

La biodiversité des sols, un bien commun au service de tous

E. Blanchart⁽¹⁾, J. Cortet⁽²⁾ et C. Gers^(3*)

- 1) Eco&Sols, Univ Montpellier, IRD, INRAE, CIRAD, Institut Agro, Montpellier, France
- 2) CEFE UMR 5175, Univ Paul-Valéry Montpellier 3, Univ Montpellier, CNRS, IRD, EPHE, Montpellier, France
- 3) Laboratoire écologie fonctionnelle et environnement, Université de Toulouse, CNRS, 118 Route de Narbonne, 31062 Toulouse, France

* Auteurs correspondants : eric.blanchart@ird.fr - jerome.cortet@univ-montp3.fr - charles.gers.albert@gmail.com
Contribution égale des 3 auteurs à la publication

INTRODUCTION

En décembre 2020, la Journée Mondiale des Sols (JMS) a été célébrée en France sur le thème de la **biodiversité des sols**. Organisée par l'AFES (Association Française pour l'Étude du Sol) et en partenariat avec la Région PACA, le Département des Bouches-du-Rhône et la Ville de Marseille, l'Office Français de la Biodiversité (OFB), le Ministère de l'Agriculture et l'Agence de la Transition Ecologique (ADEME), elle a permis de mettre en lumière cette biodiversité cachée et pourtant essentielle au maintien de fonctions et services les plus fondamentaux ; ceci a pu se faire à travers différents webinaires portant sur les sols forestiers, urbains et agricoles, insistant sur la nécessité du transfert de connaissances (<https://www.afes.fr/actions/journee-mondiale-des-sols/journee-mondiale-des-sols-2020/>).

L'occasion était trop belle de poursuivre cette JMS à travers un numéro spécial de la revue Etude et Gestion des Sols (EGS), consacré à la biodiversité des sols. Les recherches et actions sur le sujet sont en effet nombreuses et variées, en lien avec un intérêt citoyen renouvelé, dans un contexte législatif très dynamique, aussi bien au niveau international qu'europpéen et national, et qui se doit de répondre aux pressions exercées par l'Homme, mais aussi s'emparer des nouveaux concepts qui ont émergé ces dernières années en écologie des sols.

Comment citer cet article :

Blanchart E., Cortet J. et Gers C., 2023 -
La biodiversité des sols, un bien commun au service de tous - Étude et Gestion des Sols,
30, 75-81

Comment télécharger cet article :

<https://www.afes.fr/publications/revue-etude-et-gestion-des-sols/volume-30/>

Comment consulter/télécharger

tous les articles de la revue EGS :
<https://www.afes.fr/publications/revue-etude-et-gestion-des-sols/>

L'INCROYABLE BIODIVERSITÉ DE "L'ÉCOSYSTÈME SOL"

Le concept de biodiversité est largement utilisé, avec souvent une vision large comme celle de la Convention sur la Diversité Biologique des années 1992, article 2, qui la définit ainsi : « *la variabilité des organismes vivants de toute origine y compris, entre autres, les écosystèmes terrestres, marins et autres écosystèmes aquatiques et les complexes écologiques dont ils font partie; cela comprend la diversité au sein des espèces et entre espèces ainsi que la diversité des écosystèmes* ». Nous définissons ainsi la biodiversité des sols comme la variété de la "vie souterraine" (*Lato sensu*), depuis les gènes et les espèces jusqu'aux communautés qu'ils forment, ainsi qu'à l'ensemble de l'écosystème-sol (comme décrit par Ponge, 2012). Les communautés qu'ils forment, ainsi que les complexes écologiques auxquels ils contribuent et donc auxquels ils appartiennent, sont envisagés à différentes échelles, depuis les micro-habitats du sol jusqu'aux paysages.

Le concept est souvent utilisé dans un sens taxonomique et désigne le nombre d'espèces distinctes, mais il peut être étendu pour englober la diversité génétique, phénotypique (exprimée), fonctionnelle, structurelle ou trophique. De fait, les sols sont l'un des principaux réservoirs mondiaux de biodiversité (Bardgett et van der Putten, 2014; Carey, 2016). Presque tous les embranchements du vivant sont représentés dans les sols excepté les Cnidaires, les Éponges et les Échinodermes. Ce réservoir comprend, entre autres, des bactéries et des archées, des champignons, des protistes et bien d'autres eucaryotes, comme les nématodes, les acariens, les mille-pattes, les enchytréides, les tardigrades, les rotifères, les collembolles, les fourmis, les carabes et les vers de terre, etc. (Stork, 2018; Coleman et Whittman, 2005). Le sol renferme également de nombreuses espèces de Vertébrés comme les taupes, mulots ou encore les squamates qui y trouvent des habitats propices à leur développement. Si on utilise une approche purement taxonomique, le chiffre de plus de 25 % de la totalité des espèces décrites sur Terre est largement répandu. Mais il ne prend pas en compte les nombreuses espèces qui ont besoin du sol (et souvent de nature spécifique, au sens de sa qualité) pour assurer une partie de leur cycle de vie, de reproduction (stades larvaires de nombreux arthropodes, gîtes de reproduction, terriers, apport de calcaire du sol pour les coquilles d'escargot... Le chiffre (au sens de la diversité spécifique) s'élèverait alors à plus de 40 % (Decaëns *et al.*, 2006; Gobat *et al.*, 2003)

