



HAL
open science

Appréhender l'impact des pratiques agricoles sur l'état biologique et le fonctionnement du sol. Quelles recommandations et pistes de R&D en matière de pilotage biologique des sols ?

Nicolas Chemidlin Prévost-Bouré, Mario Cannavacciuolo, Elisabeth D'oiron-Verame, Cécile Villenave, Daniel Cluzeau, Valérie Riou, Pierre Mulliez, Pierre-Alain Maron, Lionel Ranjard

► To cite this version:

Nicolas Chemidlin Prévost-Bouré, Mario Cannavacciuolo, Elisabeth D'oiron-Verame, Cécile Villenave, Daniel Cluzeau, et al.. Appréhender l'impact des pratiques agricoles sur l'état biologique et le fonctionnement du sol. Quelles recommandations et pistes de R&D en matière de pilotage biologique des sols ?. Innovations Agronomiques, 2018, 69, pp.39-46. 10.15454/OW3CJS . hal-02058230

HAL Id: hal-02058230

<https://hal.science/hal-02058230>

Submitted on 5 Mar 2019

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

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



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

Appréhender l'impact des pratiques agricoles sur l'état biologique et le fonctionnement du sol. Quelles recommandations et pistes de R&D en matière de pilotage biologique des sols ?

Chemidlin Prévost-Bouré N.¹, Cannavacciuolo M.², D'Oiron-Verame E.³, Villenave C.⁴, Cluzeau D.⁵, Riou V.⁶, Mulliez P.⁶, Maron P.A.¹, Ranjard L.¹

¹ UMR Agro écologie (AgroSup Dijon, INRA, UBFC), 17 rue de Sully, F-21000 Dijon

² Unité LEVA, ESA 55, Rue Rabelais, F649007 Angers

³ Observatoire Français des sols Vivants, Domaine de Danne, F-49500 Saint Martin du Bois

⁴ ELISOL environnement, ZA des Tourels, 10 avenue du midi, F-30111 Congénies

⁵ UMR ECOBIO, Université Rennes 1, Station Biologique de Paimpont, F-35380 Paimpont

⁶ Chambre d'agriculture Maine et Loire, 14 avenue Jean Joxé, F-49006 Angers

Correspondance : nicolas.chemidlin@agrosupdijon.fr

Résumé

Le pilotage biologique des sols représente un enjeu dans la transition agroécologique. Ces dernières années, des outils de diagnostic ont été développés et validés par des actions de recherche participative alliant acteurs de la recherche et acteurs du monde agricole. Aujourd'hui, ces outils d'évaluation sont voués à évoluer. La validation de nouveaux bioindicateurs permettra de mieux décrire le sol ; l'acquisition massive de données biologiques permettra de développer des modèles prédictifs pour le diagnostic d'impact des pratiques agricoles et des indicateurs de synthèse tels qu'un indicateur d'état sanitaire. Néanmoins, cette évolution doit se faire en parallèle d'une évaluation du gain économique lié au pilotage biologique des sols. Le développement de réseaux de recherche/recherche et développement participatifs constituera un bras de levier pour répondre à ces enjeux et permettra de co-construire avec les acteurs du monde agricole des Outils d'Aide à la Décision associés à un conseil agronomique adapté.

Mots-clés : Pilotage biologique ; Sol ; Monitoring ; Réseaux de recherche participative ; Bioindicateurs ; Outils d'aide à la décision

Abstract: Considering the impact of agricultural practices: Recommendations and research perspectives for the biological management of soils

The biological management of soils is a cornerstone for agriculture to reach agroecology. Diagnosis tools have been developed and validated over the past decade through participative research approaches merging researchers and stakeholders. Today, these tools are dedicated to evolve. Validating new bioindicators will allow a finer description of soils, the massive acquisition of biological data will allow the development of predictive models to diagnose the impact of agricultural practices and of synthesis indicators to evaluate, for example, the sanitary state of soils. Nevertheless, this evolution will have to be associated to the estimation of the economic gain related to the biological management of soils. The development of participative research networks involving researchers and farmers will be a leverage to reach these goals and will allow the co-construction of decision tools adapted to their needs together with the agricultural advisory adapted to these new tools and to the goals of farmers.

