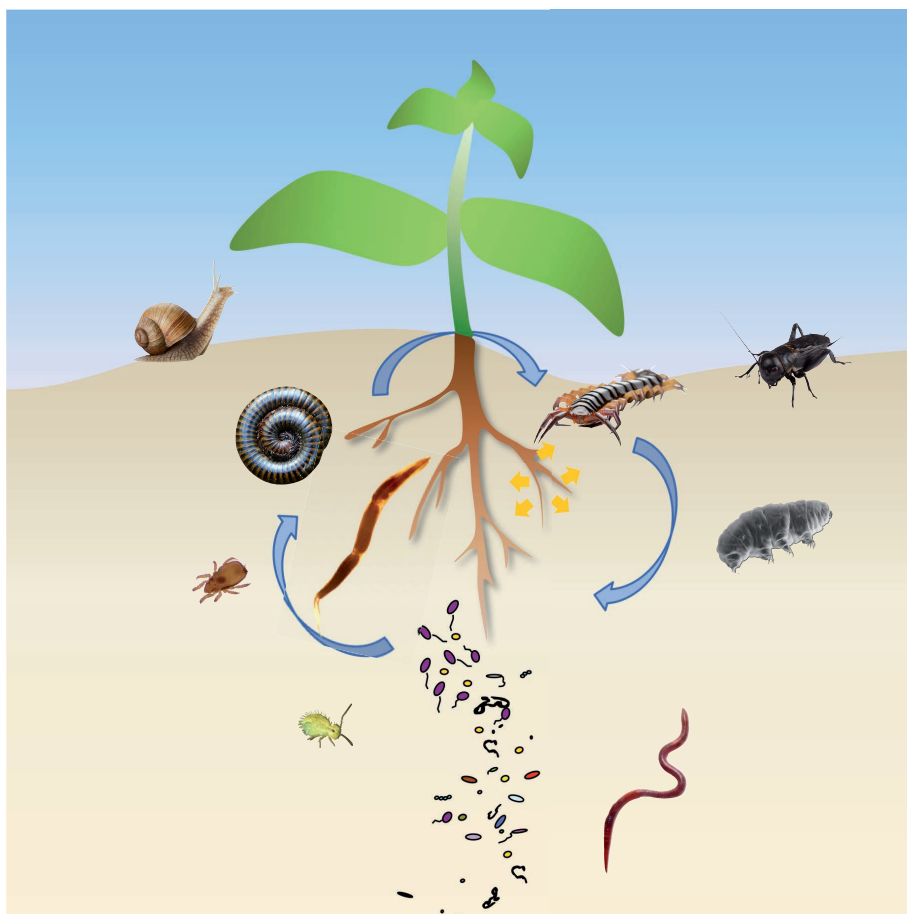


# Les sols et la vie souterraine

## Des enjeux majeurs en agroécologie

Jean-François Briat, Dominique Job, coordinateurs





# Les sols et la vie souterraine

## Des enjeux majeurs en agroécologie

Jean-François Briat, Dominique Job, coordinateurs

Éditions Quæ  
RD 10, 78026 Versailles Cedex

## Collection Synthèses

### *Transformations agricoles et agroalimentaires*

Entre écologie et capitalisme

G. Allaire, B. Daviron

2017, 432 pages

### *Architecture et croissance des plantes*

Modélisation et applications

P. de Reffye, M. Jaeger, D. Barthélémy, F. Houllier

2016, E-pub

### *La Loire fluviale et estuarienne*

Un milieu en évolution

F. Moatar, N. Dupont

2016, 320 pages

### *Anatomie du bois*

Formation, fonctions et identification

Marie-Christine Trouy

2015, 184 pages

### *Restaurer la nature pour atténuer les impacts du développement*

Analyse des mesures compensatoires pour la biodiversité

H. Levrel, N. Frascaria-Lacoste, J. Hay, G. Martin, S. Pioch

2015, 320 pages

Éditions Quæ

RD 10

78026 Versailles cedex, France

[www.quae.com](http://www.quae.com)

© Éditions Quæ, 2017

e-ISBN : 978-2-7592-2652-8

ISSN : 1777-4624

Le code de la propriété intellectuelle interdit la photocopie à usage collectif sans autorisation des ayants droit. Le non-respect de cette disposition met en danger l'édition, notamment scientifique, et est sanctionné pénalement. Toute reproduction, même partielle, du présent ouvrage est interdite sans autorisation du Centre français d'exploitation du droit de copie (CFC), 20 rue des Grands-Augustins, Paris 6<sup>e</sup>.



*À la mémoire de Suzanne Mériaux*

Suzanne Mériaux, directrice de recherche honoraire à l'Inra, membre de l'Académie d'agriculture de France, nous a quittés récemment (septembre 2016). Elle était une spécialiste reconnue en géologie, et ses premiers travaux furent consacrés à la structure des sols et à ses relations avec l'eau.