Cette extraordinaire diversité d'organismes est grandement liée à la nature du sol. Le sol est un système complexe et hétérogène, comprenant des agrégats organo-minéraux de différentes tailles et des composants organiques, dont l'organisation spatiale crée des habitats pour la biodiversité du sol à plusieurs échelles. La diversité de la composition de l'habitat, avec des pores de différentes tailles remplis d'air et/ou d'eau, permet à un

nombre incroyable de taxons de tailles et d'écologies différentes d'y cohabiter (André *et al.*, 2002). Les communautés du sol sont des systèmes hiérarchiques dans lesquels différents types d'organismes peuplent des volumes (ou des surfaces de volume) de sol très différents. Cela inclut le film d'eau d'un micromètre d'épaisseur autour des particules du sol, qui abrite des organismes aquatiques tels que des bactéries, des protistes, des nématodes et les tardigrades (c'est-à-dire la microfaune), l'espace poreux rempli d'air pour les animaux du sol, d'une largeur comprise entre 100 µm et 2 mm de large (c'est la mésofaune), ou supérieur à 2 mm, qui seront le domaine de la macrofaune. Cette diversité d'habitats génère une diversité d'interactions fonctionnelles, qui, associée à la diversité génétique, très importante, en assure ainsi la continuité temporelle et donc son évolution.

Les organismes du sol participent à des processus (transferts de matière, agrégation...) qui sont à l'origine des principales fonctions des écosystèmes, ce qui fait référence à l'ensemble des processus biologiques naturels réalisés par les organismes du sol en son sein. Les fonctions écologiques remplies par les organismes des sols et leurs interactions sont à la base des services écosystémiques fournis par les sols, qui eux font référence à l'ensemble de processus qui contribuent au bien-être humain, notamment les services de production et de régulation. Ainsi, il est reconnu que les organismes du sol, à travers des interactions complexes, réalisent 4 grandes fonctions écologiques : la décomposition des matières organiques, le recyclage des nutriments, le maintien de la structure des sols et le contrôle des populations biologiques, notamment des bioagresseurs et pathogènes. À travers la réalisation de ces 4 fonctions, les organismes du sol participent grandement à la croissance végétale et donc au service de production, à la résistance des plantes aux maladies, à la résistance du sol à l'érosion, à la régulation des flux hydriques, mais aussi aux flux de gaz à effet de serre et à la séquestration du carbone, à la détoxification de (certains) polluants, etc. (voir numéro spécial EGS sur les services écosystémiques, Eglin *et al.*, 2021).

LE RENOUVEAU DE L'INTÉRÊT POUR LES SOLS ET LEUR BIODIVERSITÉ

Depuis 2015 et la mise en œuvre de l'année internationale des sols, la FAO entreprend de très nombreuses actions destinées à accroître la sensibilisation auprès de la société civile et des décideurs de l'importance cruciale des sols pour la vie humaine, d'informer les politiques et le public des rôles que jouent les sols dans les grands enjeux actuels : sécurité alimentaire, atténuation et adaptation au changement climatique, fourniture de services écosystémiques essentiels à l'humanité (<https://www.fao.org/soils-2015/about/fr/>).

La FAO, en lien avec le partenariat mondial pour les Sols (GSP), s'investit particulièrement pour une meilleure conservation de

la biodiversité des sols considérée comme essentielle pour la réalisation des fonctions des sols : organisation du congrès mondial sur la biodiversité des sols (Global Symposium on Soil Biodiversity, 2021, Rome), création d'un Réseau mondial sur la biodiversité des sols (Netsob) pour soutenir la mise en œuvre d'un Observatoire mondial sur cette biodiversité (Glosob). Ce réseau mondial entend travailler dans 4 directions pour faciliter les décisions des politiques : (i) orientations pour la mesure, l'évaluation et la surveillance de la biodiversité du sol, (ii) manuel de bonnes pratiques de gestion pour conserver la biodiversité du sol, (iii) méthodologie pour une évaluation économique des services écosystémiques rendus par la biodiversité des sols, (iv) notes de politique sur l'état des connaissances, la protection, la conservation et l'utilisation durable de la biodiversité des sols aux niveaux national, régional et mondial.

Ces organisations (FAO, GSBI, GSP) ont permis la récente publication de nombreux ouvrages sur la biodiversité du sol (<https://www.fao.org/global-soil-partnership/resources/publications/fr/>).

De son côté, l'Union Européenne (UE) est également très active sur cette thématique, notamment à travers le JRC qui a publié les fameux atlas, européen et mondial, de la biodiversité des sols (avec le concours, pour ce dernier, de l'Initiative mondiale sur la biodiversité des sols (GSBI)). Dans le cadre de sa stratégie sur les sols pour 2030, l'Union Européenne reconnaît que la vie sur Terre dépend de sols sains et a récemment lancé l'établissement de 100 'laboratoires vivants' et 'sites phares' pour mener la transition vers des sols sains, partout en Europe, en 2050. L'UE a également annoncé une nouvelle loi sur la santé des sols d'ici 2023.

