

Comment développer un suivi de la biodiversité des sols français en s'appuyant sur le Réseau de Mesures de la Qualité des Sols (RMQS) ?

C. Imbert^(1*), L. Santorufo⁽²⁾, C. Ortega⁽¹⁾, C. Jolivet^(1*), A. Auclerc⁽³⁾, N. Bougon⁽⁴⁾, Y. Capowiez⁽⁵⁾, N. Cheviron⁽⁶⁾, D. Cluzeau⁽⁷⁾, J. Cortet⁽⁸⁾, G. Deronzier⁽⁴⁾, M. Hedde⁽⁹⁾, A. Lévêque⁽¹⁰⁾, F. Maunoury-Danger⁽¹¹⁾, C. Mougin⁽⁶⁾, L. Palka⁽¹²⁾, G. Pérès⁽¹³⁾, L. Ranjard⁽¹⁴⁾, B. Vanhée⁽¹⁵⁾, C. Villenave⁽¹⁶⁾, S. Wroza⁽¹⁰⁾ et A. Bispo^(1*)

- 1) INRAE Info&Sols, F-45000 Orléans, France
- 2) Département de Biologie, Université de Naples Federico II, 80126 Naples, Italie
- 3) INRAE Université de Lorraine ENSAIA, LSE, 54500 Vandoeuvre-lès-Nancy, France
- 4) OFB, 94300 Vincennes, France
- 5) INRAE, EMMAH, 84000 Avignon, France
- 6) INRAE, EcoSys, Plateforme Biochem-Env, 78000 Versailles, France
- 7) Université de Rennes, ECOBIO, 35380 Plélan-le-Grand, France
- 8) Université Paul Valéry Montpellier 3, CEFE, 34000 Montpellier, France
- 9) INRAE Montpellier SupAgro Cirad, Eco&Sols, 34000 Montpellier, France
- 10) Patrinat (OFB-CNRS-MNHN), 75005 Paris, France
- 11) Université de Lorraine, CNRS, LIEC, 57000 Metz, France
- 12) MNHN, CNRS Sorbonne Université, CESCO, 75005 Paris, France
- 13) INRAE, Agrocampus Ouest, SAS, 35000 Rennes, France
- 14) INRAE, Agroécologie, 21000 Dijon, France
- 15) Université Catholique de Lille, Ecologie et Biodiversité 59000 Lille, France
- 16) Elisol Environnement, 30111 Congénies, France

* Auteurs correspondants :
cimberty@hotmail.fr
claudy.jolivet@inrae.fr
antonio.bispo@inrae.fr

Comment citer cet article :

Imbert C., Santorufo L., Ortega C., Jolivet C., Auclerc A., Bougon N., Capowiez Y., Cheviron N., Cluzeau D., Cortet J., Deronzier G., Hedde M., Lévêque A., Maunoury-Danger F., Mougin C., Palka L., Pérès G., Ranjard L., Vanhée B., Villenave C., Wroza S. et Bispo A., 2023 - Comment développer un suivi de la biodiversité des sols français en s'appuyant sur le Réseau de Mesures de la Qualité des Sols (RMQS) ? Étude et Gestion des Sols, 30, 383-401

RÉSUMÉ

Pour répondre au besoin de connaissances sur la biodiversité des sols, nous explorons la possibilité d'adosser un suivi de la biodiversité des sols au Réseau de Mesures de la Qualité des Sols (RMQS). Ce couplage a pour objectif de bénéficier du caractère opérationnel du RMQS et de croiser les informations sur la biodiversité avec les données déjà disponibles sur les sols. Des mesures de biodiversité sont d'ailleurs déjà effectuées sur les sites du RMQS. Un groupe de travail incluant des experts nationaux a conçu un questionnaire pour évaluer la compatibilité du plan d'échantillonnage du RMQS avec la surveillance de la biodiversité des sols et définir les caractéristiques de ce nouveau suivi (taxons et fonctions à suivre, protocoles, besoins matériels, humains et financiers). Ces mêmes experts ont ensuite répondu au questionnaire et les informations collectées ont été complétées lors d'entretiens individuels. Les avancées du projet ont été validées en réunions plénières. Au sortir de ces réflexions, il a été conclu que le plan d'échantillonnage du RMQS (maille de 16 km x 16 km, site d'étude de 400 m², ré-échantillonnage de chaque site tous les 15 ans) convenait à un suivi de la biodiversité des sols. Cependant, les experts écologues ont mis en avant la nécessité d'effectuer l'échantillonnage de la mésofaune et de la macrofaune au printemps. Ils recommandent cinq protocoles qui permettent de suivre les micro-organismes, la microfaune, la mésofaune et la macrofaune du sol. Une mesure de la flore a aussi été intégrée avec le suivi de la banque de graines. Trois fonctions (macroporosité du sol due à l'activité des vers de terre, activités enzymatiques et dégradation de la matière organique) seraient également mesurées. Si le RMQS-Biodiversité est mis en place de manière pérenne et déployé sur les 2240 sites métropolitains, il devrait permettre de documenter de manière robuste la biogéographie des organismes du sol, de décrypter leurs liens avec les pratiques agricoles et possiblement la découverte de nouvelles espèces. Une réflexion complémentaire devra être engagée pour les sites ultra-marins.

Mots-clés

Caractéristiques physico-chimiques des sols, biogéographie, micro-organismes, mésofaune, macrofaune, porosité du sol, dégradation de la matière organique, activités enzymatiques, flore.

SUMMARY

HOW TO DEVELOP A BIODIVERSITY MONITORING OF FRENCH SOILS, RELYING ON THE FRENCH SOIL QUALITY MONITORING NETWORK (RMQS) ?

To meet the need for knowledge about soil biodiversity, we are exploring the possibility of linking a soil biodiversity monitoring to the French Soil Quality Monitoring Network (called RMQS). The aim of this linkage is to benefit from the operational nature of the RMQS and to cross information on biodiversity with data already available on soils. Biodiversity measurements are already being carried out at RMQS sites. A working group including national experts has designed a questionnaire to assess the compatibility of the RMQS sampling plan with soil biodiversity monitoring and to define the characteristics of this new monitoring (taxa and functions to be monitored, protocols, material, human and financial requirements). These same experts then answered the questionnaire and the information gathered was supplemented during individual interviews. The project's progress was validated during plenary meetings. It was concluded that the RMQS sampling plan (16kmx16km grid, 400 m² study site, resampling of each site every 15 years) was suitable for monitoring soil biodiversity. However, the ecologist-experts stressed the need to sample the mesofauna and macrofauna in spring. They recommended five protocols for monitoring soil micro-organisms, microfauna, mesofauna and macrofauna. A flora measurement was also integrated with seed bank monitoring. Three functions (soil macroporosity due to earthworm activity, enzymatic activity and organic matter degradation) will also be measured. If the RMQS-Biodiversity is set up on a permanent basis and deployed on the 2,240 sites in mainland France, it should provide robust documentation of the biogeography of soil organisms, deciphering their links with agricultural practices and possibly leading to the discovery of new species. Additional work is required for sites in the French overseas territories.

Key-words

Soil physico-chemical characteristics, biogeography, microorganism, mesofauna, macrofauna, soil macroporosity, organic matter degradation, enzymatic activities, flora.

RESUMEN

¿CÓMO DESARROLLAR UN SEGUIMIENTO DE LA BIODIVERSIDAD DE LOS SUELOS FRANCESES APOYÁNDOSE EN LA RED DE MEDICIONES DE LA CALIDAD DE LOS SUELOS (RMQS)?

Para responder a la necesidad de conocimiento sobre la biodiversidad de los suelos, estamos explorando la posibilidad de apoyar un seguimiento de la biodiversidad de los suelos en la Red de Mediciones de la Calidad de los Suelos (RMQS). Este acoplamiento tiene por objeto aprovechar el carácter operativo del RMQS y cotejar la información sobre la biodiversidad con los datos ya disponibles sobre los suelos. Además, mediciones de biodiversidad ya se están realizando en los sitios del RMQS. Un grupo de trabajo integrado por expertos nacionales elaboró un cuestionario para evaluar la compatibilidad del plan de muestreo del RMQS con la vigilancia de la biodiversidad del suelo y definir las características de este nuevo seguimiento (taxones y funciones a seguir, protocolos, necesidades materiales, humanas y financieras). Los mismos expertos respondieron al cuestionario y la información reunida se completó mediante entrevistas individuales. Los avances del proyecto se validaron en sesiones plenarias. Tras estas reflexiones, se concluyó que el plan de muestreo del RMQS (malla de 16kmx16km, sitio de estudio de 400 m², re-muestreo de cada sitio cada 15 años) era adecuado para un seguimiento de la biodiversidad de los suelos. Sin embargo, los expertos en ecología destacaron la necesidad de tomar muestras de mesofauna y macrofauna en primavera. Recomiendan cinco protocolos que permiten seguir los microorganismos, la microfauna, la mesofauna y la macrofauna del suelo. Una medición de la flora también se ha integrado con el seguimiento del banco de semillas. También se medirían tres funciones (macroporosidad del suelo debida a la actividad de las lombrices de tierra, actividades enzimáticas y degradación de la materia orgánica). Si el RMQS-Biodiversidad se establece de manera sostenible y se despliega en los 2 240 sitios metropolitanos, debería permitir documentar de manera sólida la biogeografía de los organismos del suelo, descifrar sus vínculos con las prácticas agrícolas y posiblemente el descubrimiento de nuevas especies. Deberá iniciarse una reflexión complementaria para los lugares ultramarinos

Palabras clave

Características fisicoquímicas de los suelos, biogeografía, microorganismos, mesofauna, macrofauna, porosidad del suelo, degradación de la materia orgánica, actividades enzimáticas, flora.