Keywords: Soil ; Biological management ; Monitoring ; Participative research networks ; Bioindicators ; Decision tools

Introduction

Le rapport des Nations Unies sur l'état des ressources en sols dans le monde (FAO, 2015) met en exergue la place primordiale des sols. Les sols déterminent notre capacité à produire des biens en quantité et en qualité, ainsi qu'à bénéficier des services qu'ils rendent (régulation du climat, dépollution) s'appuyant sur les fonctions remplies par les sols (cycles biogéochimiques, cycle de l'eau). Aujourd'hui, il y a urgence à gérer durablement les ressources en sols (quantité, qualité, fonctions), les biens et services écosystémiques qu'ils fournissent pour répondre aux enjeux liés : 1) à la sécurité alimentaire (disponibilité des surfaces agricoles, érosion des sols, rendements et qualités des productions) ; 2) aux ressources en eau (quantité et qualité) ; 3) à l'adaptation aux changements climatiques (émissions de gaz à effet de serre, stockage de carbone) ; 4) à la santé humaine (qualité/état sanitaire des productions) ; 5) et à la préservation du patrimoine biologique (FAO, 2015 ; Courtoux et Claveirole, 2015).

La transition agroécologique constitue une réponse à ces enjeux en favorisant la durabilité économique, sociale et environnementale des exploitations agricoles (Projet Agroécologique pour la France, 2015 ; rapport Agriculture Innovation 2025 ; Initiative 4%, 2015 ; <https://www.gis-relance-agronomique.fr/Actualites/GIS-RA-SOL>). Elle peut être définie comme un ensemble de dynamiques de systèmes agricoles qui utilisent de manière plus efficiente les ressources naturelles, mobilisent les régulations biologiques et contribuent à maintenir et accroître les fonctionnalités des écosystèmes (Duru et al., 2014 ; Altieri, 1987). De ce fait, elle met naturellement de côté la vision du sol « support » des productions et la remplace par celle d'un écosystème « piloté de manière à fournir durablement diverses catégories de biens et de services précisément qualifiés » (Millenium Ecosystem Assessment, 2005). Elle replace ainsi l'état et le fonctionnement biologique des sols des agroécosystèmes au même niveau que les caractéristiques abiotiques de ces derniers (propriétés physiques et chimiques). En effet, l'extrême biodiversité des sols est à la base de la diversité des fonctions biologiques (Chemidlin Prévost-Bouré et al., 2010 ; Maron et al., 2011 ; Vivant et al., 2013 ; Barot et al., 2007, Cortet et al., 1999 ; JRC, 2017) et de leur intensité (Philipot et al., 2013 ; Tardy et al., 2014). En plus de cette importance stratégique, la biodiversité des sols est une assurance écologique (Loreau, 2010) pour des agro-écosystèmes fonctionnels et durables en assurant la stabilité du fonctionnement du sol face à des perturbations (e.g. pollutions, changements climatiques).

Appréhender l'impact des pratiques agricoles sur l'état biologique et le fonctionnement des sols nécessite d'avoir à disposition des outils et des références pour les évaluer. Ces dernières années, les programmes GESSOL et ADEME-BIOINDICATEURS I et II ont permis d'identifier des bioindicateurs pouvant constituer des outils de pilotage des parcelles agricoles. Des programmes à grande échelle tels que le Réseau de Mesure de la Qualité des Sols (Arrouays et al., 2002 ; GISSOL 2010), ECOMIC-RMQS (ANR, ADEME, GISSOL), META-TAXOMIC-RMQS (France Génomique, ADEME, GISSOL) et RMQS-Biodiv (ADEME) ont quant à eux permis de constituer des référentiels pour la physico-chimie des sols, les microorganismes (bactéries et champignons) et la faune du sol. En plus des avancées conceptuelles en sciences des sols et en écologie, la mise en œuvre de ces bioindicateurs dans des programmes de recherche internationaux (Ecofinders), nationaux (ECOMIC-RMQS, RMQS-BIODIV, MOSAIC) et régionaux (MICSCAPE) a permis de démontrer l'impact des pratiques agricoles sur l'état biologique et le fonctionnement des sols. Ainsi, il est aujourd'hui acté que le travail du sol modifie l'abondance et la diversité des microorganismes du sol (Constancias et al., 2015), des lombriciens (Piron et al., 2009) et des nématodes (Villeneuve et al., 2015). De même, la fertilisation des sols et les rotations culturales sont des facteurs importants modulant l'abondance, la diversité et le fonctionnement des sols (Le Guillou et al., 2018 ; Piron et al., 2009 ; Villeneuve et al., 2013, 2015 ; Tardy et al., 2015). La caractérisation de ces différents impacts met aussi en évidence certains des leviers agronomiques permettant de préserver l'état biologique et le fonctionnement du sol (réduction du travail du sol, couverture végétale longue, allongement des rotations et fertilisations organiques fréquentes). Cette base de travail se doit d'être plus largement déployée pour affiner la gestion.