# Sommaire

---

<b>Remerciements</b> .....	7
<b>Préface</b> .....	9
<b>Introduction</b> .....	11
<b>Chapitre 1. Le sol habitat : environnement physicochimique et conditions de développement des différents organismes présents dans le sol</b> .....	17
Le sol, genèse et évolution : création d'un habitat .....	17
Implications au plan physicochimique .....	18
La structure du sol, habitat pour les êtres vivants .....	21
Conclusion .....	26
<b>Chapitre 2. Localisation des matières organiques et des activités microbiennes : conséquences pour le fonctionnement du sol</b> .....	29
Biodégradation des matières organiques : de multiples facteurs .....	30
Les processus à l'échelle microscopique affectent les flux à une échelle macroscopique, voire globale .....	36
Conclusion .....	37
<b>Chapitre 3. Couplages et contrôles des cycles du carbone et de l'azote par les communautés microbiennes dans les sols cultivés</b> .....	43
Les mécanismes mis en jeu .....	44
Quelles options envisager pour l'évolution des systèmes cultivés ? .....	56
Conclusion .....	59
<b>Chapitre 4. La richesse des communautés microbiennes des sols, un trésor inestimable..</b>	65
Les sols, réacteurs bio-physicochimiques .....	65
Les sols, réservoirs de microorganismes aux activités multiples .....	67
Les microorganismes des sols, clés des recyclages biogéochimiques, agents de fonctions essentielles des sols .....	70
Les sols abritent des systèmes biologiques hautement régulés .....	71
Les sols, habitats de biosystèmes adaptés .....	72
Pourquoi nos connaissances des communautés microbiennes et des conditions de leur activité sont-elles encore si réduites ? .....	73
Les connaissances à développer pour mieux valoriser les organismes du sol et leur potentiel génétique .....	75
Conclusion .....	76

<b>Chapitre 5. Modélisation de la croissance des cultures considérant l'hétérogénéité physique et spatiale du sol.....</b>	<b>81</b>
Expérimentations au champ.....	82
Modélisation couplant sols-végétation-atmosphère.....	82
Conclusion.....	85
<b>Chapitre 6. Impact des invertébrés sur les fonctions des sols et leurs applications dans les systèmes sol-plante.....</b>	<b>89</b>
Les sols, milieux vivants.....	89
Implications de la faune du sol pour la production primaire.....	94
Piloter la biodiversité des sols?.....	115
<b>Chapitre 7. Les relations trophiques microfaune-bactéries rhizosphériques-mycorhizes : quel rôle dans le recyclage des nutriments (N et P)?.....</b>	<b>133</b>
La plante et son environnement biologique dans le sol.....	133
Le cycle de l'azote et effet des composants biologiques sur la nutrition azotée des plantes.....	140
Cycle du phosphore et effet des composants biologiques sur la nutrition phosphatée des plantes.....	146
Conclusion.....	150
<b>Chapitre 8. Effets en surface avec impacts sous surface : réponse de la rhizosphère d'arbres forestiers à une exposition élevée à l'ozone troposphérique.....</b>	<b>155</b>
Effets de l'O <sub>3</sub> dans le sol.....	158
Interactions O <sub>3</sub> /sécheresse.....	160
Modèle expliquant les effets sols de l'O <sub>3</sub> .....	161
Nouvelles connaissances sur la réaction de l'arbre adulte à l'O <sub>3</sub> .....	164
Signification écologique et conclusions.....	166
<b>Chapitre 9. Mise en place d'outils et de bio-indicateurs pertinents de la qualité des sols.....</b>	<b>175</b>
Un intérêt croissant pour les sols et leur composante biologique.....	176
Des outils classiques complétés par de nouvelles approches.....	177
Construction de référentiels d'interprétation.....	184
De l'indicateur à la fonction et aux services écosystémiques potentiels.....	192
Acceptabilité et compréhension des bio-indicateurs.....	195
Sélection d'indicateurs pertinents pour évaluer la qualité des sols.....	200
Conclusion.....	202
<b>Chapitre 10. Compréhension et valorisation des interactions entre plantes et microorganismes telluriques : des enjeux majeurs en agroécologie.....</b>	<b>207</b>
Des progrès majeurs dans les stratégies et les méthodes d'analyse de la biodiversité tellurique et des interactions plantes-microorganismes.....	208
Recrutement du microbiote rhizosphérique par la plante hôte.....	211
Des interactions à bénéfiques réciproques.....	212
Les interactions plantes-microorganismes dans les agroécosystèmes.....	215
Conclusions et perspectives.....	217