1. INTRODUCTION

De nombreux services écosystémiques de support, de régulation, d'approvisionnement et culturels sont fournis par la biodiversité des sols (El Mujtar *et al.*, 2019). Partout sur la planète, les vers de terre, en consommant la matière organique et en stimulant les micro-organismes, jouent un rôle majeur dans la production primaire, la fixation du carbone atmosphérique et *in fine*, la régulation du climat (Blouin *et al.*, 2013). Plus largement, les services écosystémiques rendus par les sols augmentent avec leur biodiversité (Wagg *et al.*, 2014).

La biodiversité des sols correspond à toutes les formes de vie présentes dans les sols (des gènes aux communautés), à la diversité des habitats (des micro-agrégats aux paysages) et aux interactions entre toutes ces composantes (Turbé *et al.*, 2010). Le sol est un compartiment écologique organisé, dynamique et complexe qui héberge une partie substantielle de la biodiversité terrestre en terme de taxons, de biomasse et de fonctions : des centaines de milliers, voire de millions d'espèces vivraient dans une poignée de sol (Gardi et Jeffery, 2009 ; Guerra *et al.*, 2020). Cependant, nous en savons très peu sur la biogéographie, les habitats et les modes de vie des organismes du sol et un gros travail d'inventaire taxonomique et de description des communautés et des fonctions reste à faire (Eisenhauer *et*

al., 2017 ; FAO, 2020). Pour lever ces zones d'ombre, des programmes de surveillance de la biodiversité des sols ont été menés dans plusieurs pays, sur une partie ou sur l'ensemble de leurs territoires (Tableau 1).

Les approches utilisées dans les différents programmes nationaux et internationaux diffèrent selon (i) les organismes et les fonctions suivies, (ii) les protocoles employés, (iii) les usages du sol et les milieux, (iv) le plan d'échantillonnage systématique (basé sur une grille) ou dirigé (avec des points d'échantillonnage choisis) et la taille de la maille et (v) la fréquence de rééchantillonnage de chaque site. En Europe, à l'exception des programmes RMQS, seuls LUCAS et Landmark s'appuient sur un échantillonnage systématique avec respectivement, une maille de 2 x 2 km et de 12x12 km (Orgiazzi *et al.*, 2018 ; Toth *et al.*, 2013). Les autres réseaux de suivis à grande échelle présentent un échantillonnage dirigé (Tableau 1). La majeure partie des programmes sont temporaires et ne peuvent donc pas renseigner l'évolution de la biodiversité des sols sur le long terme. Les programmes encore en cours sont le DSQN-BISQ aux Pays-Bas, NABO en Suisse, Biodiversity exploratories en Allemagne, BIODIVERSA + en Europe, NEON aux Etats-Unis et ECOMIC-RMQS en France.

Ainsi, au regard de la diversité des approches méthodologiques au sein de ces programmes, il est difficile

Tableau 1 Exemples de programmes de suivis de la biodiversité des sols à travers le monde
Table 1: *Examples of soil biodiversity monitorings across the world*

Programme	Pays	Organismes et fonctions	Usage du sol et milieux	Plan d'échantillonnage et nombre de sites	Association avec un suivi pédologique	Année d'échantillonnage	Source
EcoFINDERS : Ecological Function and Biodiversity Indicators in European Soils	Pays européens (dont la France métropolitaine)	Micro-organismes Mésofaune Macrofaune	Cultures Prairies Forêts	Dirigé 5 observatoires de long terme à partir de 81 sites sur un transect	Oui	2011-2014	https://cordis.europa.eu/project/id/264465/reporting https://projects.au.dk/ecofinders
Land Use and Coverage Area frame Survey (LUCAS)	Pays européens (dont la France métropolitaine)	Micro-organismes Nématodes Mésofaune Vers de terre	Cultures Zones arbutives Forêts Tourbières	Systematique environ 20 000 points	Oui	Depuis 2018	Orgiazzi et al., 2018 ; Toth et al., 2013
Landmark	Pays européens (dont la France métropolitaine)	Vers de terre Nématodes Micro-organismes	Cultures	Systematique 94 sites	Oui	2018-2020	http://landmark2020.eu/pillars/monitoring-soil-quality-soil-functions-pillar2/
ADEME BioIndicateurs	France	Micro-organismes Mésofaune Nématodes Macrofaune Activités enzymatiques	Milieux naturels Cultures Sols contaminés	Dirigé 13 sites	Oui	2009	https://ecobiosoil.univ-rennes1.fr/ADEME-Bioindicateur/
RMQS-Biodiv Bretagne	France (Bretagne)	Activités enzymatiques Acarions Collembolles Micro-organismes Nématodes Dégradation de la matière organique Vers de terre	Cultures Forêts Prairies Dunes Zones humides	Systematique 109 sites	Oui	2006-2007	Cluzeau et al., 2009
RMQS-EOMIC	France	Micro-organismes	Cultures Forêts Prairies Pâturages Friches Parcs et jardins Autres milieux naturels	Systematique 2240 sites	Oui	2000-2010	Karimi et al., 2018a
Programa de Pesquisa em Biodiversidade (PPBio)	Brésil (Amazonie)	Dégradation de la matière organique Macrofaune de surface	Forêts Cerrado Prairies	Systematique 169 sites	Non	2004	https://ppbio.inpa.gov.br/en/home
Croatian soil monitoring	Croatie	Micro-organismes	Forêts Cultures Vignes Pâturages Sols contaminés	Dirigé Environ 472 sites	Oui	2006	Mesić et al., 2008

CreBeo Soil diversity project	Irlande	Champignons mycorhiziens Micro-organismes Nématodes Vers de terre Collembolles Acaréens Fourmis	Cultures Forêts Pâturages Tourbières	Systématique 61 sites	Oui	2007-2013	Schmidt et al., 2011
DSON-BISQ (Dutch Soil Quality Network – Biological Indicator of Soil Quality)	Pays-Bas	Micro-organismes Nématodes Acaréens Collembolles Vers de terre Dégradation de la matière organique	Cultures Forêts Tourbières Parcs Pâturages	Dirigé Environ 300 sites	Oui	Depuis 1997	Rutgers et al., 2009
Pilbara Biodiversity Survey	Australie (Région de Pilbara)	Macrofaune de surface	Forêts Prairies Pâturages	Systématique 304 sites	Non	2002-2007	McKenzie et al., 2009
Countryside Survey- SQID (Scoping biological indicators of soil quality)	Royaume-Uni	Micro-organismes Nématodes Mésofaune Activités enzymatiques Respiration microbienne	Forêts Cultures Pâturages Prairies Zones humides Landes	Systématique-Dirigé 256 sites pour les deux premières campagnes, 591 pour la troisième	Oui	1998 et 2007	Emmett et al., 2010
Nationalen Bodenbeobachtung Schweiz (NABO)	Suisse	Micro-organismes Respiration microbienne	Grandes cultures Prairies permanentes Terrain ouvert non-exploité Forêts Cultures maraichères Vergers Vignes Zones d'agglomération	Dirigé 69 sites	Oui	Depuis 1985	Pulleman et al., 2012
Biodiversity exploratories	Allemagne (Trois aires protégées)	Micro-organismes Nématodes Mésofaune Vers de terre Macrofaune de surface	Prairies Forêts	Systématique 3000 sites	Oui	Depuis 2006	https://www.biodiversity-exploratories.de/en/
Pilote Biodiversa +	Europe (dont la France métropolitaine)	ADNe Macrofaune Dégradation de la matière organique	Forêts	Dirigé	Non	2023	https://www.biodiversa.eu/
NEON	Etats-Unis	Micro-organismes Coléoptères vivant en surface	Forêts Prairies Cultures Pépinière d'arbres	Dirigé 47 sites	Oui	Depuis 2019	https://www.neonscience.org/

de choisir un plan d'échantillonnage approprié. De plus, à notre connaissance, il n'existe pas de manuel expliquant la marche à suivre pour choisir ses caractéristiques. Or, le choix du plan d'échantillonnage est une étape cruciale, ayant un impact évident sur les résultats (comme la taille des mailles par exemple, Nielsen *et al.*, 2009 ; Soberón *et al.*, 2007).