Dans ce contexte, le présent article propose une réflexion sur le pilotage biologique des sols, notamment en termes de besoins méthodologiques et techniques, ceci en s'appuyant sur des initiatives françaises passées ou en cours.

1. Des outils d'évaluation opérationnels en constante évolution

Les études d'écologie des sols ont permis de mettre en évidence la sensibilité des organismes du sol (abondance et diversité) aux pratiques agricoles (Piron et al., 2009 ; Dequiedt et al., 2011 ; Constancias et al., 2015 ; Villenave et al., 2013). L'accumulation d'observations dans une large gamme de conditions pédoclimatiques, au travers d'essais (référentiel Elipto[®], Elisol Environnement) et/ou du Réseau de Mesure de la Qualité des Sols, a permis de constituer des référentiels d'interprétation (MicroSol database[®], Morin et al., 2013 ; Base de Données EcoBioSoil...) s'appuyant sur des méthodes standardisées (Plassart et al., 2012 ; Terrat et al., 2012, NF EN ISO 23611-4/10/2011 ; <https://ecobiosoil.univ-rennes1.fr/page.php?60>). Ainsi, de nombreux organismes sont reconnus comme de bons bioindicateurs pour évaluer l'impact des pratiques agricoles (<https://www.ademe.fr/bioindicateurs-outils-biologiques-sols-durables-fiches-outils>). Néanmoins, peu d'entre eux sont aujourd'hui reconnus opérationnels au terrain par les acteurs du monde agricole. Les bioindicateurs actuellement opérationnels ont été sélectionnés conjointement avec les utilisateurs pour leur coût, leur intérêt et leur mise en œuvre. Cette sélection participative a notamment permis d'aboutir au tableau de bord opérationnel dans le cadre du programme AgrInnov (CASDAR, 2012-2015) comme le décrivent Cannavacciolo et al. (2017). Il comprend un grand nombre d'indicateurs élémentaires pour caractériser la physico-chimie des sols ; leur état structural ; la dégradation de la matière organique ; et l'état biologique/le fonctionnement biologique de la parcelle. Il présente aussi la particularité de proposer deux indicateurs de synthèse permettant aux utilisateurs d'avoir une lecture rapide et intégrative des résultats. Ces indicateurs de synthèse constituent une première avancée dans le pilotage biologique.

Néanmoins, dans les prochaines années, cette démarche est vouée à évoluer. L'accumulation de nouvelles références permettra le développement de modèles prédictifs permettant d'estimer des valeurs seuils à la parcelle pour chaque bioindicateur pour affiner le diagnostic. Pour illustrer cela, on peut citer les modèles développés par Horrigue et al. (2016) et Terrat et al. (2017) qui permettent d'estimer la biomasse moléculaire microbienne et la richesse taxonomique bactérienne des sols à la parcelle sur la base des analyses de terre, ceci afin de les confronter aux valeurs mesurées et d'évaluer l'impact des pratiques agricoles. De plus, cette évolution nécessitera dans les années à venir un effort conséquent en termes d'acquisition de données biologiques. Les développements méthodologiques et l'acquisition massive de références feront émerger à court terme de nouveaux bioindicateurs opérationnels et/ou de nouvelles métriques (e.g. réseaux d'interactions biologique ; Karimi et al., 2017, Ranjard et al., ce numéro). Ces nouveaux indicateurs permettront de prendre en compte de nouveaux organismes d'intérêt dans le sol, de nouvelles fonctions ; et ainsi d'appréhender plus en détails la complexité du sol. Ces nouveaux bioindicateurs opérationnels ou ces nouvelles connaissances devront aussi être utilisés dans des approches intégratives comme celle proposée par les indicateurs de synthèse évoqués plus haut. Cette évolution d'indicateurs de synthèse nécessitera *à fortiori* une réflexion approfondie sur les méthodes d'agrégation et la pertinence des informations pour éviter les redondances. Cette réflexion se devra aussi d'être étendue au développement de nouveaux indicateurs de synthèse. Par exemple, de nombreuses études mettent en exergue la place des organismes du sol dans la définition de l'état sanitaire des parcelles. Les différents groupes taxonomiques peuvent avoir des effets néfastes (pathogènes) mais aussi et surtout positifs (biocontrôle), néanmoins, il ne semble pas y avoir aujourd'hui d'approche permettant de prendre en compte l'état biologique/le fonctionnement biologique d'une parcelle pour en évaluer l'état sanitaire. Une telle approche représente un enjeu important car elle permettrait notamment d'appuyer les démarches de réduction d'usage des produits phytosanitaires. Enfin, le coût économique du pilotage biologique des sols est un enjeu majeur. Le

