).

**[50]** XU (H.J.), LI (S.), SU (J.Q.), NIE (S.), GIBSON (V.), LI (H.) et ZHU (Y.G.). – *Does urbanization shape bacterial community composition in urban park soils ?* A case study in 16 representative Chinese cities based on the pyrosequencing method. FEMS Microbiology Ecology, 87, p. 182-92 (2014).

**[51]** GILL (A.S.), LEE (A.) et MCGUIRE (K.L.). – *Phylogenetic and Functional Diversity of Total (DNA) and Expressed (RNA) Bacterial Communities in Urban Green Infrastructure Bioswale Soils*. Appl. Environ. Microbiol., 83, e00287-17 (2017).

**[52]** MCGUIRE (K.L.), PAYNE (S.G.), PALMER (M. I.), GILLIKIN (C.M.), KEEFE (D.), KIM (S.J.), GEDALLOVICH (S.M.), DISCENZA (J.), RANGAMANNAR (R.), KOSHNER (J.A.), MASSMANN (A.L.), ORAZI (G.), ESSENE (A.), LEFF (J.W.) et FIERER (N.). – *Digging the New York City Skyline : soil fungal communities in green roofs and city parks*. PLoS One. 8(3) : e58020 (2013).

**[53]** CANNAVACCIULO (M.), CASSAGNE (N.) et RIOU (V.) *et al.* – *Validation d'un tableau de bord d'indicateurs sur un réseau national de fermes en grande culture et en viticulture pour diagnostiquer la qualité biologique des sols agricoles*. Innovations Agronomiques 55, p. 41-54 (2017).

**[54]** GARDI (C.), MONTANARELLA (L.), ARROUAYS (D.), BISPO (A.), LEMANCEAU (P.), MULDER (C.), RANJARD (L.), ROMBKE (L.), RUTGER (M.) et MENTA (C.). – *Soil Biodiversity monitoring in Europe : ongoing activities and challenges*. European Journal of Soil Science 60, p. 807-819 (2009).

**[55]** MARON (P.A.), MOUGEL (C.) et RANJARD (L.). – *Soil microbial diversity : spatial overview, driving factors and functional interest*. CRAS Biology II. 334, p. 403-411 (2011).

**[56]** LEMANCEAU (P.), MARON (P.A.), MOUGEL (C.), PHILIPPOT (L.), PIVATO (B.), PLASSART (P.), RANJARD (L.), REVELLIN (C.), TARDY (V.) et WIPF (D.). – *Understanding and managing soil biodiversity : a major challenge in agroecology*. Agronomy for Sustainable Development 35, p. 67-81 (2015).

**[57]** BOUCHEZ (T.), BLIEUX (A.L.), DEQUIEDT, DOMAIZON (I.), DUFRESNE (A.), FERREIRA (S.), GODON (J.J.), HELLAL (J.), JOULIAN (C.), QUAISER (A.), MARTIN-LAURENT (F.), MAUFFRET (A.), MONIER (J.M.), PEYRET (P.), SCHMITT-KOPLIN (P.), SIBOURG (O.), D'OIRON (E.), BISPO (A.), DEPORTES (I.), GRAND (C.), CUNY (P.), MARON (P.A.) et RANJARD (L.). – *La microbiologie moléculaire au service du diagnostic environnemental*. Étude et gestion des Sols, 24, p. 9-31.

**[58]** KARIMI (B.), MARON (P.A.), CHEMIDLIN PRÉVOST BOURÉ (N.), BERNARD (N.), GILBERT (D.) et RANJARD* (L.). – *Microbial diversity and ecological networks as indicators of environmental quality*. Environ Chemistry Letters, 15, p. 265-281 (2017).

**[59]** GUILLAND (C.), MARON (P.A.), DAMAS (O.) et RANJARD (L.). – *La biodiversité des sols urbains au service des villes durables*. Étude et gestion des Sols, 25, p. 59-77 (2018).

### Livres

GOBAT (J.M.), ARAGNO (M.) et MATTHEY (W.). – *Le sol vivant*. Presses polytechniques et universitaires Romandes (2010).

CUNY (P.), MARON (P.A.) et RANJARD (L.). – *La microbiologie moléculaire au service du diagnostic environnementale*. Éditions ADEME Expertise (2017).

KARIMI (B.), TERRAT (S.), DEQUIEDT (S.), CHEMIDLIN (N.), MARON (P.A.) et RANJARD (L.). – *Atlas Français des bactéries du sol*. Éditions Biotope et du Muséum (2018).