Créée en 2011, l'Initiative mondiale sur la biodiversité des sols (GSBI), avec plus de 4000 membres, est également très active pour informer et sensibiliser les différents acteurs. Elle mène des actions 'grand public' et des webinaires, organise des conférences scientifiques (comme la prochaine 'Global Soil Biodiversity Conference' en Irlande en mars 2023) et publie des ouvrages. Elle est également très présente auprès des politiques, par exemple à travers cette lettre envoyée à la Convention sur la Diversité Biologique CDB en novembre 2021 pour mieux protéger, restaurer et promouvoir la biodiversité des sols¹.

Les initiatives françaises ont également été nombreuses ces dernières années pour mieux connaître, comprendre et interpréter la biodiversité des sols. Les premières impulsions ont souvent été coordonnées par l'ADEME, à travers de nombreux programmes et actions de recherche. Citons par exemple le programme GESSOL ("Fonctions environnementales et GESTion du patrimoine SOL"), qui a financé 46 programmes de recherche sur les sols en 18 ans d'existence, dont de nombreux portaient

sur la biodiversité du sol. On citera également le programme "Bioindicateurs" (Bispo *et al.*, 2009), avec notamment RMQS Biodiv Bretagne, issu du programme RMQS (Réseau de Mesure de la Qualité des Sols) et qui constitue sans doute le premier projet d'échantillonnage systématique de biodiversité des sols dans l'hexagone (Cluzeau *et al.*, 2009). Aujourd'hui, ces activités se poursuivent et s'amplifient, sous d'autres formes et avec l'implication de nouveaux acteurs, comme l'OFB (Office Français de la Biodiversité), qui coordonne par exemple actuellement un projet visant à joindre un volet biodiversité au RMQS, ce qui représenterait un réseau de surveillance de 2240 sites en France, incluant certains territoires ultramarins (Imbert *et al.*, 2021). Certains taxons ont déjà exploité le RMQS, ce qui a permis de produire les premiers atlas de diversité microbienne français (Dequiedt *et al.*, 2020). Au niveau local, de nettes impulsions sont visibles dans nos territoires, comme par exemple le projet Territoire d'Innovation "Alimentation durable 2030", qui propose sur l'agglomération dijonnaise d'évaluer la biodiversité des sols sur plus de 400 sites, et constitue déjà un des plus beaux exemples européens de "laboratoires vivants" sur la biodiversité des sols. À côté des chercheurs, organismes de recherche et institutions, sont apparus, depuis quelques années, des projets incluant plus spécifiquement les citoyens, à travers les sciences participatives d'une part, et les approches dites "sensibles" d'autre part, bien qu'elles ne soient pas forcément exclusives l'une de l'autre. Ainsi, plusieurs observatoires participatifs sur la biodiversité ont vu le jour en France. On pourra citer l'OPVT (Observatoire Participatif des Vers de Terre, https://ecobiosoil.univ-rennes1.fr/OPVT_accueil.php) qui, depuis plus de 10 ans, à travers plusieurs propositions de protocoles (moutarde, test bêche, tri manuel), permet aux citoyens, et plus particulièrement aux agriculteurs, d'échantillonner et identifier les vers de terre sur leurs parcelles, en liaison avec des scientifiques spécialistes du domaine. De même, l'initiative Jardibiodiv (<https://ephytia.inra.fr/fr/P/165/jardibiodiv>; Auclerc *et al.*, 2019), qui concerne la macrofaune du sol et vise plutôt un public urbain. Ou plus récemment le projet QUBS (www.qubs.fr), qui permet aux participants d'identifier la biodiversité du sol à partir de photographies et d'outils d'identification en ligne. Une liste plus exhaustive de ce genre d'initiatives participatives est disponible en ligne sur le site de l'AFES (<https://www.afes.fr/actions/recherches-participatives/porteurs-de-projets-recherche-participative/>). Ces observatoires participatifs permettent de remplir deux objectifs essentiels aujourd'hui concernant la biodiversité des sols : (i) combler le déficit de connaissances du grand public, et (ii) acquérir des données en plus grand nombre, permettant ainsi de constituer des bases de données conséquentes sur de larges zones de territoires souvent inexplorées jusqu'ici. Ces initiatives obligent à repenser les méthodologies jusqu'alors utilisées par les spécialistes, par exemple en modifiant ou adaptant les protocoles existants, ou même à réfléchir à des méthodes innovantes pour capter l'information, par exemple par la prise d'images. Il est clair que,

¹ https://static1.squarespace.com/static/5b9033f1f8370a3700df6f4b/t/61a51ba0cb3aea5591bad0cb/1638210465305/Letterhead-v9-FINAL_updated+11_28_2021+%281%29.pdf

dans ce contexte, les méthodes de reconnaissance automatique à partir d'images, largement développées pour d'autres taxons et systèmes écologiques (Inat, Plantnet...), sont amenées à se développer dans les prochaines années. Elles obligent également à repenser la question de la qualité de la donnée acquise, puisque le risque d'erreur est augmenté, mais qu'il est compensé par la quantité de données collectées. Elles interrogent aussi sur la propriété des données et les questions d'éthique autour de l'acquisition et de la diffusion des données, engageant ainsi la responsabilité des chercheurs à ce sujet. Par exemple, dans ces démarches participatives, la question de la légalité des animaux récoltés devient un sujet parfois central.