déploiement de biondicateurs est nécessairement indexé à un retour sur investissement satisfaisant. Il nécessite donc à la fois d'avoir des analyses les plus abordables possibles mais aussi un effet positif sur la performance économique des exploitations agricoles. Dans cette optique, les instituts de recherche ont engagé un transfert des méthodologies permettant de caractériser l'état biologique et le fonctionnement des sols auprès de laboratoires de prestation analytique (PIA AgroEcoSol). Mais l'évaluation du gain économique pour les exploitations agricoles est encore en suspens et devient de plus en plus pressante.

2. Des réseaux de recherche participative pour identifier des pratiques agricoles innovantes

Les instituts de recherche et les instituts techniques ont mis en place depuis plusieurs années des réseaux de sites expérimentaux (e.g. Les SOERE - Systèmes d'Observation et d'Expérimentation au long terme pour la Recherche en Environnement, sites expérimentaux des instituts techniques, plateformes d'expérimentation des coopératives ...). Ces réseaux de sites sont un levier d'innovation et de développement/déploiement en matière de pratiques agricoles et de systèmes de culture. Néanmoins, malgré leur nombre, ils ne permettent toujours pas d'évaluer simultanément un nombre très important de pratiques dans une grande diversité de contextes pédoclimatiques. Une approche complémentaire est celle des réseaux de recherche/expérimentation et développement participatifs. En effet, les 437 000 exploitations agricoles de France recensées en 2016 (Agreste, 2017, <http://agreste.agriculture.gouv.fr/recensement-agricole-2010/resultats-donnees-chiffrees/>) sont autant de sites d'expérimentation et d'innovations potentielles qu'il est important d'explorer et de saisir. Pour cela, les approches participatives constituent un outil de choix. Elles permettent à la fois de fédérer les utilisateurs autour d'une thématique dans une démarche ascendante où ils sont décideurs et forces de proposition. Ceci permet alors d'accélérer l'appropriation des résultats et leur mise en œuvre. Pour exemple, le programme AgrInnov (CASDAR 2012-2015) s'appuie sur un réseau participatif d'agriculteurs qui ont mis en œuvre le tableau de bord AgrInnov en autonomie. Il a ainsi permis de montrer qu'un bon état et un bon fonctionnement biologique du sol d'une parcelle n'est pas inféodé à un itinéraire technique particulier (Cannavacciuolo et al., 2017). Ceci laisse entendre que le pilotage biologique des sols ne devrait pas nécessiter de changement brutal dans les techniques mises en œuvre à l'échelle de l'exploitation. Par ailleurs, ce programme a permis de montrer que l'approche participative permet d'induire des changements rapides au sein de certaines exploitations. Une enquête (n=66) réalisée en sortie de projet (18 mois) a permis de mettre en évidence des changements de pratiques liés à la biologie des sols dans 60% des exploitations (couverts végétaux, travail du sol, gestion des intrants, modification de rotations) ; 30% des participants n'ayant rien modifié en raison de bons résultats. Les réseaux de recherche participative sont donc une force indéniable et complémentaire pour l'identification et la dissémination de pratiques agricoles, en particulier pour le pilotage biologique des sols. Néanmoins, une appropriation aussi rapide des outils et des résultats nécessite des actions de formation et d'échanges soutenues des agriculteurs et des conseillers.