<b>Chapitre 11. Les associations mycorhiziennes dans les sols : pour une meilleure maîtrise de la production végétale</b> .....	223
La symbiose mycorhizienne .....	224
La valorisation de la symbiose mycorhizienne en agriculture.....	227
Conclusion.....	231
<b>Chapitre 12. Mécanismes cellulaires et moléculaires et ingénierie écologique des mycorhizes à arbuscules</b> .....	237
Introduction : mycorhizes à arbuscules et services écosystémiques.....	237
Mécanismes sous-jacents aux échanges de nutriments dans la mycorhize à arbuscules.....	238
Régulation des protéines de transport impliquées dans les échanges trophiques de la mycorhize à arbuscules.....	247
Réseaux mycéliens communs .....	249
Ingénierie écologique des mycorhizes à arbuscules.....	251
Conclusion.....	252
<b>Chapitre 13. Orienter les communautés et populations microbiennes telluriques via l'utilisation de plantes à exsudation modifiée</b> .....	255
La rhizosphère, lieu privilégié d'échanges entre microorganismes et végétaux.....	256
Orienter les populations et les communautés microbiennes de la rhizosphère .....	256
Vers une nouvelle vision des interactions entre plantes et microorganismes associés...	265
<b>Chapitre 14. Orienter les communautés et les populations microbiennes telluriques via l'utilisation de biostimulants perturbant la communication moléculaire bactérienne</b> ...	271
La lutte biologique utilisant les microorganismes du sol.....	271
De l'intérêt d'être à l'écoute des communications microbiennes.....	274
Comment perturber la communication des bactéries pathogènes ?.....	275
Biostimulation de la dégradation des signaux de <i>quorum sensing</i> .....	276
Un agent bactérien capable d'une dégradation efficiente des signaux de <i>quorum sensing</i> .....	277
Transfert d'échelle et application en sols.....	279
Perspectives .....	281
<b>Chapitre 15. Défis et perspectives pour l'utilisation de la fixation biologique de l'azote en agriculture</b> .....	285
L'addiction de l'agriculture à l'azote .....	285
La fixation symbiotique de l'azote, pierre angulaire d'une future agriculture durable...	287
Utilisation d'endophytes diazotrophes comme bio-inoculant.....	288
La production de la nitrogénase dans des organites végétaux : les « nitroplastés »...	290
L'organogénèse de nodosités chez des plantes de grande culture .....	292
Conclusion.....	299
<b>Chapitre 16. Communication entre les partenaires dans la symbiose mycorhizienne à arbuscules</b> .....	305
Les strigolactones : des molécules de signalisation aux multiples fonctions.....	306
Émission de strigolactones et de Myc-LCO : monologues ou dialogue ?.....	314
Conclusions et perspectives.....	315
<b>Liste des auteurs</b> .....	322



# Remerciements

---

Nous tenons à adresser nos plus vifs remerciements à l'Académie d'agriculture de France pour son soutien constant lors de l'organisation, en 2015, de deux colloques sur les sols et leur biologie associée. Ces deux colloques ont été à la base de cet ouvrage. Que soient particulièrement remerciés ici Gérard Tendron, secrétaire perpétuel, Patrick Olivier, trésorier perpétuel, et Daniel Tessier, secrétaire de la section « Interactions milieux-êtres vivants » de l'Académie.

Il nous est également agréable de remercier les membres du comité éditorial, Jacques Berthelin, Philippe Lemanceau et Jean Charles Munch, pour leur aide au démarrage de ce projet.

Ce projet aurait été impossible sans le soutien financier de plusieurs organismes : les départements de recherche Biologie et amélioration des plantes (BAP), Environnement et agronomie (EA), Écologie des forêts, prairies et milieux aquatiques (EFPA) de l'Institut national de la recherche agronomique (Inra), le Laboratoire des symbioses tropicales et méditerranéennes (LSTM, Unité mixte de recherche IRD, Cirad, Inra, Montpellier SupAgro, Université Montpellier) et de généreux donateurs anonymes.

Nous adressons nos remerciements les plus chaleureux aux intervenants des colloques de 2015 sur les sols et leur biologie associée organisés par l'Académie. Nous sommes particulièrement reconnaissants envers Pierre PAGESSE, agriculteur et président du GNIS, pour la force de ses conclusions lors de ces manifestations et son soutien sans faille à la recherche scientifique concourant au développement et au succès de l'agroécologie.

Enfin, nous exprimons notre gratitude aux auteurs des différents chapitres de ce livre qui permettent de consolider les bases scientifiques de l'agroécologie et de témoigner du dynamisme de la communauté scientifique dans ce domaine.

Jean-François Briat  
Académie d'agriculture de France

Dominique Job  
Académie d'agriculture de France



# Préface

---

Gérard Tendron

Les sols sont les milieux naturels qui hébergent la plus grande densité et la plus grande diversité microbienne connues, et une faune d'une grande richesse. Ils renferment ainsi une quantité gigantesque de microorganismes, de l'ordre d'un milliard par gramme de sol.