En France, il n'existe pas de programme de surveillance pérenne de la biodiversité des sols. Un tel programme permettrait de grandes avancées sur la connaissance de la biodiversité des sols en métropole et dans les Outre-mers, compte tenu de la grande diversité de climats et de sols. En Métropole, le climat est océanique sur la partie occidentale et centrale, continental pour la partie orientale, méditerranéen au Sud et montagneux dans les Pyrénées, le Massif central et les Alpes. Le territoire français métropolitain compte 33 catégories de sols (geoportail.gouv.fr), selon la version de 2008 du référentiel pédologique français (Association Française pour l'Étude du Sol, 2008). De plus, les territoires d'outre-mer sont considérés comme des points chauds de biodiversité (Myers *et al.*, 2000 ; Orme *et al.*, 2005).

Cependant, le déploiement d'un programme de surveillance est coûteux et mobilise de nombreux intervenants. Il paraît alors opportun de l'adosser à un réseau existant, en s'assurant au préalable que le plan d'échantillonnage existant puisse convenir au nouveau suivi. Au-delà de l'avantage organisationnel, ce couplage permet d'avoir une vision des sols dans leurs trois dimensions : physique, chimique et biologique. Grâce au nombre important de sites échantillonnés, l'étude des liens entre ces différentes composantes des sols présente une puissance statistique élevée.

Parmi les 15 programmes de surveillance de la biodiversité cités, 13 étaient couplés à un suivi pédologique. En France, un candidat potentiel est le Réseau de Mesures de la Qualité des sols (RMQS), qui caractérise les sols français et leur évolution depuis 2000.

Le RMQS repose sur le suivi de 2 240 sites répartis selon une grille de 16x16 km sur le territoire français (un site au centre de chaque maille). Ces sites présentent des usages du sol variés : on y trouve des grandes cultures, des prairies, des parcs et jardins, des friches, des forêts, des vignes, des vergers et d'autres types de milieux naturels. Chaque site est échantillonné une fois par campagne soit tous les 15 ans. L'échantillonnage est effectué lorsque le sol est à la capacité au champ (Jolivet *et al.*, 2018). La première campagne du RMQS s'est déroulée de 2000 à 2015 en France métropolitaine et en Outre-mer (Guyane, Antilles, Réunion et Mayotte). La deuxième campagne a débuté en 2016. Pour chaque site, des prélèvements de sols sont effectués à la tarière pour réaliser des échantillons composites de sol, à différentes profondeurs (0-25 cm pour les grandes cultures ou 0-30 cm pour les autres usages du sol, 30-50 cm, 50-75 cm et 75 cm⁻¹ m). Pour chaque profondeur, les prélèvements de sol sont mélangés pour former un échantillon composite. Les

caractéristiques physico-chimiques des sols sont déterminées après analyse des échantillons composites. Des enquêtes sont effectuées auprès des agriculteurs pour appréhender leurs pratiques et leur mode de gestion des sols. Certaines parcelles, communes avec le réseau de suivi systématique des dommages forestiers, disposent d'un suivi floristique et sylvicole depuis 2000.

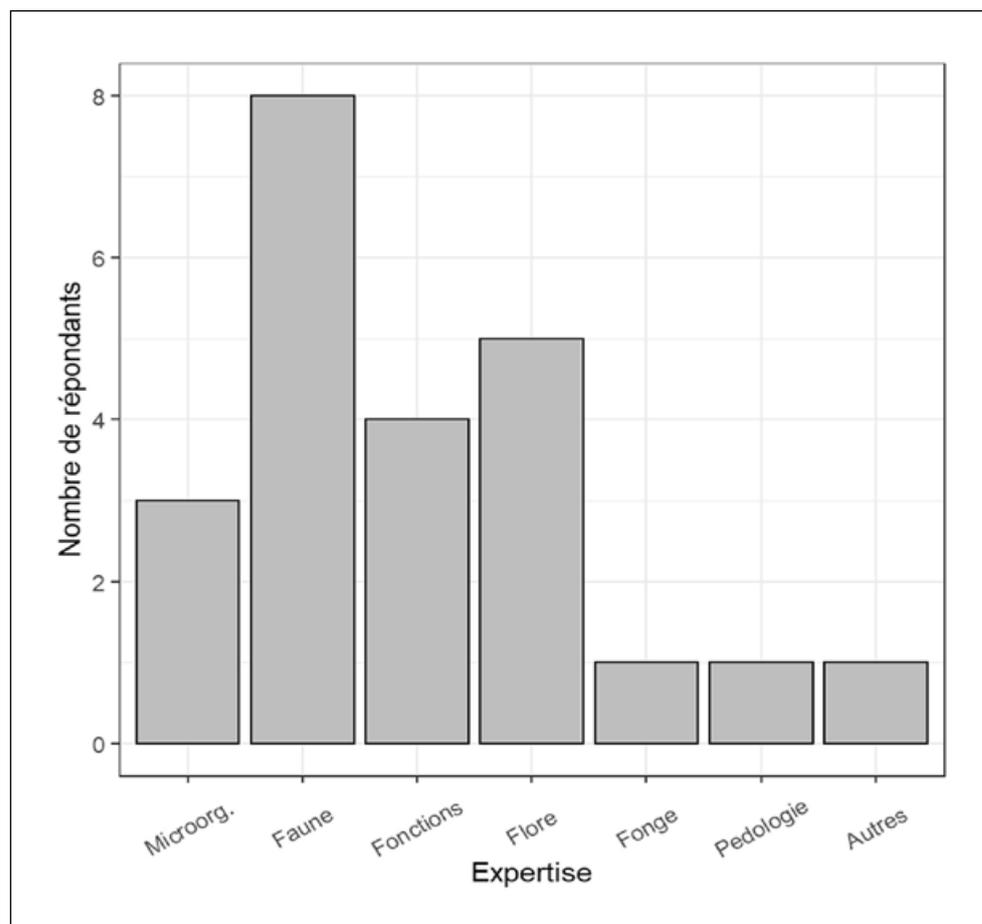
Six programmes se sont intéressés à la biodiversité des sites échantillonnés par le RMQS (Imbert *et al.*, 2021). Parmi eux, dans le cadre d'ECOMIC-RMQS, la communauté des bactéries et des archées a été déterminée pour 2240 sites (Karimi *et al.*, 2018a, 2018b) et une étude de caractérisation moléculaire des champignons du sol est en cours. Dans le RMQS-Biodiversité Bretagne, plusieurs groupes d'organismes (micro-organismes, acariens, collemboles, nématodes, vers de terre) ont été échantillonnés et des fonctions (dégradation de la matière organique et activités enzymatiques) mesurées pour 107 sites bretons. Les activités enzymatiques sont mesurées sur les échantillons de sol collectés depuis 2016.

Dans le cadre du développement d'un programme global de surveillance de la biodiversité terrestre en France (action inscrite dans le plan Biodiversité, juillet 2018) dont la mise en place est confiée à l'Office français de la biodiversité (OFB), la constitution d'un futur réseau de surveillance de la biodiversité des sols est apparue pertinente. Le centre national d'expertise et de données sur le patrimoine naturel Patrinat a également appuyé ce besoin dans le cadre de la rédaction d'une stratégie d'acquisition de connaissances naturalistes (Tourout *et al.*, 2017). Ainsi, l'OFB a demandé à INRAE d'évaluer la possibilité de déployer un tel réseau en l'adosant au RMQS, non plus à l'échelle de la Bretagne mais à celle de la métropole. Ce réseau se nomme le RMQS-Biodiversité. Nous décrivons ci-après la méthodologie employée pour créer et mettre en œuvre ce réseau. Ce test de faisabilité a pour but de répondre à trois questions principales :

- 1) Le plan d'échantillonnage pré-existant du RMQS peut-il convenir à un suivi de la biodiversité des sols, en particulier la maille de 16 x 16 km, le site d'étude de 20 x 20 m, le rééchantillonnage de chaque site tous les 15 ans et l'échantillonnage toute l'année (dès lors que l'humidité du sol est proche de la capacité au champ) ?
- 2) Quelles composantes de la biodiversité (organismes, fonctions) suivre et avec quels protocoles ?
- 3) Quel est le coût de ce suivi pour le maître d'œuvre (l'OFB) ?