Enfin, un pilotage biologique des sols durables nécessite d'évaluer si les modifications de pratiques agricoles permettent d'atteindre les objectifs visés à court et moyen terme (environnementaux, économiques). Pour ce faire, le monitoring des réseaux de parcelles est essentiel et s'appuiera nécessairement sur un large déploiement des actions de formation auprès des acteurs et sur la mise à disposition des outils de pilotage biologique, ceci dans une approche participative. En effet, le monitoring participatif d'un réseau d'exploitation en collaboration avec les conseillers agricoles permettra de définir des plans d'action au sein de chacune d'entre-elles et d'évaluer directement leur impact sur la qualité biologique des sols, tout en bénéficiant du retour d'expérience des autres fermes du réseau. C'est notamment l'objectif du Réseau d'Expérimentation et de Veille à l'innovation Agricole (REVA, Observatoire Français des Sols Vivants) qui a démarré en 2016 avec un premier groupe suivi sur 5 ans en Gascogne et s'est étoffé en 2017 avec deux groupes d'agriculteurs en Pays de la Loire et

3 nouveaux groupes en 2018, et en Bourgogne Franche-Comté avec 5 groupes d'agriculteurs et de viticulteurs (3 en 2018 et 2 en 2019).

3. Des outils d'aide à la décision et un conseil pour le pilotage biologique des sols

Avec le développement de l'agriculture de précision, le conseil agronomique tend à mettre en œuvre de plus en plus d'Outils d'Aide à la Décision (e.g. OAD pour moduler de la fertilisation azotée) adossés/intégrés aux logiciels de gestion parcellaire. Promouvoir un pilotage biologique des sols nécessitera à court terme d'être en mesure de proposer de tels OAD pour la gestion des composantes biologiques des sols, auquel devra être associé un conseil agronomique adapté aux objectifs des agriculteurs. Pour répondre à cette attente des acteurs du monde agricole, les approches participatives de monitoring prennent toute leur importance. D'une part, par l'acquisition de données massives dans le temps, elles permettent de caractériser les réponses des indicateurs biologiques et de synthèse aux changements de pratiques et de les modéliser. D'autre part, les évolutions techniques et conceptuelles permettent de coupler simplement ces différents modèles (Marilleau et al., 2008 ; Hassoumi, 2015) et de co-construire les OAD dans une démarche de modélisation participative impliquant tous les acteurs tant pour la structuration des outils que pour la définition des règles de décision (Etienne, 2010). Ainsi, il est possible d'aboutir à des OAD répondant au mieux aux besoins et aux enjeux des acteurs et des futurs utilisateurs, cette co-construction favorisant généralement l'acceptation et l'utilisation de l'OAD. Dans les années à venir, une telle approche va voir le jour en bénéficiant des acquis antérieurs (programme AgrInnov) et des actions en cours (Réseau d'Expérimentation et de Veille à l'Innovation Agricole, notamment) à la fois dans l'acquisition des données et dans la construction des outils (Métaprogramme INRA, Observatoire Français des Sols Vivants). D'autre part, le monitoring participatif des parcelles agricoles offre l'opportunité de co-construire le conseil agronomique avec les agriculteurs. Fédérés autour d'un objectif/d'une question, les agriculteurs mettent en œuvre un plan d'action avec leurs conseillers en prenant en compte l'état/le fonctionnement biologique de leur parcelle et leurs objectifs/des contraintes individuelles (économiques, environnementales...). L'évaluation de l'efficacité du plan d'action à une échelle individuelle ou d'un groupe *via* le monitoring des parcelles permettra alors d'identifier les pratiques les plus efficaces au regard des objectifs visés et de co-construire le conseil agronomique associé au pilotage biologique de sols. Cette construction bottom-up du conseil agricole pourra s'appuyer sur les laboratoires de prestation analytique qui acquièrent aujourd'hui les méthodologies de caractérisation de la biologie des sols à haut débit et pourra être comparé aux conseils agronomiques proposés par les laboratoires afin d'accentuer la dynamique d'innovation ou l'identification de pratiques novatrices.

Conclusion

Aujourd'hui, les outils permettant d'appréhender l'état et le fonctionnement biologique des sols évoluent et sont de plus en plus faciles d'accès. Les enjeux aujourd'hui résident à la fois dans leur constante évolution/mise à jour, en particulier au travers d'approches intégratives innovantes et leur meilleure dissémination pour favoriser leur utilisation. Ceci est particulièrement dépendant de l'exploration des possibles au sein de réseaux de recherche participative impliquant tous les acteurs du monde agricole : chercheurs, conseillers, agriculteurs. En effet, en constituant une force d'expérimentation et d'échanges, le développement des réseaux de recherche participatives permettra à la fois de faire évoluer les outils de pilotage biologique des sols en concertation avec les utilisateurs pour répondre à leurs attentes mais aussi de construire le conseil agronomique associé.