Compte tenu de l'importance des sols en agriculture, l'Académie d'agriculture de France a inscrit cette problématique dans son programme de travail de 2015 et a organisé ou soutenu plusieurs actions sur ce thème qui se sont inscrites dans le cadre de l'année internationale des sols. Parmi ces actions, un premier colloque, intitulé «Utilisation du potentiel biologique des sols, un atout pour la production agricole», s'est déroulé au ministère de l'Agriculture le 24 juin 2015, portant sur les propriétés physicochimiques des sols, en lien avec la culture des plantes. Un deuxième colloque, qui s'est déroulé le 5 novembre 2015 à l'Académie, a porté sur des aspects biologiques et plus précisément sur les « Interactions plantes-organismes telluriques au service de l'agroécologie ».

Ces colloques, proposés par les sections « Interactions milieux-êtres vivants » et « Sciences de la vie » de l'Académie, ont eu pour ambition de présenter et de discuter les avancées récentes dans les connaissances des sols et des interactions entre plantes et organismes telluriques s'y établissant. Elles concernent par exemple la caractérisation globale des microorganismes des sols à l'échelle de la France par des approches de métagénomique permettant la mise en évidence des populations microbiennes en fonction des conditions environnementales ou des types de cultures. Elles concernent également des travaux de génétique moléculaire montrant que des exsudats racinaires sont capables de sculpter le microbiote racinaire, inhibant ou activant la croissance de populations microbiennes spécifiques. Elles concernent enfin les travaux de caractérisation physicochimique des sols, permettant de comprendre comment certaines parties du sol servent d'habitat privilégié pour la vie souterraine et, en corollaire, comment cette vie souterraine crée de nouveaux espaces qui seront colonisés par les organismes telluriques. De telles

avancées scientifiques ouvrent de nouvelles voies pour orienter les interactions plantes-microorganismes afin de promouvoir les effets bénéfiques du microbiote de la rhizosphère sur la plante dans des systèmes de culture plus durables et plus économes en intrants de synthèse, engrais et pesticides notamment.

Ces deux colloques ont donné lieu à une vingtaine de conférences où sont intervenus des microbiologistes, des biologistes, des chimistes, des physiciens et des modélisateurs, qui ont insisté sur l'impérieuse nécessité de développer une véritable interdisciplinarité et pluridisciplinarité dans le domaine des sols et de leur biologie. Ils ont rencontré un vif succès, suscitant de nombreux échanges avec le public, et ont permis de discuter le potentiel des recherches actuelles pour le développement de l'agroécologie.

L'agroécologie peut apparaître à certains comme un type d'agriculture replié sur le passé, en réaction ou en opposition avec les problèmes engendrés par l'agriculture intensive pratiquée aujourd'hui. Il nous est apparu crucial de montrer lors de ces journées que l'agroécologie est une discipline scientifique émergente et prometteuse dont les enseignements permettront, sur des bases nouvelles, l'amélioration des plantes et des pratiques culturales dans le cadre d'une agriculture durable, au bénéfice des agriculteurs, et dans le respect de l'environnement et de la qualité alimentaire des produits végétaux.

Il avait été convenu qu'un livre réunissant les communications faites lors des colloques des 24 juin et 5 novembre 2015 serait publié avec l'aval de l'Académie d'agriculture de France. Le présent ouvrage, intitulé *Les sols et la vie souterraine : des enjeux majeurs en agroécologie*, est le résultat de ces efforts.

Je remercie les auteurs de ces communications et je félicite les coordonnateurs de cet ouvrage, Jean-François Briat et Dominique Job, pour avoir mené à bien ce projet, qui devrait intéresser de nombreux lecteurs.

Gérard Tendron

Secrétaire perpétuel de l'Académie d'agriculture de France

# Introduction

---

Philippe Lemanceau, Dominique Job, Jean-François Briat

Les sols représentent une des trois composantes de notre environnement avec l'air et l'eau qui constituent un continuum, la qualité de l'une impactant l'autre. Les sols sont essentiels pour l'humanité car ils fournissent une série de services écosystémiques au rang desquels la production primaire (service d'approvisionnement), dont la production agricole et sylvicole, mais également des services de régulation (régulation du climat, des régimes hydriques) et des services de soutien aux conditions favorables à la vie sur Terre (habitat, biodiversité). Ces services reposent sur le fonctionnement biologique des sols assuré par la myriade d'organismes, microbiens, végétaux, animaux, qui les habitent et représentent un réservoir unique de biodiversité. Les sols sont en particulier au cœur de la production agricole. Cependant, les surfaces qui lui sont consacrées diminuent régulièrement alors que, dans le même temps, la population mondiale continue de croître, de telle sorte que la surface agricole par habitant est passée de 0,38 ha en 1970 à 0,23 ha en 2000 et qu'une projection prévoit une surface de 0,15 ha par habitant en 2050 (FAO et ITPS, 2015). Les sols sont en effet soumis à des pressions (urbanisation, désertification, érosion) associées en grande partie aux activités humaines. Outre les sols, les ressources utilisées en agriculture intensive soit diminuent (énergie fossile, phosphates d'origine minière), soit suivent des régimes très irréguliers du fait du changement global (eau). L'agriculture est effectivement soumise au changement global, climatique en particulier, conduisant à une irrégularité des rendements avec, en illustration, la réduction dramatique des rendements du blé en France en 2016. Au regard de ce bilan, la gestion actuelle des sols n'apparaît pas durable. Ce constat a d'ailleurs conduit la Commission européenne à développer une stratégie

de gestion durable des sols<sup>1</sup> et la FAO à publier récemment un rapport sur l'état des sols (FAO et ITPS, 2015).