Figure 1 : Champs d'expertise des experts-écologues appartenant au groupe de travail du RMQS-Biodiversité (la fonge correspond aux sporophores)

Figure 1 : Fields of expertise of experts-ecologists belonging to the working group of the RMQS-Biodiversity (Fungi corresponds to the sporophors)



2. MATÉRIELS ET MÉTHODES

Contraintes à prendre en compte dans le choix des protocoles

L'objectif est de combler les lacunes sur la connaissance des micro-organismes, microfaune, mésofaune et macrofaune des sols échantillonnés en même temps. La mise au point de nouveaux protocoles n'étant pas l'objectif du projet, n'ont été sélectionnés que ceux éprouvés et, si possible, certifiés par une norme ISO. Une contrainte complémentaire est qu'ils puissent être mis en œuvre sans nécessiter de compétences particulières, étant donné que les équipes de terrain du RMQS ne sont pas forcément familières des études de biodiversité.

Rassembler des experts-écologues

Un groupe de travail a été mis en place, composé de l'équipe de coordination, d'experts de la biodiversité des sols, de représentants des ministères de l'Ecologie et de l'Agriculture (membres du GIS Sol) et de chefs de projet de l'OFB. Trente

experts, travaillant sur le territoire français et dont les champs d'expertise pouvaient se recouper, ont été contactés (*Figure 1*).

Composé initialement de 23 experts-écologues, l'effectif a été complété au cours du projet. Parmi eux, onze assureront les analyses de biodiversité en laboratoire.

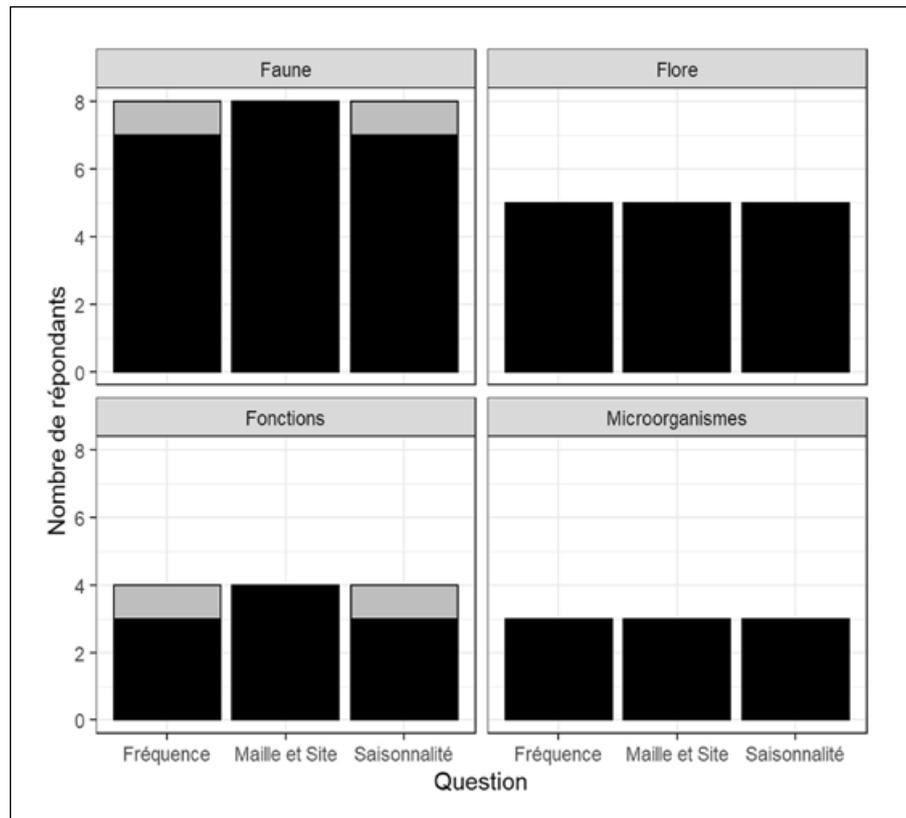
Rédiger un questionnaire avec le groupe d'experts de la biodiversité des sols, complété avec des entretiens individuels

Le groupe d'experts-écologues a été associé à la rédaction et validation d'un questionnaire qui vise à recueillir leurs opinions et leurs connaissances pour l'établissement d'un réseau de suivi de la biodiversité des sols (par exemple, la pertinence de tel organisme et telle fonction, le budget nécessaire, le mode de mise en œuvre, les limites d'interprétation) et également à préciser les détails des protocoles de terrain et de laboratoire pour chaque groupe d'organismes et fonction (*Annexe 1*).

Ce questionnaire est l'outil principal pour collecter les informations. Il permet d'avoir une grille d'entretien fixe et de limiter au maximum le risque d'oublier une information

Figure 2 : Nombre de réponses (noir : Oui et gris : Non) pour les micro-organismes, la faune du sol (micro, macro et mésofaune), la flore et les fonctions du sol à propos de l'adéquation entre le suivi de la biodiversité avec la maille de 16x16 km du RMQS et le site d'étude de 20x20 m (Question A4), la fréquence de ré-échantillonnage de 15 ans (Question A11) et à propos de la nécessité de saisonnaliser l'échantillonnage

Figure 2 : Number of answers (black : Yes and grey : No) for the microorganisms, soil fauna (micro, macro and mesofauna), flora and soil functions about the suitability of biodiversity monitoring with the 16x16km RMQS grid and the 20x20m study site (Question A4), the 15-year re-sampling frequency (Question A11), and about the need to seasonalize the sampling.



importante. Il comprend 59 questions réparties en quatre catégories: échantillonnage (16), laboratoire et analyse des données (23), coûts (5) et interprétation des résultats (15, annexe 1). Le questionnaire a été complété par des entretiens individuels qui ont permis de discuter des aspects plus pratiques tels que la durée des protocoles sur le terrain et de l'analyse en laboratoire, la charge de travail, la coordination avec le reste de l'équipe, les difficultés d'analyse, et de recueillir des suggestions sur la manière la plus efficace de travailler.

Animation du projet et validation régulière des avancées

Cinq réunions rassemblant le groupe de travail ont été organisées :

- 1) réunion de lancement le 19 septembre 2018,
- 2) synthèse des résultats du questionnaire sur la compatibilité du RMQS-Biodiversité avec le RMQS et présentation des taxons et fonctions choisis le 23 janvier 2019,
- 3) première proposition de protocoles et de stratégie d'échantillonnage le 20 juin 2019,
- 4) validation des protocoles et ajout des groupes d'organismes pouvant également être suivis grâce à ces protocoles le 14 novembre 2019,
- 5) définition du premier essai sur le terrain le 31 janvier 2020.

Ces réunions ont généré beaucoup d'idées et de discussions. Les avancées et les nouvelles orientations ont été actées par le groupe de travail.

Rédaction du rapport final pour partager et valider les conclusions

Les réflexions menées ont donné lieu à la rédaction d'un rapport final, précisant :

- 1) les modalités d'un possible couplage du suivi de la biodiversité des sols avec le RMQS,
- 2) des recommandations concernant le choix des organismes et des fonctions à mesurer, des protocoles associés et une première évaluation des besoins (économiques, humains et matériels),
- 3) les différentes options pour parvenir à un compromis entre les contraintes budgétaires et la volonté de produire une étude exhaustive,
- 4) les points restant à approfondir et les prochaines étapes à entreprendre.

3. RÉSULTATS

Le suivi proposé par les experts-écologues du RMQS-Biodiversité couvre de manière quasiment exhaustive les organismes du sol. Les experts-écologues ont également exprimé le besoin de suivre les fonctions du sol (dans le sens de « processus »; Jax, 2005). Trois fonctions ont été retenues : la macroporosité du sol due au forage des vers de terre (appelée ensuite macroporosité), les activités enzymatiques et la dégradation de la matière organique.

3.1. Un suivi de la biodiversité des sols peut-il être adossé au RMQS ?

Plusieurs questions concernant le plan d'échantillonnage du RMQS ont été intégrées dans le questionnaire, puis discutées lors des réunions plénières. Même si un consensus est apparu dans les réponses au questionnaire, ces points ont été débattus en profondeur.

Les résultats de l'enquête montrent que la stratégie d'échantillonnage du RMQS ainsi que sa fréquence de rééchantillonnage conviennent aux experts-écologues consultés. Ils pointent la nécessité d'effectuer l'échantillonnage à une période précise de l'année (Figure 2).

La stratégie d'échantillonnage du RMQS est acceptée par tous pour les micro-organismes, la faune, la flore et les fonctions du sol (20 réponses positives) tandis que la fréquence tous les 10-15 ans convient à 90 % des experts. Il est difficile de réduire le pas de temps entre deux rééchantillonnages. Une période plus courte signifierait qu'il faudrait échantillonner plus de sites par an et cela entraînerait des coûts supplémentaires. Les équipes de terrain parviennent aujourd'hui à échantillonner entre 150 et 200 sites par an. Un rythme d'échantillonnage de 10 à 15 ans constitue donc un bon compromis. Il correspond aux échelles de temps associées aux changements globaux et d'utilisation du sol et il permet d'échantillonner l'ensemble du territoire national. Concernant la saisonnalité de l'échantillonnage, 90 % des experts mettent en avant la nécessité d'échantillonner à une période précise de l'année (Figure 2). La période la plus favorable pour la plupart des organismes est le printemps. En concentrant l'échantillonnage de l'ensemble des sites sur une seule saison (2-3 mois), cela imposerait une très forte contrainte opérationnelle. Les réflexions sont encore en cours sur ce point.