Références bibliographiques

- Altieri M.A., Norgaard R.B., 1987. *Agroecology: The scientific basis of alternative agriculture*. Boulder, Colo: Westview Press.
- Arrouays D., Jolivet C., Boulonne L., Bodineau G., Saby N., Grolleau E., 2002 A new projection in France: a multi-institutional soil quality monitoring network. *Comptes Rendus de l'Académie d'Agriculture de France (France)* 88.
- Barot S., Rossi J.P., Lavelle P., 2007. Self-organization in a simple consumer–resource system, the example of earthworms. *Soil Biol Biochem* 39, 2230-2240.
- Baumann K., Dignac M.F., Rumpel C., Bardoux G., Sarr A., Steffens M., Maron P.A., 2012. Soil microbial diversity affects soil organic matter decomposition in a silty grassland soil. *Biogeochemistry* 114, 201-2012.
- Bouchez T., Bliex A.L., Dequiedt S., Domaizon I., Dufresne A., Ferreira S., Godon J.J., Hellal J., Joulain 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., Ranjard L., 2016. Molecular microbiology for environmental diagnosis. *Environmental Chemistry Letters* 14, 423-441.
- Cannavacciuolo M., Cassagne N., Riou V., Mulliez P., Chemidlin Prévost-Bouré N., Dequiedt S., Villenave C., Cérémonie H., Cluzeau D., Cyilly D., Vian J., Peigné J., Gontier L., Fourrié L., Maron P.-A., D'oiron Verame E., Ranjard L., 2017. 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 : 41-54.
- Chemidlin Prévost-Bouré N., Maron P.A., Ranjard L., Nowak V., Dufrêne E., Damesin C., Soudani K., Lata J.-C., 2010. Seasonal dynamics of bacterial community in forest soil under different leaf litter amounts: towards linking microbial community and soil functioning, *Applied Soil Ecology* 47, 14-23.
- Constancias F., Saby N.P.A., Terrat S., Dequiedt S., Horrigue W., Nowak V., Guillemin J.P., Biju-Duval L., Chemidlin Prévost-Bouré N., Ranjard L., 2015. Contrasting Spatial Patterns and Ecological Attributes of Soil Bacterial Taxa Across a Landscape. *MicrobiologyOpen* 4, 518-531.
- Cortet J., Gomot-De Vaullery A., Poinot-Balaguer N., Gomot L., Texier C., Cluzeau D., 1999. The use of invertebrate soil fauna in monitoring pollutant effects. *Europ J Soil Biol* 35, 115-134.
- Courtoux A., Claveirole C., 2015. *La bonne gestion des sols agricoles: un enjeu de société*. Ed Les avis du Conseil Economique Social et Environnemental, 64p.
- Dequiedt S., Saby N.P.A., Lelievre M., Jolivet C., Thioulouse J., Toutain B., Arrouays D., Bispo A., Lemanceau P., Ranjard L., 2011. Biogeographical Patterns of Soil Molecular Microbial Biomass as Influenced by Soil Characteristics and Management. *Global Ecology and Biogeography* 20, 641-652.
- Duru M., Fares M., Therond O., 2014. Un cadre conceptuel pour penser maintenant (et organiser demain) la transition agroécologique de l'agriculture dans les territoires. *Cah Agric* 23 : 84-95. doi : 10.1684/agr.2014.0691
- FAO, ITPS, 2015. *Etat des ressources en sols dans le Monde*, FAO, 2015, ISBN : 978-92-5-208960-5. <http://www.fao.org/3/a-i5126f.pdf>
- Gardi C., Montanarella L., Arrouays D., Bispo A., Lemanceau P., Mulder C., Ranjard L., Rombke L., Loreau M., 2000. Biodiversity and ecosystem functioning: recent theoretical advances *Oikos* 91, 3-17.
- Guilland C., Maron P.A., Damas O., Ranjard L., 2018. Biodiversity of urban soils for sustainable cities. *Environmental Chemistry letters*. doi.org/10.1007/s10311-018-0751-6
- Horrigue W., Dequiedt S., Chemidlin Prévost-Bouré N., Jolivet C., Saby N.P.A., Arrouays D., Bispo A., Maron P.A., Ranjard L., 2016. Predictive Model of Soil Molecular Microbial Biomass. *Ecological Indicators*. 64 :203-211.
- Jolivet C., Arrouays D., Boulonne L., Ratié C., Saby N.P.A., 2006. Le réseau de mesures de la qualité des sols de France. *Etude et Gestion des Sols*, 13, 149-164.
- Karimi B., Maron P.A., Chemidlin Prévost Bouré N., Bernard N., Gilbert D., Ranjard L., 2017. Microbial diversity and ecological networks as indicators of environmental quality, *Environ Chemistry Letters* 15, 265-281