La gestion durable des sols vise à préserver ce patrimoine essentiel pour l'humanité qui n'est pas renouvelable à notre échelle de temps. Cette gestion est au cœur des systèmes agroécologiques qui visent à mieux valoriser la biodiversité et les interactions biotiques afin de réduire l'utilisation d'intrants de synthèse et de préserver les ressources (eau, sol, biodiversité). De ce point de vue, il est intéressant de remarquer qu'un même groupe de travail est dédié à la fois à l'agroécologie et aux sols au sein de l'Alliance nationale de recherche pour l'environnement (AllEnvi<sup>2</sup>), et de constater que le premier des «30 projets pour une agriculture compétitive & respectueuse de l'environnement» proposés par Bournigal *et al.* (2015) s'intitule «Développer les recherches sur la biologie des sols» et est positionné au sein du thème «Agroécologie». Les recherches correspondantes visent à développer des indicateurs biologiques permettant d'établir un diagnostic de l'état des sols soumis à différents types de gestion (Lemanceau *et al.*, 2015b). Ces recherches bénéficient des progrès majeurs enregistrés dans l'analyse de la biodiversité tellurique, en particulier microbienne, à l'aide d'outils moléculaires basés sur l'extraction d'ADN du sol et l'analyse de son polymorphisme (Orgiazzi *et al.*, 2015). Au-delà du diagnostic, ces recherches visent à identifier les pratiques agricoles qui permettent d'orienter la biodiversité et le fonctionnement biologique afin d'atteindre la triple performance sociale, économique et écologique de l'agriculture inscrite dans la loi d'Avenir pour l'agriculture, l'alimentation et la forêt<sup>3</sup>.

La vie des sols est intimement associée aux propriétés physicochimiques des sols dans lesquels les microorganismes, les végétaux et les animaux évoluent. Ainsi, les études de biogéographie s'accordent toutes à montrer que ces propriétés représentent les principaux filtres de la biodiversité; le mode d'usage des sols (en particulier le couvert végétal) venant en deuxième rang et s'exprimant lorsque l'on considère un même sol (Thomson *et al.*, 2015). Ce constat est peu surprenant si l'on considère la longue coévolution des organismes vivants et leur environnement tellurique qu'ils ont façonné, en interaction avec les plantes, le faisant passer de l'état de rocs à celui de sol favorable à leur développement.

Une meilleure connaissance des propriétés biotiques et abiotiques des sols et de leurs interactions est essentielle pour le développement de pratiques agroécologiques qui ont pour vocation à la fois de délivrer des produits agricoles de qualité en quantité suffisante et des services environnementaux. Ainsi, la biodiversité et les activités telluriques sont centrales dans le déroulement des cycles géochimiques, en particulier carbone, azote et eau, et conditionnent le fonctionnement des écosystèmes. Une part majeure du carbone organique de la biosphère est stockée dans les sols au niveau mondial (de l'ordre de 1 500 milliards de tonnes, soit environ deux fois plus que dans l'atmosphère et trois fois plus que dans la végétation terrestre; Arrouays *et al.*, 2003). C'est dans ce contexte que l'initiative 4p1000 lancée par

---

1. [http://ec.europa.eu/environment/soil/three\\_en.htm](http://ec.europa.eu/environment/soil/three_en.htm) (consulté le 30 décembre 2016).

2. <http://www.allenvi.fr/thematiques/agroecologie-et-sol/enjeux> (consulté le 30 décembre 2016).

3. [www.gouvernement.fr/.../la-loi-d-avenir-pour-l-agriculture-l-alimentation-et-la-foret](http://www.gouvernement.fr/.../la-loi-d-avenir-pour-l-agriculture-l-alimentation-et-la-foret) (consulté le 30 décembre 2016).

le ministère de l'Agriculture, largement reprise au niveau européen, se fixe pour objectif d'augmenter de 4 pour 1000 la teneur en matière organique des sols avec pour ambition de stopper l'élévation de la teneur en CO<sub>2</sub> de l'atmosphère<sup>4</sup>. Selon le fonctionnement biologique des sols, l'équilibre entre stockage de matières organiques, provenant de la végétation, et minéralisation impacte respectivement le niveau d'émission de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>), gaz à effet de serre, et la libération d'éléments minéraux, en particulier d'azote, nécessaires à la nutrition de la plante.