Les approches sensibles permettent également une approche différente de la biodiversité des sols. Elles amènent souvent à la découverte de groupes méconnus. Par exemple, l'ouvrage de Cortet et Lebeaux (2015) permet, à travers la photographie, de faire découvrir le groupe des Collemboles à des publics jusqu'ici totalement ignorants de leur existence. D'autres arts picturaux, comme la bande dessinée (Richer-de-Forges *et al.*, 2009) ou l'exposition sol-fiction (<http://www.projetcoal.org/coal/2016/04/03/le-lab-sols-au-domaine-de-chamarande/>) favorisent la découverte de ce sujet par un large public.

UNE ACTIVITÉ DE RECHERCHE FOISSONNANTE, À L'IMAGE DE CE NUMÉRO SPÉCIAL D'EGS

Les recherches concernant la biodiversité des sols restent très actives en France. De nombreux laboratoires métropolitains et ultramarins contribuent à l'amélioration de la connaissance de ces organismes, de leur taxonomie, de leurs interactions entre eux ou avec le milieu abiotique, de leurs rôles vis-à-vis des grandes fonctions écologiques des sols et des services écosystémiques, des actions à entreprendre pour préserver, voire accroître, cette biodiversité dans les sols.

Ce présent numéro spécial de la revue EGS (Étude et Gestion des Sols), consacré à la Biodiversité des Sols, rassemble 16 articles montrant à la fois la diversité des questions scientifiques et des approches, mais aussi la nécessité de mieux connaître cette biodiversité pour intensifier les fonctions essentielles qu'elle remplit pour le bien de l'humanité.

De nombreux taxons d'organismes des sols, pourtant déjà relativement bien connus, continuent d'être étudiés pour améliorer notre connaissance de leurs capacités fonctionnelles. Il en est ainsi pour les **vers de terre** dont les aspects fonctionnels et les classifications écologiques interrogent avec raison les chercheurs (Capowiez *et al.*, 2022). D'autres groupes taxonomiques sont en revanche moins connus et les mises au point réalisées pour ce numéro spécial sont d'une grande importance : citons les synthèses des connaissances sur les **protistes**, organismes eucaryotes unicellulaires très abondants dans les sols et jouant

un rôle sûrement très sous-estimé (Palka *et al.*, 2022), et les **enchytréides**, petits cousins des vers de terre mais 10 fois moins étudiés qu'eux, qui peuvent être de très bons indicateurs de stress chimiques ou d'effet des pratiques agricoles sur le fonctionnement des écosystèmes (Pelosi et Capowiez, 2022). Dans le même ordre d'idée, des laboratoires approfondissent nos connaissances sur les **nématodes**, vers microscopiques, présentant des régimes trophiques très variés, particulièrement abondants dans les sols et perçus comme bénéfiques (les nématodes libres) ou nuisibles (les nématodes phytoparasites) (Villenave *et al.*, 2022).

Les **techniques** d'échantillonnage ou d'étude des organismes des sols continuent également leur développement. Certains chercheurs proposent des outils, des techniques ou des approches qui peuvent intéresser aussi bien les approches participatives que les recherches de pointe. C'est le cas de l'article de Le Bayon *et al.* (2022) qui liste et analyse les principales méthodes d'étude des vers de terre (du simple comptage au séquençage d'ADN) et de leurs fonctions (du test bêche à la tomographie à rayons X).

À côté des recherches biologiques ou taxonomiques, les recherches s'orientent principalement dans deux directions : (i) la bioindication de la **qualité des sols** et (ii) l'implication des organismes dans les grandes **fonctions écologiques** des sols (flux de nutriments, décomposition des matières organiques, maintien de la structure du sol, régulation des populations biologiques).

Concernant le premier aspect, ce numéro spécial présente quelques articles qui montrent comment les organismes du sol sont d'excellents indicateurs de la qualité d'un sol. L'étude réalisée en Martinique indique que l'abondance des macro-arthropodes du sol (arthropodes visibles à l'œil nu) est plus élevée en parcelles de bananiers 'raisonnées', qu'en parcelles de bananiers 'conventionnelles'. Ces organismes, surtout les isopodes, sont très sensibles aux pratiques agricoles mises en œuvre dans ces plantations, ils sont plus abondants dans les zones riches en apports organiques que sous sol nu (El Jaouhari *et al.*, 2022). L'étude de Austruy *et al.* (2022) considère la réponse des communautés de micro-arthropodes (collemboles et acariens) à certaines pratiques agricoles et à une contamination métallique. Il est montré que ces organismes sont plus abondants sous prairie que sous culture céréalière et qu'ils peuvent bioaccumuler des métaux traces. Les enchytréides, très sensibles aux contaminants, sont également des organismes utilisés comme modèles biologiques en écotoxicologie (Pelosi et Capowiez, 2022). Les espèces retenues pour ces tests écotoxicologiques sont en effet faciles à élever en laboratoire ; elles peuvent être utilisées pour différents tests : test de survie, test de reproduction, test d'évitement. Comme on l'a vu ci-dessus, la structure des communautés de nématodes apparaît également comme un excellent indicateur de la qualité des sols. Une équipe a développé un outil de simulation de l'effet des pratiques sur les nématodes (Villenave