- Karimi B., Terrat S., Dequiedt S., Saby N.P.A., Horrigue W., Lelievre M., Nowak V., Jolivet C., Arrouays D., Wincker P., Cruaud C., Bispo A., Maron P.A., Chemidlin-Prevost Bouré N., Ranjard L., 2018. Spatial Distribution and Environmental Drivers of Soil Bacterial and Archaeal Phyla across France. *Science Advances*, Vol. 4, no. 7, eaat1808, DOI: 10.1126/sciadv.aat1808
- Karimi B., Terrat S., Dequiedt S., Jolivet C., Arrouays D., Wincker P., Cruaud C., Bispo A., Chemidlin-Prévost Bouré N., Ranjard L., 2018. Biogeography of Soil Bacterial Networks Driven by Land Use. *Soil Biol Biochem*, in revision.
- Karimi B., Terrat S., Dequiedt S., Chemidlin N., L Ranjard., 2018. Atlas Français des bactéries du sol, à paraître (édition Biotope), à paraître Décembre 2018
- Le Guillou C., Chemidlin Prévost-Bouré N., Karimi B., Akkal-Corfini N., Dequiedt S., Nowak V., Terrat S., Menasseri-Aubry S., Viaud V., Maron P.-A., Ranjard L. Tillage intensity and pasture in rotation effectively shape soil microbial communities at a landscape scale. *MicrobiologyOpen*. 2018;e676. <https://doi.org/10.1002/mbo3.676>
- Lienhard P., Terrat S., Chemidlin Prévost-Bouré N., Nowak V., Régnier T., Sayphoummie S., Panyasiri K., Tivet F., Mathieu O., Levêque J., Maron P.A., Ranjard L., 2014. Pyrosequencing evidences the impact of cropping on soil bacterial and fungal diversity in Laos tropical grassland. *Agronomy for Sustainable Development*, 34, 525-533. (DOI 10.1007/s13593-013-0162-9)
- Loreau M., 2010. Linking biodiversity and ecosystems: towards a unifying ecological theory. *Philosophical transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological sciences*, 365, 49–60.
- Maron P.A., Mougél C., Ranjard L., 2011. Soil microbial diversity: spatial overview, driving factors and functional interest. *CRAS Biology II*. 334, 403-411.
- Millenium Ecosystem Assessment, 2005. *Ecosystems and Human Well-Being: Biodiversity Synthesis*. Ecosystems, 285.
- Morin F., Dequiedt S., Koyao-Darinst V., Toutain B., Terrat S., Lelièvre M., Nowak V., Faivre-Primot C., Lemanceau P., Maron P.A., Ranjard L., 2013. MicroSol database, le Premier Système d'Information Environnemental sur la Microbiologie des Sols. *Etude et Gestion des Sols*, 20, 27-38
- Orgiazzi A., Bardgett R.D., Barrios E., Behan-Pelletier V., Briones M.J.I., Chotte J-L., De Deyn G.B., Eggleton P., Fierer N., Fraser T., Hedlund K., Jeffery S., Johnson N.C., Jones A., Kandeler E., Kaneko N., Lavelle P., Lemanceau P., Miko L., Montanarella L., Moreira F.M.S., Ramirez K.S., Scheu S., Singh B.K., Six J., van der Putten W.H., Wall D.H. (Eds.), 2016, *Global Soil Biodiversity Atlas*. European Commission, Publications Office of the European Union, Luxembourg. 176 pp.
- Piron D., 2008. Distribution de la drilosphère lombricienne et caractérisation bio-physique des faciès de bioturbation sous gradient de désintensification du travail mécanique des sols. *Ecologie, Environnement*. Université Rennes 1, 164pp.
- Philippot L., Spor A., Hénault C., Bru D., Bizouard F., Jones C.M., Sarr A., Maron P.A., 2013. Loss in microbial diversity affects nitrogen cycling in soil. *The ISME Journal* 7, 1609-1619
- Plassart P., Terrat S., Thomson B., Griffiths R., Dequiedt S., Lelievre M., Regnier T., Nowak V., Bailey M., Lemanceau P., Bispo A., Chabbi A., Maron P.A., Mougél C., Ranjard L., 2012. Evaluation of the ISO Standard 11063 DNA Extraction Procedure for Assessing Soil Microbial Abundance and Community Structure. *PLoS ONE*, 7.
- Ranjard L., Dequiedt S., Jolivet C., Saby N.P.A., Thioulouse J., Harmand J., Loisel P., Rapaport A., Fall S., Simonet P., Joffre R., Chemidlin-Prévost Bouré N., Maron P.A., Mougél C., Martin M.P., Toutain B., Arrouays D., Lemanceau P., 2010. Biogeography of Soil Microbial Communities: a Review and a Description of the Ongoing French National Initiative. *Agronomy for Sustainable development*. 30, 359-365
- Ranjard L., Maron P.A., Cuny P., 2017. *La microbiologie moléculaire au service du diagnostic environnemental*. Edition ADEME, 235p.
- Ranjard L., Terrat S., Karimi B., Dequiedt S., Chemidlin N., Horrigue W., Djemiel C., 2018. La caractérisation des communautés microbiennes du sol à l'échelle de la France pour évaluer l'effet de l'usage des sols. *Innovations Agronomiques* 69, 27-37