Globalement, sur la base des avis d'experts, la stratégie d'échantillonnage du RMQS, tel qu'elle est configurée aujourd'hui, semble adaptée au suivi de l'évolution de la biodiversité des sols. Le point restant donc à éclaircir est la nécessité de la saisonnalité des suivis.

3.2. Caractéristiques du suivi de la biodiversité

3.2.1. Le besoin de suivre aussi bien les taxons que les fonctions

La complémentarité entre l'approche taxonomique et l'approche fonctionnelle a été jugée nécessaire. Une approche purement taxonomique est limitante car elle fournit très peu d'informations sur les interactions entre les organismes et les fonctions du sol, bien que cela soit de moins en moins vrai avec les outils d'inférence fonctionnelle de la diversité (Sosiak et Barden, 2021). Au contraire, une approche purement fonctionnelle ou par des bioindicateurs combinés risquerait d'être trop synthétique et difficile à interpréter. Les experts-écologues recommandent que ces deux aspects soient analysés en parallèle.

3.2.2. Quels taxons ou fonctions suivre et quels protocoles choisir ?

Une liste des taxons présents dans le sol a été établie, en se concentrant tout d'abord sur les groupes emblématiques tels que les vers de terre, les collemboles ou les arthropodes de surface (araignées, carabes, etc.). Cependant, comme les protocoles choisis (voir ci-après) permettent de suivre d'autres taxons, le RMQS-Biodiversité couvre la majorité des organismes du sol : les micro-organismes (bactéries, archées, protistes), la microfaune (nématodes), méso (endogée et de surface) et macrofaune (endogée et de surface). Par exemple, les pots Barber, choisis pour échantillonner la macrofaune de surface, permettent également de collecter la mésofaune de surface ; le test bêche, choisi pour échantillonner les vers de terre, permet d'étudier les autres organismes appartenant à la macrofaune endogée et le carottage de 5 cm de diamètre, initialement prévu pour étudier les collemboles, permet de suivre l'ensemble de la mésofaune endogée. Les experts recommandent que la flore soit également suivie par l'évaluation de la banque de graines. De plus, les experts conseillent l'étude de la macroporosité du sol due à l'activité de la macrofaune, les activités enzymatiques et la dégradation de la matière organique. Ces trois suivis (appelés ici « fonctions ») recouvrent une large part des fonctions du sol. En effet, les tunnels de vers de terre ont un impact sur les flux d'eau, d'air et de nutriments du sol (Bastardie *et al.*, 2005). Les activités enzymatiques, dont la dégradation de la matière organique, sont au cœur des cycles des nutriments (Güsewell et Gessner, 2009 ; Nannipieri *et al.*, 2002).

Pour mener un tel suivi, cinq protocoles sont recommandés par les experts-écologues, et devront être mis en œuvre sur le terrain le même jour que les prélèvements de sols et la description de la fosse du RMQS (Tableau 2). Le premier protocole correspond à la formation d'un échantillon composite de surface, effectué en routine dans le cadre du RMQS. Le sol est prélevé avec une tarière de 7 cm de diamètre sur les

Tableau 2 : Taxons et fonctions sélectionnés et les protocoles associés**Table 2 :** Selected taxa and functions and associated protocols

Taxons ou Fonctions	Type d'échantillon	Nombre de répliquats par site	Analyse en laboratoire
Bactéries et champignons	Echantillon composite de surface Aliquote de 150 g conservé à - 20°C après réception	1	Séquençage de masse Illumina (Terrat <i>et al.</i> , 2017)
Protistes	Echantillon composite de surface Même aliquote que pour les bactéries et champignons	1	Séquençage avec PCR imbriquées (Mahé <i>et al.</i> , 2017)
Nématodes	Echantillon composite de surface Aliquote de 750 g conservé à 4°C	1	Extraction avec l'élu triateur d'Ostenbrick puis identification morphologique au microscope (ISO 23611-4, 2007)
Mésafaune	Carottes de sol de 5 cm de diamètre et de 5 cm de profondeur conservées à 4°C	3	Extraction avec un appareil de McFadyen puis identification morphologique au microscope (ISO 23611-2,2006)
Macrofaune endogée	Test bêche avec mottes de 20x20 cm de côté et de 25 cm de profondeur suivie de l'application d'une solution de moutarde (15 g pour 50 cL d'eau). Les individus sont conservés dans de l'alcool absolu	6	Identification morphologique (ISO 23611-1, 2018)
Macrofaune et mésafaune de surface	Pots Barber (individus conservés dans de l'alcool 70°)	6	Identification morphologique (Auclerc <i>et al.</i> , 2019)
Porosité du sol due à la macrofaune	Carottes de sol de 16 cm de diamètre et de 15 cm de profondeur, conservé à 4°C	3	Tomographie aux rayons X avec scanner médical (Bastardie <i>et al.</i> , 2005)
Activités enzymatiques	Echantillon composite de surface Aliquote de 150 g conservé à 4°C	1	Mesure d'absorbance (de Santiago-Martín <i>et al.</i> , 2013)
Dégradation de la matière organique	Echantillon composite de surface Aliquote de 150 g conservé à 4°C	1	Microrespiration (Lemmel <i>et al.</i> , 2019) Dégradation ex-situ de la cellulose (Güsewell et Gessner, 2009)
Banque de graines	Echantillon composite de surface Aliquote d'1 kg, mis à germer	1	Germination et identification morphologique (Mahé <i>et al.</i> , 2021)

25 placettes de la surface d'étude jusqu'à 25 cm de profondeur pour les sites de grandes cultures et jusqu'à 30 cm pour les autres usages du sol. Les 25 prélèvements sont mélangés. Des aliquotes sont prélevées et sont ensuite analysés pour l'inventaire (abondance de chaque taxon présent) des micro-organismes, des nématodes, de la banque de graines, l'estimation de la dégradation de la matière organique et des activités enzymatiques (Tableau 2).

Le second protocole correspond aux pots Barber : six pots Barber (des pots de 5 cm de diamètre sur 5 cm de profondeur contenant du vinaigre blanc) sont enterrés au ras du sol, piégeant les invertébrés se déplaçant à la surface. Ils sont laissés en place pendant 7 jours et relevés le jour de l'échantillonnage du RMQS. Le troisième protocole correspond à trois carottes de 5 cm de diamètre et 5 cm de hauteur qui sont prélevées en vue d'identifier la mésafaune. Le quatrième protocole sert à suivre

la macroporosité du sol. Trois colonnes de 16 cm de diamètre et 15 cm de hauteur sont aussi prélevées et sont ensuite scannées avec un scanner médical pour mettre en évidence les tunnels de vers de terre. Le dernier protocole choisi est le test bêche pour collecter la macrofaune endogée jusqu'à 25 cm de profondeur, suivi de l'aspersion d'une solution de moutarde afin de collecter les vers de terre vivant plus en profondeur (6 répliquats). Le test bêche correspond à l'extraction d'une motte de terre de 20 x 20 cm de côté et 25 cm de profondeur. Celle-ci est triée manuellement pour collecter la macrofaune endogée. La solution de moutarde est aspergée petit à petit durant 20 minutes dans le trou formé.

3.2.3. Besoin de tester les protocoles sur le terrain

Les experts ont mis en évidence le besoin de tester les protocoles sur le terrain afin de définir précisément les coûts et les contraintes logistiques, humaines et financières. Par exemple, le protocole des pots Barber demande deux déplacements sur le site, à sept jours d'intervalle obligatoirement. Ainsi, la marge de manœuvre des équipes sur la date d'échantillonnage du RMQS est très restreinte. Il est nécessaire d'estimer le nombre de personnes pour effectuer les protocoles de biodiversité et de voir si toutes les équipes peuvent assumer cette charge de travail (par exemple si elles ont la possibilité de recruter et d'encadrer de nouvelles personnes).

De plus, il est aussi nécessaire de déterminer l'organisation spatio-temporelle des protocoles pour éviter de perturber la biodiversité. Par exemple, le piétinement peut faire fuir les vers de terre avant leur collecte par test bêche ou modifier les déplacements des arthropodes vivant en surface, biaisant ainsi le nombre d'individus piégés dans les pots Barber.