et al., 2022). Cet outil mis en ligne, très convivial, appelé SIPA-NEMA, simule deux risques: le risque sur le fonctionnement biologique (RFB) et le risque de pression parasitaire due aux nématodes phytoparasites (RPP); il est donc particulièrement utile pour les agriculteurs et les aménageurs. Les urbanistes impliqués dans l'aménagement territorial urbain et péri-urbain, et plus spécialement dans l'établissement des trames brunes, pourraient également s'appuyer sur la biodiversité des sols. L'étude de Vincent *et al.* (2022) montre que la composition taxonomique et fonctionnelle de la macrofaune épigée (ensemble des invertébrés du sol visibles à l'œil nu) est un des outils à favoriser dans la création et l'étude de l'efficacité d'une trame brune. Pour cela, de nombreux habitats doivent être considérés pour la création de ces trames brunes car elles renferment une biodiversité variée. En milieu agricole, les organismes du sol sont souvent considérés comme d'excellents indicateurs de la qualité du sol car ils sont très sensibles aux différentes pratiques mises en œuvre. La méta-analyse réalisée par Christel *et al.* (2022) compare l'effet de 3 modes de production alternatifs à l'agriculture dite conventionnelle, sur la qualité biologique des sols: l'agriculture biologique, la biodynamie et l'agriculture de conservation. Cette analyse de la littérature montre que la biodynamie semble le mode de production qui permet la meilleure qualité biologique des sols (caractérisés par de nombreux indicateurs biologiques) devant l'agriculture biologique et l'agriculture de conservation, loin devant l'agriculture 'conventionnelle'.

Concernant les fonctions réalisées par les organismes au sein des sols, ce numéro spécial présente les résultats de différentes études ou synthèses bibliographiques. Deux articles s'intéressent spécialement au rôle des **microorganismes** (bactéries et champignons) dans le devenir de la matière organique (et des nutriments associés) dans les sols.

La synthèse réalisée par Bernard *et al.* (2022) expose un état très complet des connaissances actuelles sur le devenir de cette matière organique sous l'effet d'un processus peu connu, celui du 'priming effect' qui contribue à l'équilibre du carbone du sol. Elle propose également un cadre pour unifier les différents concepts et termes qui ont émergé de la communauté scientifique internationale sur ce sujet. Elle insiste sur l'importance des facteurs abiotiques dans le devenir de cette matière organique et décrit les enzymes et microorganismes impliqués dans les différents mécanismes de ce processus. Enfin, l'effet du changement climatique sur ce processus est discuté et les auteurs proposent des hypothèses quant à l'évolution du carbone des sols selon les projections climatiques. L'article de Valéry et Pansu (2022) évalue les différents modèles de simulation du devenir de la matière organique dans les sols. Il montre que les modèles existants font, en majorité, une référence explicite aux microorganismes malgré le fait qu'ils confrontent peu leurs résultats à des mesures de biomasse microbienne des sols. Il indique également que très peu de modèles considèrent différents groupes fonctionnels microbiens et leurs interactions avec les autres groupes d'orga-

nismes du sol (mésofaune, macrofaune). Cette importance d'intégrer différents groupes fonctionnels microbiens rejoint les conclusions de l'article de Bernard *et al.* (2022) mais cela reste difficile à mettre en œuvre dans les modèles. L'article de Erktan *et al.* (2022) propose une vision intégrée du fonctionnement du sol, démontrant, à travers une revue de littérature, comment et pourquoi il est nécessaire de prendre en compte les interactions entre la biodiversité et la structure du sol pour comprendre le fonctionnement du sol. Il est important de comprendre à la fois comment la structure physique des sols module l'effet de la biodiversité sur la dynamique des matières organiques, et comment la biodiversité et les interactions trophiques déterminent la structure physique des sols.

Tous ces articles soulignent les progrès scientifiques qui ont été faits et continuent d'être faits concernant la biodiversité des sols. Cette biodiversité des sols est maintenant largement reconnue pour son importance dans les sols, que ce soit en matière de bio-indication et ou de fonctionnement du sol et de conséquences sur le fonctionnement des écosystèmes. De nombreuses études proposent des approches très appliquées à destination du plus grand nombre, que ce soit vers **les agriculteurs, les aménageurs et les politiques**. Il est également intéressant de noter que les **formations académiques** intègrent de plus en plus cette connaissance sur l'écologie des sols. A Montpellier, une étude a été proposée par des enseignants de l'Université à des étudiants de Master pour décrire la biodiversité microbienne dans le sol d'une réserve naturelle (Barbier *et al.*, 2022). Les étudiants ont défini le protocole d'échantillonnage, prélevé les échantillons, analysé les communautés microbiennes par des outils modernes, analysé les résultats et rédigé l'article présenté dans ce numéro spécial. Dans une démarche très similaire, l'Université de Poitiers a également mis en place des mesures de gestion de ses espaces verts dans le but de favoriser la biodiversité du sol (Clause *et al.*, 2022). Ces mesures sont évaluées par des étudiants de Licence et Master qui réalisent, chaque année, des inventaires de macrofaune du sol. Ces projets pédagogiques autour de la biodiversité du sol sont tout à fait intéressants car ils sensibiliseront les étudiants et futurs aménageurs à cette thématique importante.