L'enjeu en agroécologie est de trouver le bon compromis entre stockage et minéralisation de la matière organique afin que les émissions de CO<sub>2</sub> qui en résultent soient contrebalancées par la valorisation des éléments nutritifs libérés pour la nutrition de la plante. Ceci requiert une bonne adéquation entre minéralisation et développement de la plante afin d'éviter que les éléments nutritifs, l'azote en particulier, ne soient perdus et conduisent à l'émission de gaz à effet de serre comme le protoxyde d'azote (N<sub>2</sub>O), ainsi qu'au lessivage de nitrates vers la nappe phréatique. Selon leurs propriétés et leur fonctionnement biologique, les sols peuvent en effet représenter une source ou un puits du puissant gaz à effet de serre qu'est le N<sub>2</sub>O (Jones *et al.*, 2014). Au total, les cycles du carbone et de l'azote sont étroitement couplés et contrôlés par les activités biologiques des sols qui sont elles-mêmes directement influencées par les propriétés des sols et les pratiques agricoles. De même, la régulation des régimes hydriques (sécheresse/inondation), qui représente un enjeu majeur en agriculture, est étroitement liée à la structure des sols, elle-même influencée par les organismes telluriques et ses ingénieurs tels les vers de terre. La qualité de cette eau est de plus impactée par l'efficacité du sol comme filtre qui dépend de la vitesse de percolation, associée aux propriétés physicochimiques, et des activités biologiques conduisant à la dégradation de composés xénobiotiques. Les systèmes agroécologiques visent à proposer des pratiques (travail du sol, couvert du sol, date de semis, etc.) qui intègrent à fois les cycles de végétation et le fonctionnement biologique des sols afin de gérer au mieux les antagonismes possibles entre services écosystémiques. Il s'agit d'un changement de paradigme qui requiert une approche systémique et intègre à la fois des enjeux agronomiques et environnementaux.

Les organismes associés aux sols ont non seulement évolué avec leur environnement abiotique, mais également avec les plantes. Cette longue coévolution remonte à 400 millions d'années avec les premières preuves fossiles d'association entre plantes et champignons (Redecker *et al.*, 2000). Les microorganismes ont contribué à la colonisation du milieu terrestre par les premiers végétaux et contribuent depuis à leur adaptation à des conditions peu fertiles en promouvant leur nutrition et leur santé. L'importance des symbioses bactériennes fixatrices d'azote atmosphérique chez les légumineuses et des symbioses mycorhiziennes sont bien connues pour leur rôle dans la nutrition en azote et en phosphore. Mais on ne réalise que depuis peu le rôle central du microbiote associé aux racines qui, à l'image de celui associé au tube digestif de l'homme, est considéré comme vital (Mendes et Raaijmakers, 2015). L'association entre la plante et ce microbiote, qui paraît être spécifique à l'hôte, est même maintenant considérée comme un superorganisme appelé holobionte (Vandenkoornhuyse *et al.*, 2015), les fonctions essentielles pour cet holobionte étant

4. [http://agriculture.gouv.fr/sites/minagri/files/4pour1000\\_fr\\_nov2015.pdf](http://agriculture.gouv.fr/sites/minagri/files/4pour1000_fr_nov2015.pdf) (consulté le 30 décembre 2016).

codées soit par des gènes végétaux, soit par des gènes microbiens. On comprend alors mieux l'enjeu que représente en agriculture la meilleure connaissance des fonctions microbiennes favorables, ainsi que celle des traits végétaux et microbiens impliqués dans cette association bénéfique.

L'Organisation des Nations unies a souhaité rappeler l'importance des sols pour l'humanité en déclarant 2015 année mondiale des sols<sup>5</sup> avec comme leitmotiv « des sols sains pour une vie saine ». À cette occasion, l'Académie d'agriculture de France a organisé deux colloques sur les sols à l'initiative respectivement des sections 5 « Interactions milieux-êtres vivants » et 6 « Sciences de la vie » : « Utilisation du potentiel biologique des sols, un atout pour la production agricole » (Tessier *et al.*, 2015) et « Interactions plantes-microorganismes telluriques au service de l'agroécologie » (Lemanceau *et al.*, 2015a). Le présent ouvrage vise à garder la mémoire de la richesse des informations fournies au cours de ces deux colloques en proposant des chapitres portant sur le sol habitat (chapitre 1), le rôle et le fonctionnement des communautés microbiennes (chapitres 2, 3, 4 et 10) et des invertébrés (chapitre 6) dans les systèmes sol-plante, l'impact du sol sur la croissance des végétaux (chapitres 5 et 8), le rôle des relations multitrophiques, microfaune – bactéries rhizosphériques –, mycorhizes, dans le recyclage des nutriments (chapitre 7), les bio-indicateurs de la qualité des sols (chapitre 9), l'importance des associations mycorhiziennes pour la production végétale et leur potentiel en ingénierie écologique (chapitres 11, 12 et 16), l'orientation du microbiote rhizosphérique *via* l'utilisation de plantes à exsudation modifiée (chapitre 13) et de biostimulants perturbant la communication moléculaire bactérienne (chapitre 14), les défis et perspectives pour l'utilisation de la fixation biologique de l'azote en agriculture (chapitre 15).