DISCUSSION

Le double objectif de ce travail était de déterminer si le RMQS pouvait porter une surveillance de la biodiversité des sols et de définir ses contours. Pour cela, nous avons réuni un groupe d'experts écologues de la biodiversité des sols. Nous les avons consultés par questionnaire, par des entretiens individuels et par des réunions plénières. Au sortir de ces réflexions, il a été conclu que les caractéristiques actuelles du RMQS pourraient convenir au suivi de la biodiversité des sols. Le groupe de travail comportait également des représentants du maître d'ouvrage (l'OFB) et des preneurs de décisions (ministères de l'écologie et de l'agriculture) qui apportaient leur point de vue et se tenaient au courant des avancées de l'étude.

Concernant les modalités d'échantillonnage, la maille d'échantillonnage du RMQS peut paraître large par rapport aux programmes de suivi de la biodiversité des sols déjà réalisés (Tableau 1). Cependant, elle a l'avantage de permettre l'analyse des changements et de la distribution des organismes et des fonctions à l'échelle nationale. Pour la fréquence d'échantillonnage, un pas de temps de 10 à 15 ans semble être un bon compromis : il permettra de se caler au mieux sur les échelles de temps associées aux changements climatiques ou aux changements d'usage des sols, et permettra surtout d'échantillonner l'intégralité du territoire métropolitain. Cependant, les experts écologues suggèrent que l'échantillonnage de la biodiversité des sols soit effectué uniquement au printemps. En effet, les communautés d'invertébrés changent selon les saisons (Gongalsky, 2021 ; Kaspari *et al.*, 2023). Par exemple, les insectes en surface entrent en diapause quand la température de l'air avoisine zéro et, ne se déplaçant pas, de ce fait ne sont pas piégés par les pots Barber (Bale, 2002). Or, il est impossible pour les équipes du RMQS

d'échantillonner 180 sites par an uniquement aux périodes favorables à l'essor de la biodiversité. Les solutions pour pallier cette difficulté sont encore en discussion.

La proposition du groupe de travail d'experts-écologues se compose de cinq protocoles sur le terrain. Ils ont été choisis car ce sont des protocoles éprouvés, pouvant comporter une norme ISO. Cette proposition permet la caractérisation simultanée des micro-organismes (bactéries, archées, champignons, autres protistes), de la microfaune (nématodes), de la mésofaune et la macrofaune de surface et endogées (collembolles, vers de terre, insectes, araignées etc.). La taxinomie des groupes d'organismes est notamment basée sur des critères morphologiques pour les nématodes, la méso et macrofaune, alors que dans le programme européen LUCAS, les invertébrés sont également suivis par séquençage de l'ADN (Orgiazzi *et al.*, 2018). Cette méthodologie donne accès à l'occurrence des taxons et à une estimation relative de leurs abondances. Collecter les organismes, comme dans le cadre du RMQS-Biodiversité, permet aussi la mesure des traits fonctionnels. Ces derniers peuvent notamment être des indicateurs de changement d'usage du sol (Vandewalle *et al.*, 2010). Trois fonctions vont également être mesurées : la macroporosité du sol, la dégradation de la matière organique et les activités enzymatiques. La flore sera aussi suivie en déterminant la banque de graines. Ainsi, le RMQS-Biodiversité est bien plus complet que les précédents programmes de suivis de la biodiversité mis en œuvre dans le RMQS.

Grâce à ce travail de co-construction, nous avons validé collectivement les protocoles à mettre en place et discuté des possibles interférences entre ces derniers. Il en résulte un projet ambitieux de surveillance de la biodiversité des sols :

- 1) très complet en ce qui concerne le suivi des organismes,
- 2) intégrant également des fonctions du sol,
- 3) ayant vocation à être déployé à l'échelle nationale sur l'ensemble des sites du RMQS, présentant une variété d'usages du sol (forêts, cultures, prairies, jardins, vignes, vergers, milieux naturels).

Le suivi proposé intitulé RMQS-Biodiversité viendra compléter les mesures déjà réalisées dans le cadre du suivi pédologique du RMQS et permettra d'avoir sur chacun des 2 240 sites une caractérisation exhaustive des sols, avec des données sur la biodiversité, des mesures pédologiques, de contaminants et de pratiques agricoles et donc de croiser l'ensemble de ces données avec une puissance statistique élevée.

Développer un suivi à long terme sur autant de sites permettra une connaissance fine de la distribution des taxons à l'échelle de la France, de leur co-occurrence et de leurs possibles interactions. Il sera aussi possible de connaître l'impact des activités humaines (notamment l'agriculture) sur la biodiversité des sols. Enfin, la qualité des sols français pourra être appréciée dans ses trois dimensions (physique, chimique et biologique) ainsi que son évolution au cours du temps.

La prochaine étape pour déployer le programme RMQS-

Biodiversité est de définir la stratégie d'échantillonnage. L'échantillonnage de la biodiversité étant très sensible aux perturbations, il est important de définir l'emplacement adéquat des réplicats et l'enchaînement de la mise en œuvre des protocoles. Par exemple, il est nécessaire de poser les pièges Barber avant la venue des équipes sur le site.

Les experts écologues ont recommandé de tester les protocoles en conditions réelles pour appréhender la diversité des contextes du RMQS. En effet, les sites d'étude du RMQS présentent des caractéristiques variées notamment par rapport à l'usage du sol, à la topographie (pouvant être en plaine comme en montagne) ou à l'organisation de chaque équipe de terrain (nombre de personnes, distance entre le bureau et les sites d'étude etc.; Jolivet *et al.*, 2018). Ainsi, dans une deuxième phase, il est nécessaire d'estimer l'ensemble des besoins, en estimant le temps passé par protocole, les coûts, le personnel nécessaire et la logistique à mettre en œuvre. Ce test sur le terrain a été effectué sur 30 sites du RMQS de 2020 à 2023. Les résultats sont en cours d'analyse.

La dernière étape sera la planification de la gestion des données. La base de données devra être interopérable avec DoneSol (Toutain, 2014) et celle du SINP (<https://inpn.mnhn.fr>), voire avec des bases de données européennes.

CONCLUSION

Adossé au RMQS, le RMQS-Biodiversité est un programme prometteur qui alimentera notre connaissance de la biodiversité des sols de France et de ses liens avec les caractéristiques physico-chimiques des sols, et permettra de mieux comprendre comment elle est influencée par les contaminants, les modes d'usage et l'agriculture. La phase de test opérationnel a eu lieu sur 30 sites de 2020 à 2023. Suite aux résultats, sa forme finale pourra être établie et démarrée sur les 2 240 sites. Une réflexion complémentaire devra être engagée pour les sites ultra-marins du RMQS (actuellement 70 sites) qui présentent d'autres spécificités.

REMERCIEMENTS

Cette étude a été financée par l'Office Français de la Biodiversité (OFB). Biochem-Env (<https://doi.org/10.15454/HA6V6Y>) est une plateforme analytique de l'Infrastructure nationale de Recherche AnaEE-France, bénéficiant d'une aide de l'État français gérée par l'Agence nationale de la recherche au titre du Programme « Investissements d'avenir » (ANR-11-INBS-0001). Les auteurs remercient également les deux relectrices Amandine Erktan et Claire Marsden pour leurs commentaires ayant contribué à l'amélioration du manuscrit de cet article.