Ce numéro spécial ne serait pas complet sans un excellent hors-d'œuvre et un succulent dessert pour encadrer les savoureux plats de résistance. C'est pourquoi nous avons invité deux éminents chercheurs à proposer une réflexion sur cette science de l'écologie du sol et sur la biodiversité des sols. En introduction, un article de Jean-François Ponge (2022) présentera l'évolution des connaissances acquises sur la biodiversité des sols depuis les travaux précurseurs de Charles Darwin et Louis Pasteur à la fin du 19^e siècle et montrera que le sol est une des frontières avancées de la science. En conclusion, sera présentée une réflexion de Patrick Lavelle (2022) sur sept questions d'importance restant à résoudre pour mieux comprendre le fonctionnement du sol et mettre en œuvre les modes de gestion

durables du sol de demain. Ces sept questions concernent des processus encore mal définis, de l'environnement microbien à celui des ingénieurs de l'écosystème, et au paysage agricole. Elles visent notamment à être plus pédagogiques et efficaces dans le conseil et la mise en pratique de modes de gestion des sols différents.

CHANGER LA DONNE SUR LA BIODIVERSITÉ DES SOLS : UNE URGENTE NÉCESSITÉ

Agriculture intensive, ultra-mécanisée et/ou utilisant les pesticides comme solution facile, urbanisation galopante et non maîtrisée, pollutions métallique et plastique, gestion forestière inappropriée, introduction d'espèces envahissantes, conséquences du changement climatique : les atteintes à la biodiversité des sols sont nombreuses, et nous les connaissons. Nous les avons décrites et documentées dans les milliers de publications aujourd'hui disponibles en ligne sur nos moteurs de recherche.

Pourtant, le droit français et international semble encore totalement inadapté pour protéger cette biodiversité. Alors que de nouvelles espèces endémiques sont encore décrites aujourd'hui en France (par exemple des vers de terre sur l'île de Porquerolles, Marchán *et al.*, 2020), quel statut faut-il donner aux organismes du sol ? Quel niveau de protection devons-nous accorder à cette biodiversité ? Dans quel cadre ? Doit-on privilégier la protection des taxons ou des fonctions ? Si nous privilégions les fonctions et non les taxons, cela signifie-t-il que le patrimoine génétique d'un ver de terre ou d'un collembole a moins de valeur que celui d'un ours brun ? Si nous privilégions les taxons, pourrions-nous préserver le bon fonctionnement des sols, garant d'une bonne qualité des sols et dépendant des interactions entre de nombreux taxons ? Quels critères pour définir la qualité des sols ? Plutôt que de qualité des sols, doit-on privilégier le concept de santé des sols ?

Ces préoccupations rejoignent bien entendu les questionnements plus généraux sur la protection des sols. ZAN (Zéro Artificialisation Nette), séquence ERC (Éviter, Réduire, Compenser), ces notions s'imposent peu à peu et semblent constituer *a priori* des cadres juridiques contraignants, qui devraient aboutir à une meilleure protection des sols, mais qui reste au final très marginale quand on examine les documents d'urbanisme, avec souvent une absence totale de considération pour la biodiversité des sols. Cette protection passera sans doute par une mise en cohérence des différents droits français qui touchent au sol sans jamais l'aborder dans sa globalité. Chaque code a sa propre finalité, mais jamais le sol n'apparaît comme milieu détaché de l'intérêt humain ; bon nombre de ses fonctionnalités particulières sont ignorées. Celui du droit civil, c'est le droit de propriété ; celui du droit de la santé, c'est la qualité des eaux ; pour le code rural,

c'est l'assurance de la production agricole pour tout bailleur ; pour le code de l'urbanisme, c'est la capacité à la résistance des infrastructures ; dans le code de l'environnement, le sol n'est pas considéré comme un milieu, et depuis la loi climat il n'apparaît que comme réceptacle de pollution (plastique, métaux lourds, molécules de la chimie de synthèse...).

Les questions sont complexes et nécessitent de fait une transversalité des approches et une intersectorialité des enjeux. Des groupes comme le RNEST (Réseau National d'Expertise Scientifique et Technique sur les sols, <https://rnest.fr/>) sont constitués et peuvent aider à construire des solutions et accompagner le législateur. Mais il est maintenant plus qu'urgent d'agir. Nous entendons dans les réunions auxquelles nous assistons et parfois participons, que les planètes sont enfin alignées sur la question des sols, que l'Union Européenne serait prête à légiférer pour donner aux sols et à leur biodiversité le statut global de protection nécessaire à sa préservation, que la Directive Sol renaitrait de ses cendres. Alors laissons-nous espérer, mais restons vigilants et mobilisés. Gardons toujours en tête que la biodiversité des sols, quels que soient les services qu'elle nous procure, comme toute forme de vie sur Terre, mérite respect et attention.