La qualité et la diversité des présentations faites lors de ces deux colloques, retranscrites pour la plupart dans les chapitres de cet ouvrage, sont porteuses d'espoir pour des innovations à venir dans les domaines de la biologie des sols et des interactions plantes-microorganismes, à terme utiles pour la conception de systèmes agroécologiques économes en intrants de synthèse. Elles démontrent également la richesse et l'intérêt d'appréhender des approches multidisciplinaires comme facteurs de progrès dans la compréhension de ces interactions biotiques complexes et de leur application. Mais il est important de souligner, comme cela a été indiqué lors de la conclusion de ces colloques, que les applications de ces innovations à l'agroécologie devront nécessairement être co-construites avec les acteurs qui les mettront en œuvre, les agriculteurs, et de façon plus générale avec les acteurs de l'ensemble de la filière.

---

5. <http://www.fao.org/soils-2015/fr/> (consulté le 30 décembre 2016).



## Références bibliographiques

---

- Arrouays D., Feller C., Jolivet C., Saby N., Andreux F., Bernoux M., Cerri C., 2003. Estimation des stocks de carbone organique des sols à différentes échelles d'espace et de temps. *Étude et gestion des sols*, 10 (4), 347-355.
- Bournigal J.-M., Houllier F., Lecouvey P., Pringuet P., 2015. 30 projets pour une agriculture compétitive & respectueuse de l'environnement, consultable en ligne : [agriculture.gouv.fr/sites/minagri/files/rapport-agriculture-innovation2025.pdf](http://agriculture.gouv.fr/sites/minagri/files/rapport-agriculture-innovation2025.pdf) (consulté le 5 décembre 2016).
- FAO, ITPS, 2015. *Status of the World's Soil Resources (SWSR): Main Report*. Rome, Food and Agriculture Organization of the United Nations/Intergovernmental Technical Panel on Soils.
- Jones C., Spor A., Brennan F., Breuil M.-C., Bru D., Lemanceau P., Griffiths B., Hallin S., Philippot L., 2014. Recently identified microbial guild mediates soil N<sub>2</sub>O sink capacity. *Nature Climate Change*, 4 (9), 801-805.
- Lemanceau P., Job D., Briat J.F., 2015a. Interactions plantes-microorganismes telluriques au service de l'agroécologie. In : *Colloque de l'Académie d'agriculture de France*, 5 novembre, consultable en ligne : <http://www.academie-agriculture.fr/colloques/interactions-plantes-microorganismes-telluriques-au-service-de-lagroecologie>
- Lemanceau P., Maron P.-A., Mazurier S., Mougél C., Pivato B., Plassart P., Ranjard L., Revellin C., Tardy V., Wipf D., 2015b. Understanding and managing soil biodiversity: A major challenge in agroecology. *Agronomy for Sustainable Development*, 35 (1), 67-81.
- Mendes R., Raaijmakers J.M., 2015. Cross-kingdom similarities in microbiome functions. *The ISME Journal*, 9 (9), 1905-1907.
- Orgiazzi A., Bonnet Dunbar M., Panagos P., Arjen de Groot G., Lemanceau P., 2015. Soil biodiversity and DNA barcodes: Opportunities and challenges. *Soil Biology and Biochemistry*, 80, 244-250.
- Redecker D., Kodner R., Graham L.E., 2000. Glomalean fungi from the Ordovician. *Science*, 289 (5486), 1920-1921.
- Tessier D., Berthelin J., Lemaire G., Munch J.C., Ranger J., 2015. Utilisation du potentiel biologique des sols, un atout pour la production agricole. In : *Colloque de l'Académie d'agriculture de France*, 24 juin, consultable en ligne : <http://www.academie-agriculture.fr/colloques/utilisation-du-potentiel-biologique-des-sols-un-atout-pour-la-production-agricole>
- Thomson B.C., Tisserant E., Plassart P., Uroz S., Griffiths R.I., Hannula S.E., Buée M., Mougél C., Ranjard L., Van Veen J.A., Martin F., Bailey M., Lemanceau P., 2015. Soil conditions and land use intensification effects on soil microbial communities across a range of European field sites. *Soil Biology and Biochemistry*, 88, 403-413.
- Vandenkoornhuyse P., Quaiser A., Duhamel M., Le Van A., Dufresne A., 2015. The importance of the microbiome of the plant holobiont. *New Phytologist*, 206 (4), 1196-1206.