BIBLIOGRAPHIE

- Association Française pour l'Étude du Sol (2008). Référentiel pédologique. Ed Quæ. 405 p.
- Auclerc A., Le Moine J.M., Hatton P.-J., Bird J.A., Nadelhoffer K.J. (2019). Decadal post-fire succession of soil invertebrate communities is dependent on the soil surface properties in a northern temperate forest. *Sci. Total Environ.* 647, 1058–1068. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.08.041>
- Bale J.S. (2002). Insects and low temperatures: from molecular biology to distributions and abundance. *Philos. Trans. R. Soc. Lond. B. Biol. Sci.* 357, 849–862. <https://doi.org/10.1098/rstb.2002.1074>
- Bastardie F., Capowiez Y., Cluzeau D. (2005). 3D characterisation of earthworm burrow systems in natural soil cores collected from a 12-year-old pasture. *Appl. Soil Ecol.* 30, 34–46. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2005.01.001>
- Blouin M., Hodson M.E., Delgado E.A., Baker G., Brussaard L., Butt K.R., Dai J., Dendooven L., Peres G., Tondoh J.E., Cluzeau D., Brun J.-J. (2013). A review of earthworm impact on soil function and ecosystem services. *Eur. J. Soil Sci.* 64, 161–182. <https://doi.org/10.1111/ejss.12025>
- Cluzeau D., Bellido A., Boulonne L., Cannavacciuolo M., Chaussot R., Cortet J., Fargette Mireille, Giteau J.L., Guernion M., Jolivet C., Lavelle Patrick, Foucaud-Lemercier B., Martin F., Maitelle Thierry, Mercier V., Péres G., Perrin C., Plantard O., Ponge J.F., Ranjard L., Rougé L., Ruiz N., Tico S., Velasquez H., Villenave Cécile, Walter C. (2009). RMQS BioDiv Bretagne, rapport final. Tome 2: cahier des méthodes. Rennes: Ademe, 74 p. multigr.
- de Santiago-Martín A., Cheviron N., Quintana J.R., González C., Lafuente A.L., Mougín C. (2013). Metal Contamination Disturbs Biochemical and Microbial Properties of Calcareous Agricultural Soils of the Mediterranean Area. *Arch. Environ. Contam. Toxicol.* 64, 388–398. <https://doi.org/10.1007/s00244-012-9842-8>
- Eisenhauer N., Antunes P.M., Bennett A.E., Birkhofer K., Bissett A., Bowker M.A., Caruso T., Chen B., Coleman D.C., de Boer W. de Ruyter P., DeLuca T.H., Frati F., Griffiths, B.S., Hart, M.M., Hättenschwiler, S., Haimi, J., Heethoff, M., Kaneko, N., Kelly, L.C., Leinaas H.P., Lindo Z., Macdonald C., Rillig M.C., Ruess L., Scheu S., Schmidt O., Seastedt T.R., van Straalen N.M., Tiunov A.V., Zimmer M., Powell J.R. (2017). Priorities for research in soil ecology. *Pedobiologia* 63, 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.pedobi.2017.05.003>
- El Mujtar V., Muñoz N., Prack Mc Cormick B., Pulleman M., Tiftonell P. (2019). Role and management of soil biodiversity for food security and nutrition; where do we stand? *Glob. Food Secur.* 20, 132–144. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2019.01.007>
- Emmett B.A., Reynolds B., Chamberlain P.M., Rowe E., Spurgeon D., Brittain S.A., Frogbrook Z., Hughes S., Lawlor A.J., Poskitt J. (2010). Countryside survey: soils report from 2007.
- FAO, ITPS, GSBI, SCBD, EC (2020). State of knowledge of soil biodiversity - Status, challenges and potentialities. FAO. <https://doi.org/10.4060/cb1928en>
- Gardi C., Jeffery S. (2009). Soil biodiversity. EUR-OP Brussels.
- Gongalsky, K.B. (2021). Soil macrofauna: Study problems and perspectives. *Soil Biol. Biochem.* 159, 108281.
- Guerra C.A., Heintz-Buschart A., Sikorski J., Chatzinotas A., Guerrero-Ramirez N., Cesarz S., Beaumelle L., Rillig M.C., Maestre F.T., Delgado-Baquerizo M. (2020). Blind spots in global soil biodiversity and ecosystem function research. *Nat. Commun.* 11, 1–13.
- Güsewell S., Gessner M.O. (2009). N: P ratios influence litter decomposition and colonization by fungi and bacteria in microcosms. *Funct. Ecol.* 23, 211–219. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2435.2008.01478.x>
- Imbert C., Santorufo L., Ortega C., Jolivet C., Bougon N., Cheviron N., Cluzeau D., Cortet J., Lévêque A., Mougín C., Murat C., Péres 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. *Etude et Gestion des Sols*, 28 (1), 193-206.
- ISO 23611-1 (2018). Prélèvement des invertébrés du sol, Partie 1 : Tri manuel et extraction au formol des vers de terre.
- ISO 23611-2:2006 (2006). Qualité du sol — Prélèvement des invertébrés du sol — Partie 2: Prélèvement et extraction des micro-arthropodes (Collembola et Acarina).
- ISO 23611-4 (2007). Qualité du sol — Prélèvement des invertébrés du sol — Partie 4: Prélèvement, extraction et identification des nématodes du sol.
- Jax K. (2005). Function and "functioning" in ecology: what does it mean? *Oikos* 111, 641–648. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0706.2005.13851.x>
- Jolivet C., Almeida-Falcon J.-L., Berché P., Boulonne L., Fontaine M., Gouny L., Lehman S., Maître B., Ratié C., Schellenberger E., Soler-Dominguez N. (2018). Manuel du Réseau de mesures de la qualité des sols RMQS 2 : deuxième campagne métropolitaine 2016–2027.
- Karimi B., Prévost-Bouré N.C., Dequiedt S., Terrat S., Ranjard L. (2018a). Atlas français des bactéries du sol. Biotope éditions.
- Karimi B., Terrat S., Dequiedt S., Saby N.P.A., Horrigue W., Lelièvre M., Nowak V., Jolivet C., Arrouays D., Wincker P., Cruaud C., Bispo A., Maron P.-A., Bouré N.C.P., Ranjard L. (2018b). Biogeography of soil bacteria and archaea across France. *Sci. Adv.* 4, eaat1808. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aat1808>
- Kaspari M., Weiser M.D., Marshall K.E., Siler C.D., De Beurs K. (2023). Temperature–habitat interactions constrain seasonal activity in a continental array of pitfall traps. *Ecology* 104. <https://doi.org/10.1002/ecy.3855>
- Lemmel F., Maunoury-Danger F., Fanesi A., Leyval C., Cébron A. (2019). Soil Properties and Multi-Pollution Affect Taxonomic and Functional Bacterial Diversity in a Range of French Soils Displaying an Anthropisation Gradient. *Microb. Ecol.* 77, 993–1013. <https://doi.org/10.1007/s00248-018-1297-7>
- Mahé F., de Vargas C., Bass D., Czech L., Stamatakis A., Lara E., Singer D., Mayor J., Bunge J., Sernaker S., Siemensmeyer T., Trautmann I., Romac S., Berney C., Kozlov A., Mitchell E.A.D., Seppely C.V.W., Egge E., Lentendu G., Wirth R., Trueba G., Dunthorn M. (2017). Parasites dominate hyperdiverse soil protist communities in Neotropical rainforests. *Nat. Ecol. Evol.* 1, 1–8. <https://doi.org/10.1038/s41559-017-0091>
- Mahé I., Cordeau S., Bohan D.A., Derrouch D., Dessaint F., Millot D., Chauvel B. (2021). Soil seedbank: Old methods for new challenges in agroecology? *Ann. Appl. Biol.* 178, 23–38. <https://doi.org/10.1111/aab.12619>
- McKenzie N.L., van Leeuwen S., Pinder A.M. (2009). Introduction to the Pilbara Biodiversity Survey, 2002–2007. *Rec. West. Aust. Mus. Suppl.* 78, 3. [https://doi.org/10.18195/issn.0313-122x.78\(1\).2009.003-089](https://doi.org/10.18195/issn.0313-122x.78(1).2009.003-089)
- Mesić H., Čidić A., Dominković Alavanja S., Kisić I., Bašić F., Mesić M., Zgorelec Ž., Husnjak S., Romić D., Komesarović B. (2008). Croatian Soil Monitoring Programme: project Development of the Croatian Soil Monitoring Programme with a pilot project: LIFE05 TCY/CRO/000105.
- Myers N., Mittermeier R.A., Mittermeier C.G., da Fonseca G.A.B., Kent J. (2000). Biodiversity hotspots for conservation priorities. *Nature* 403, 853–858. <https://doi.org/10.1038/35002501>
- Nannipieri P., Kandeler E., Ruggiero P. (2002). Enzyme activities and microbiological and biochemical processes in soil. *Enzym. Environ. Marcel Dekker N. Y.* 1–33.
- Nielsen S.E., Haughland D.L., Bayne E., Schieck J. (2009). Capacity of large-scale, long-term biodiversity monitoring programmes to detect trends in species prevalence. *Biodivers. Conserv.* 18, 2961–2978. <https://doi.org/10.1007/s10531-009-9619-1>
- Orgiazzi A., Ballabio C., Panagos P., Jones A., Fernández-Ugalde O. (2018). LUCAS Soil, the largest expandable soil dataset for Europe: a review. *Eur. J. Soil Sci.* 69, 140–153. <https://doi.org/10.1111/ejss.12499>
- Orme C.D.L., Davies R.G., Burgess M., Eigenbrod F., Pickup N., Olson V.A., Webster A.J., Ding T.-S., Rasmussen P.C., Ridgely R.S., Stattersfield A.J., Bennett P.M., Blackburn T.M., Gaston K.J., Owens I.P.F. (2005). Global hotspots of species richness are not congruent with endemism or threat. *Nature* 436, 1016–1019. <https://doi.org/10.1038/nature03850>
- Pulleman M., Creamer R., Hamer U., Helder J., Pelosi C., Pérès G., Rutgers M. (2012). Soil biodiversity, biological indicators and soil ecosystem services—an overview of European approaches. *Curr. Opin. Environ. Sustain.* 4, 529–538. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2012.10.009>
- Rutgers M., Schouten A.J., Bloem J., Van Eekeren N., de Goede R.G.M., Jagersop Akkerhuis G.A.J.M., van der Wal A., Mulder C., Brussaard L., Breure A.M. (2009). Biological measurements in a nationwide soil monitoring network. *Eur. J. Soil Sci.* 60, 820–832. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2009.01163.x>
- Schmidt O., Keith A.M., Arroyo J., Bolger T., Boots B., Breen J., Clipson N., Doohan F.M., Griffin C.T., Hazard C. (2011). The CréBeo soil biodiversity project. *CreBeo-Baseline Data Responses Press. Funct. Conserv. Keyst. Micro-Macro-Org. Ir. Soils STRIVE Rep.*
- Soberón J., Jiménez R., Golubov J., Koleff P. (2007). Assessing completeness of biodiversity databases at different spatial scales. *Ecography* 30, 152–160. <https://doi.org/10.1111/j.0906-7590.2007.04627.x>
- Sosiak C.E., Barden P., (2021). Multidimensional trait morphology predicts ecology across ant lineages. *Funct. Ecol.* 35, 139–152. <https://doi.org/10.1111/1365-2435.13697>
- Terrat S., Horrigue W., Dequiedt S., Saby N.P.A., Lelièvre M., Nowak V., Tripied J., Régnier T., Jolivet C., Arrouays D., Wincker P., Cruaud C., Karimi B., Bispo A., Maron P.A., Prévost-Bouré N.C., Ranjard L. (2017). Mapping and predictive variations of soil bacterial richness across France. *PLOS ONE* 12, e0186766. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0186766>
- Toth G., Jones A., Montanarella L. (2013). LUCAS topsoil survey methodology, data and results.
- Tourout J., Chaumet S., Poncet L., Siblet J.P. (2017). Diagnostic et recommandations pour une stratégie d'acquisition de connaissances naturalistes continentales. Tome I : analyse des besoins et des dispositifs existants. *Rapp. MNHN-SPNUMS-2006-PatriNat N° 2017-10 253.*
- Toutain B. (2014). Une infrastructure de capitalisation des données : le SI Sol, in : *Séminaire Du Département Environnement et Agronomie » Les Bases de Données SOL »*, p. 26
- Turbé A., de Toni A., Benito P., Lavelle P., Lavelle P., Camacho N.R., van der Putten W.H., Labouze E., Mudgal S. (2010). Soil biodiversity: functions, threats and tools for policy makers.
- Vandewalle M., De Bello F., Berg M.P., Bolger T., Dolédec S., Dubs F., Feld C.K., Harrington R., Harrison P.A., Lavorel S., Da Silva P.M., Moretti M., Niemelä J., Santos P., Sattler T., Sousa J.P., Sykes M.T., Vanbergen A.J., Woodcock B.A. (2010). Functional traits as indicators of biodiversity response to land use changes across ecosystems and organisms. *Biodivers. Conserv.* 19, 2921–2947. <https://doi.org/10.1007/s10531-010-9798-9>
- Wagg C., Bender S.F., Widmer F., van der Heijden M.G.A. (2014). Soil biodiversity and soil community composition determine ecosystem multifunctionality. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 111, 5266–5270. <https://doi.org/10.1073/pnas.1320054111>