REMERCIEMENTS

Nous remercions ici tous les auteures et auteurs qui ont permis l'élaboration de ce numéro spécial sur la biodiversité des sols en y soumettant leurs travaux et leurs réflexions sur cette vie si particulière. Nous remercions également les nombreux relectrices et relecteurs qui ont accepté de contribuer à améliorer ces manuscrits par leurs remarques et leurs commentaires toujours très constructifs. Nous remercions également les structures qui ont soutenu, techniquement et financièrement, l'organisation de la Journée Mondiale des Sols 2020 en Région Sud sur le thème « Biodiversité des sols : un enjeu pour les territoires » à l'origine de ce numéro spécial : l'ADEME, l'OFB, la Région Sud, le Département des Bouches-du-Rhône, la ville de Marseille, la Société du Canal de Provence et le Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation.

BIBLIOGRAPHIE

- André H.M., Ducarme X., Lebrun P. (2002). Soil biodiversity: Myth, reality or conning? *Oikos*. Vol 96, pp. 3-24. Doi 10.1034/j.1600-0706.2002.11216.x
- Auclerc A., Blanchart A., Vincent Q. (2019). Jardibiodiv, un outil de sciences participatives sur la biodiversité des sols urbains. *Etude et Gestion des Sols*. Vol 26, pp. 195-209.
- Austruy A., Gers C., Bur T., Probst A. (2022). Diversité des communautés de microarthropodes dans des sols agricoles (Sud-Ouest de la France) : influence des facteurs environnementaux et bioaccumulation de métaux traces. *Etude et Gestion des Sols*. Vol. 29, pp. 309-326.
- Barbier M., Jeanjean J., Labadie-Lafforgue E., Loechleiter A., Plumet L., Schatt F., Abdelli Z., Alary S., Benzouaoui H., Casi D., Cornelié S., Monie-Ibanes M., Pierre M., Pirou L., Reggiardo B., Surage I., Teyssier C., Carré-Mlouka