Ratié C., Richer de Forges A., Berché P., Boulonne L., Toutain B., Saby N., Chenu J.-P., Laloua D., Ortolland B., Tientcheu Nguenkam M.-E., Soler-Dominguez N., Jolivet C., Arrouays D., 2010. Le Conservatoire des Sols : la mémoire des sols de France. *Étude et Gestion des Sols*, 17 (3), 263-273.

Rutger M., Menta C., 2009. Soil Biodiversity monitoring in Europe: ongoing activities and challenges. *European Journal of Soil Science*, 60, 807-819.

Tardy V., Mathieu O., Lévêque J., Terrat S., Chabbi A., Lemanceau P., Ranjard L., Maron P.A., 2014. Stability of soil microbial structure and activity depends on microbial diversity. *Environmental Microbiology Reports*, 6, 173–183.

Tardy V., Chabbi A., Charrier X., de Berranger C., Reignier T., Dequiedt S., Faivre-Primot C., Terrat S., Ranjard L., Maron P.A., 2015. Land Use History Shifts In Situ Fungal and Bacterial Successions following Wheat Straw Input into the Soil. *PLOS ONE*, 10, e0130672.

Terrat S., Dequiedt S., Saby N., Horrigue W., Lelievre M., Nowak V., Tripied J., Regnier T., Jolivet C., Arrouays D., Wincker P., Cruaud C., Karimi B., Bispo A., Maron P.A., Chemidlin Prévost-Bouré N., Ranjard L., 2017. Mapping and Predictive Variations of Soil Bacterial Richness across French National Territory. *PlosOne* 12(10): e0186766

Terrat S., Christen R., Dequiedt S., Lelièvre M., Nowak V., Regnier T., Bachar D., Plassart P., Wincker P., Jolivet C., Bispo A., Lemanceau P., Maron P.A., Mougél C., Ranjard L., 2012. Molecular biomass and MetaTaxogenomic assessment of soil microbial communities as influenced by soil DNA extraction procedure. *Microbial Biotechnology*, 5, 135–141.

Villenave C., 2015. Applicabilité à l'étude des sites pollués du bio-indicateur nématofaune : année 2014 (Projet GESIPOL APPOLINE) Rapport, ADEME.

Villenave C., Jimenez A., Guernion M., Pérès G., Cluzeau D., Mateille T., Martiny B., Fargette M., Tavoillot J., 2013. Nematodes for soil quality monitoring: results from the RMQS BioDiv programme. *Open Journal of Soil Science* 3: 30-45.

Vivant A.L., Garmyn D., Maron P.A., Nowak V., Piveteau P., 2013. Microbial Diversity and Structure Are Drivers of the Biological Barrier Effect against *Listeria monocytogenes* in Soil. *PLoS ONE*, 8.

Cet article est publié sous la licence Creative Commons (CC BY-NC-ND 3.0).



<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/fr/>

Pour la citation et la reproduction de cet article, mentionner obligatoirement le titre de l'article, le nom de tous les auteurs, la mention de sa publication dans la revue « *Innovations Agronomiques* », la date de sa publication, et son URL ou DOI).