## Chapitre 1

---

# **Le sol habitat : environnement physicochimique et conditions de développement des différents organismes présents dans le sol**

Ary Bruand, Daniel Tessier

Le sol est un composant essentiel de la biosphère. Il est issu d'une évolution à long terme d'un matériau originel au sein duquel l'activité biologique sous ses nombreuses formes est le moteur principal. De ce fait, le sol contient des constituants minéraux auxquels s'ajoutent des constituants organiques vivants ou provenant de leur décomposition partielle. Si la composition du sol est importante pour en déterminer les propriétés, c'est aussi et principalement le mode d'assemblage de l'ensemble de ses constituants, c'est-à-dire sa structure et la géométrie de ses pores, qui détermine la présence des différents habitats pour les êtres vivants et leurs conditions de vie. En réalité, cette organisation spécifique du sol résulte d'interactions complexes entre les constituants du sol (minéraux et organiques) et les êtres vivants, en particulier les phases liquides et gazeuses qui occupent l'espace poral ou porosité du sol.

### **» Le sol, genèse et évolution : création d'un habitat**

Pour se former et évoluer dans le temps, différents processus sont mis en jeu parmi lesquels l'action de l'eau et le développement de l'activité biologique sont prédominants. Il faut rappeler que les minéraux des roches profondes à partir desquelles les sols se développent le plus souvent se sont formés dans des conditions très spécifiques caractérisées par une pression géostatique (pression exercée par le poids des roches sus-jacentes) élevée, souvent > 50 MPa, une température inférieure à 100 °C pour les roches sédimentaires, une déshydratation et une densification progressive et un milieu réducteur. *A contrario*, les conditions superficielles sont caractérisées

par la présence d'oxygène, une très faible pression géostatique, des phases de dessiccation-humectation et de gel.

Les minéraux des sols étant en déséquilibre thermodynamique par rapport aux conditions initiales de formation de la roche, un nouvel équilibre tend à se créer en fonction des conditions superficielles et de la présence de la vie. Du point de vue physique, il en résulte avec le temps un changement de granulométrie marqué par une proportion de plus en plus grande de particules fines, en particulier des argiles. Les sols peuvent se former sur une roche en place ou se développer sur des matériaux transportés à grande distance, par exemple par le vent pour les dépôts *lœssiques* ou encore par les eaux, comme c'est le cas des dépôts alluvionnaires. Des transferts de particules se font aussi à l'échelle du bassin versant et au sein du sol : pour les argiles, on parle alors de lessivage. Il en résulte au départ des matériaux plus ou moins denses, donc plus ou moins poreux en fonction de leur origine et de leurs conditions de mise en place. Quel que soit le sol, à partir de matériaux à composition purement minérale au départ et sous différentes actions, un milieu poreux se crée ou se différencie progressivement. Un indice important du processus de formation du sol est le changement de masse volumique. À partir de l'exemple extrême d'une roche très compacte dont la masse volumique est proche de  $2,50 \text{ g/cm}^3$ , donc presque sans porosité, on passe à un matériau progressivement plus poreux. La masse volumique atteint généralement  $1,3 \text{ g/cm}^3$  environ dans les sols cultivés, soit environ 50 % du volume occupé par des vides (pores) remplis en proportions variables d'air et d'eau.

Ce changement de masse volumique et les aspects géochimiques de l'évolution des sols impliquent de profonds changements dans la nature et la disposition mutuelle des constituants solides. Une première conséquence concerne la formation d'une sorte de liant argileux très fin entre les autres particules plus grossières.

Au cours de cette évolution, des éléments indispensables sont libérés du fait de la genèse de nouveaux minéraux ou de leur transformation plus restreinte (Robert et Varet, 1996). Sous forêt par exemple, le développement de la vie dépend partiellement de l'évolution des minéraux présents, et plus directement de la minéralisation des matières organiques. Pour les sols cultivés et dans nos forêts gérées par l'homme, le statut organique des sols est largement influencé par l'activité humaine au sens large, en particulier les pratiques culturales associées comme la fertilisation récente ou ancienne qui modifie les stocks d'éléments présents. Quoiqu'il en soit, des évolutions subtiles et rapides (une décennie) en fonction des pratiques de fertilisation et de la conduite des cultures sont aussi observées. Dans ce cas de figure, elles peuvent être largement irréversibles (par exemple dissolution totale ou partielle des argiles, phénomènes induits de toxicité) (Limousin et Tessier, 2006).

## ► Implications au plan physicochimique

Le sol a ceci de singulier qu'il est composé de particules de différentes tailles, organiques et minérales, de quelques nanomètres pour les minéraux et les matières organiques les plus fines jusqu'à quelques centimètres pour les cailloux. Si les particules grossières visibles à l'œil nu constituent une sorte d'armature (sables, graviers),