- A. (2022). Apprentissage par la recherche à l'Université de Montpellier : Étude de la biodiversité microbienne du sol de la réserve naturelle du Lunaret. *Étude et Gestion des Sols*. Vol. 29, pp. 185-197.
- Bardgett R.D., van der Putten W.H. (2014). Belowground biodiversity and ecosystem functioning. *Nature*; 515(7528): 505-11. doi: 10.1038/nature13855.
- Bernard L., Basile-Doelsch I., Derrien D., Fanin N., Fontaine S., Guenet B., Karimi B., Maron P.-A. (2022). Le Priming Effect dans le sol : mécanismes, acteurs et conséquences sur les services écosystémiques dans un contexte de changement global. *Étude et Gestion des Sols*. Vol. 29, pp. 239-274.
- Bispo A., Grand C., Galsomies L. (2009). Le programme ADEME 'Bioindicateurs de qualité des sols' : Vers le développement et la validation d'indicateurs biologiques pour la protection des sols. *Étude et Gestion des Sols*. Vol.16 (3), pp. 145-158.
- Capowiez Y., Decaëns T., Hedde M., Marsden C., Jouquet P., Marchan D.F., Nahmani J., Pelosi C., Bottinelli N. (2022). Faut-il continuer à utiliser les catégories écologiques de vers de terre définies par Marcel Bouché il y a 50 ans ? Une vision historique et critique. *Étude et Gestion des Sols*. Vol. 29, pp. 51-58.
- Carey J. (2016). Crucial role of belowground biodiversity. *PNAS* Vol 113 (28), pp. 7682-7685. <https://doi.org/10.1073/pnas.160923811>
- Clause J., Leblanc D., Deguines N. (2022). La biodiversité du sol au cœur d'un projet pédagogique sur le campus de l'Université de Poitiers, France : entre formation, gestion et conservation. *Étude et Gestion des Sols*. Vol. 29, pp. 223-238.
- Cluzeau D., Pérès G., Guernion M., Chaussod R., Cortet J., Fargette M., Martin-Laurent F., MATEILLE T., PERNIN C., PONGE J.-F., RUIZ-CAMACHO N., VILLENAVE C., ROUGÉ L., MERCIER V., BELLIDO A., CANNAVACCIULO M., PIRON D., ARROUAYS D., BOULONNE L., JOLIVET C., LAVELLE P., VELASQUEZ E., PLANTARD O., WALTER C., FOUCAUD-LEMERCIER B., TICO S., GITEAU J.-L., BISPO A. (2009). Intégration de la biodiversité des sols dans les réseaux de surveillance de la qualité des sols : exemple du programme pilote à l'échelle régionale, le RMQS BioDiv. *Étude et Gestion des Sols*. Vol 16, pp. 187-201.
- Coleman D.C., Whitman W.B. (2005). Linking species richness, biodiversity and ecosystem function in soil systems. *Pedobiologia*. Vol 49, pp. 479-497.
- Cortet J., Lebeaux P. (2015). Planète collemboles : la vie secrète des sols. Biotope éditions, Mèze, France, 252 p., ISBN 978-2-36662-161-7.
- Christel A., Maron P.-A., Ranjard L. (2022). Méta-analyse sur l'impact des modes de production agricole sur la qualité écologique du sol. *Étude et Gestion des Sols*. Vol. 29, pp. 117-144.
- Decaëns T., Jimenez J.J., Gioia C., Measey J., Lavelle P. (2006). The values of soil animals for conservation biology. *European Journal of Soil Biology*. Vol 42 (suppl. 1), pp. S23-S38.
- Dequiedt S., Karimi B., Chemidlin Prévost-Bouré N., Terrat S., Horrigue W., Djemiel C., Lelievre M., Nowak V., Wincker P., Jolivet C., Saby N.P.A., Arrouays D., Bispo A., Feix I., Eglin T., Lemanceau P., Maron P.A., Ranjard L. (2020). Le RMQS au service de l'écologie microbienne des sols français. *Étude et Gestion des Sols*. Vol 27, pp. 51-72.
- Eglin T., Cousin I., Walter C. (2021). Contribution aux réflexions sur les concepts de fonctions des sols et de services écosystémiques, et leur évaluation. *Étude et Gestion des Sols*. Vol. 28, p. 143-146.
- El jaouhari M., Damour G., Mauriol C., Coulis M. (2022). Effets des pratiques agricoles sur les macro-arthropodes du sol dans les bananeraies de Martinique. *Étude et Gestion des Sols*. Vol. 29, pp. 77-91.
- Erktan A., Coq S., Blanchart E., Chevallier T., Trap J., Bernard L., Nahmani J., Hartmann C., Hedde M., Ganault P., Barot S., Cortet J. (2022). Biodiversité et structure physique des sols : une vision spatialisée du fonctionnement des sols. *Étude et Gestion des Sols*. Vol. 29, pp. 153-167.
- Gobat J.-M., Aragno M., Matthey W. (2003). Le Sol vivant. Bases de pédologie, biologie des sols. Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne Coll. Gérer l'environnement n° 14, 569 p. 2ème édition.
- Imbert C., Santorufo L., Ortega C., Jolivet C., Bougon N., Cheviron N., Cluzeau D., Cortet J., Lévêque A., Mougouin C., Murat C., Pérès G., Pottier J., Ranjard L., Villenave C., Bispo A. (2021). Le RMQS comme support de suivi de la biodiversité des sols : les programmes passés, présents et futurs. *Étude et Gestion des Sols*. Vol 28, pp. 193-206.
- Lavelle P. (2022). Sept questions concernant la biodiversité et la gestion des sols. *Étude et Gestion des Sols*. Vol. 29, pp. 211-221.
- Le Bayon R.C., Campiche S., Gerber V., Fietier A., Scherrer L., Turberg P. (2022). Outils d'évaluation de la diversité et de l'activité des vers de terre : de la science participative à la recherche fondamentale. *Étude et Gestion des Sols*. Vol. 29, pp. 99-116.
- Marchán D.F., Decaëns T., Diaz Cosin D.J., Hedde M., Lapied E., Domínguez J. (2020). French Mediterranean islands as a refuge of relic earthworm species: *Cataladrilus porquerollensis* sp. nov and *Scherotheca portrosana* sp nov. (Crassiclitellata, Lumbricidae). *European Journal of Taxonomy*. Vol 701, pp. 1-22.
- Palka L., Bittner L., Lara E., Adl S. (2022). Les protistes dans les sols. *Étude et Gestion des Sols*. Vol. 29, pp. 145-151.
- Pelosi C., Capowiez Y. (2022). Les enchytréides, mieux les connaître pour mieux les utiliser. *Étude et Gestion des Sols*. Vol. 29, pp. 59-67.
- Ponge J.-F. (2012). Le sol est-il un écosystème ? hal-00746119.
- Ponge J.-F. (2022). Évolution de l'acquisition des connaissances en écologie et biodiversité des sols : de l'espèce à la fonction. *Étude et Gestion des Sols*. Vol. 29, pp. 93-98.
- Richer-de-Forges A., Verheijen F., Arrouays D., Blanchart E., Bernoux M. (2009). Soil in comic strips and cartoons. In "Soil and Culture", Ed. Landa and C. Feller (eds), Springer, Dordrecht, The Netherlands, pp. 439-452.
- Stork N.E. (2018). How Many Species of Insects and Other Terrestrial Arthropods Are There on Earth? *Annual Review of Entomology*. Vol 63. Pages 31-45.
- Valéry A. et Pansu M. (2022). Dynamique des matières organiques des sols, modèles proposés et relations modèles-organismes. *Étude et Gestion des Sols*. Vol. 29, pp. 169-184.
- Villenave C., Chauvin C., Puissant J., Henaux M., Trap J. (2022). Impact des pratiques agricoles sur l'état biologique du sol : SIPANEMA, un outil d'aide à la décision basé sur les connaissances scientifiques sur les nématodes. *Étude et Gestion des Sols*. Vol. 29, pp. 199-210.
- Vincent Q., Mangin N., Rigolot R., Blanchart A. (2022). Étude de la biodiversité des sols (macrofaune épigée) urbains et péri-urbains dans le cadre de la création d'une trame brune -*Étude et Gestion des Sols*. Vol. 29, pp. 275-294.