## Sites Internet

https://ecobiosoil.univ-rennes1.fr/OPVT_accueil.php

https://www.elisol.fr

https://www.ofsv.org

http://indicateurs-biodiversite.naturefrance.fr/fr

https://www.mnhn.fr/fr/participez/contribuez-sciences-participatives/observatoires-vigie-nature

http://ephytia.inra.fr/fr/P/165/jardibiodiv

https://www.ipbes.net/news/Media-Release-Global-Assessment-Fr

## Événements

http://www.fao.org/global-soil-partnership/resources/highlights/detail/fr/c/1183872/



Copyright © - Techniques de l'Ingénieur - Tous droits réservés

POUR EN SAVOIR PLUS

Parution : octobre 2019 - Ce document a été délivré pour le compte de 7200097598 - editions ti // nc AUTEURS // 193.45.183.157

TECHNIQUES DE L'INGÉNIEUR

# GAGNEZ DU TEMPS ET SÉCURISEZ VOS PROJETS EN UTILISANT UNE SOURCE ACTUALISÉE ET FIABLE

Techniques de l'Ingénieur propose la plus importante collection documentaire technique et scientifique en français !

Grâce à vos droits d'accès, retrouvez l'ensemble des **articles et fiches pratiques de votre offre, leurs compléments et mises à jour,** et bénéficiez des **services inclus.**

RÉDIGÉE ET VALIDÉE PAR DES EXPERTS

MISE À JOUR PERMANENTE

100 % COMPATIBLE SUR TOUS SUPPORTS NUMÉRIQUES

SERVICES INCLUS DANS CHAQUE OFFRE

- **+ de 350 000 utilisateurs**
- **+ de 10 000 articles de référence**
- **+ de 80 offres**
- **15 domaines d'expertise**

- **Automatique - Robotique**
- **Biomédical - Pharma**
- **Construction et travaux publics**
- **Électronique - Photonique**
- **Énergies**
- **Environnement - Sécurité**
- **Génie industriel**
- **Ingénierie des transports**
- **Innovation**
- **Matériaux**
- **Mécanique**
- **Mesures - Analyses**
- **Procédés chimie - Bio - Agro**
- **Sciences fondamentales**
- **Technologies de l'information**

**Pour des offres toujours plus adaptées à votre métier, découvrez les offres dédiées à votre secteur d'activité**

Depuis plus de 70 ans, Techniques de l'Ingénieur est la source d'informations de référence des bureaux d'études, de la R&D et de l'innovation.

**www.techniques-ingenieur.fr**

**CONTACT :** Tél. : + 33 (0)1 53 35 20 20 - Fax : +33 (0)1 53 26 79 18 - E-mail : infos.clients@teching.com

TECHNIQUES DE L'INGÉNIEUR

# LES AVANTAGES ET SERVICES
## compris dans les offres Techniques de l'Ingénieur

### ACCÈS

**Accès illimité aux articles en HTML**
Enrichis et mis à jour pendant toute la durée de la souscription

**Téléchargement des articles au format PDF**
Pour un usage en toute liberté

**Consultation sur tous les supports numériques**
Des contenus optimisés pour ordinateurs, tablettes et mobiles

### SERVICES ET OUTILS PRATIQUES

**Questions aux experts***
Les meilleurs experts techniques et scientifiques vous répondent

**Articles Découverte**
La possibilité de consulter des articles en dehors de votre offre

**Dictionnaire technique multilingue**
45 000 termes en français, anglais, espagnol et allemand

**Archives**
Technologies anciennes et versions antérieures des articles

**Impression à la demande**
Commandez les éditions papier de vos ressources documentaires

**Alertes actualisations**
Recevez par email toutes les nouveautés de vos ressources documentaires

*Questions aux experts est un service réservé aux entreprises, non proposé dans les offres écoles, universités ou pour tout autre organisme de formation.

# ILS NOUS FONT CONFIANCE

AgroParisTech, AIRBUS, cea, CESI, cnes, CSTB, ENGIE, GE, L'ORÉAL, Leroy-Somer, École Polytechnique, SAFRAN, Sagemcom, SAINT-GOBAIN, Schneider Electric, THALES, TOTAL, Valeo, VEOLIA, Wallonie, SPW

**www.techniques-ingenieur.fr**

**CONTACT :** Tél. : + 33 (0)1 53 35 20 20 - Fax : +33 (0)1 53 26 79 18 - E-mail : infos.clients@teching.com