ANNEXE

Annexe 1. Questionnaire soumis aux experts des taxons et des fonctions du sol

QUESTIONNAIRE

Nom et Prénom

Organisme / Laboratoire

Variable d'expertise (groupe taxonomique et/ou fonction)

Échantillonnage (A)

A1. La méthode d'échantillonnage est-elle normalisée ou publiée ?

Oui (référence) Non

A2. La méthode d'échantillonnage est-elle utilisée dans d'autres réseaux de surveillance (en France ou à l'étranger) ?

Oui (lesquels) Non Ne sais pas

A3. L'échantillonnage doit-il être effectué durant une période/une saison précise ?

Oui (période) Non

A4. La stratégie d'échantillonnage RMQS (maille 16 km, surface à échantillonner 400m²) est-elle adaptée à la variable ou faut-il envisager une autre stratégie ?

Oui Non (pourquoi et proposer la stratégie adéquate)

A5. Quelle quantité de terre faut-il échantillonner (en kg) ?

A6. Le protocole d'échantillonnage RMQS (un échantillon composite issu de 25 prélèvements individuels de 0-30cm de profondeur et un échantillon composite de l'horizon OF-OH si une couche organique en surface est présente ; <http://www.gissol.fr/publications/manuel-du-reseau-de-mesures-de-la-qualite-des-sols-rmqs2-edition-2018-4352>) est-il adapté à la variable ou faut-il envisager une autre stratégie ?

Oui Non (pourquoi et proposer la stratégie adéquate)

A7. Le protocole d'échantillonnage de la variable est-il adapté à la diversité des occupations des sites RMQS (grandes cultures, forêts, prairies permanentes, vignes et vergers, friches, parcs et jardins, milieux naturels ou peu anthropisés ; cf. carte page 5 du Manuel RMQS2) ?

Oui Non (pourquoi)

A8. Le protocole d'échantillonnage de la variable est-il adapté au territoires ultra-marins ?

Oui Non (pourquoi ?)

QUESTIONNAIRE (SUITE) annexe 1. Questionnaire soumis aux experts des taxons et des fonctions du sol

A9. Quelle est la durée de l'échantillonnage sur le terrain et combien de personnes sont nécessaires pour le réaliser ?

(Préciser le nombre de personnes, leur qualification et la durée en h)

A10. Combien de passages annuels faut-il prévoir sur le site pour réaliser un échantillonnage complet ?

1 passage 2 passages > 2 passages

A11. Le rythme d'échantillonnage peut-il être le même que celui du RMQS (intervalle de 10-15 ans) ?

Oui Non (pourquoi, préciser le pas de temps idéal)

A12. Existe-il des équipes opérationnelles en France métropolitaine pour réaliser l'échantillonnage ?

Oui (lesquelles) Non

A13. Existe-il des équipes opérationnelles en France outre-mer pour réaliser l'échantillonnage ?

Oui (lesquelles) Non

A14. Le protocole d'échantillonnage peut-il être réalisé par des tiers ?

Oui Non

A15. Si le protocole est transférable à un tiers, quelle est la durée estimée de la formation ?

A16. Est-il possible d'échantillonner jusqu'à 200 sites par an ?

Oui Non (combien)

Analyse en laboratoire (B)

B1. Existe-t-il des contraintes d'envoi et/ou de conservation de l'échantillon pendant l'envoi (du terrain au labo) ?

Oui (Lesquelles) Non

B2. Après réception de l'échantillon, est-il possible de le stocker au labo pour différer l'analyse ?

Oui (préciser les conditions) Non

B3. Après analyse de l'échantillon, est-il possible de le conserver pour répéter l'analyse après plusieurs années de conservation (ex: comparaison inter-campagnes) ?

Oui (combien de temps) Non

B4. Quelles doivent-être les conditions de conservation à long terme de l'échantillon au laboratoire ?

QUESTIONNAIRE (SUITE) annexe 1. Questionnaire soumis aux experts des taxons et des fonctions du sol*Identifications « classiques » (binoculaire, microscope, clé dichotomique)***B5. L'analyse est-elle réalisée en routine ?**

Oui Non

B6. Avez-vous des références d'équipes qui réalisent l'analyse en routine (France ou international) ?**B7. Est-il possible de traiter jusqu'à 200 échantillons par an ?**

Oui Non (combien)

B8. L'analyse pourrait-elle être transférée à un laboratoire privé ?

Oui (lesquels) Non

B9. Quelle est la durée de l'analyse (temps réel en h de l'analyse/échantillon) ?*Identification moléculaire (basée sur l'ADN environnemental)***B10. L'analyse de la variable peut-elle se faire par des techniques de biologie moléculaire ?**

Oui (référence) Non

B11. Votre laboratoire réalise-t-il ce type d'analyse moléculaire en routine ?

Oui Non En développement

B12. Si oui, depuis combien de temps (détailler le nombre de mois ou années) ?**B13. Si non, avez-vous des références d'équipes qui réalisent l'analyse par des approches moléculaires (France ou international) ?****B14. Est-il possible de traiter jusqu'à 200 échantillons par an ?**

Oui Non (combien)

B15. L'analyse pourrait-elle être transférée à un laboratoire privé ?

Oui (lesquels) Non

B16. Quelle est la durée de l'analyse (temps réel en h de l'analyse/échantillon) :

QUESTIONNAIRE (SUITE) annexe 1. Questionnaire soumis aux experts des taxons et des fonctions du sol*Analyse biochimique***B17. L'analyse de la variable peut-elle se faire par des techniques de biochimie ?**

Oui (référence) Non

B18. Votre laboratoire réalise-t-il ce type d'analyse en routine ?

Oui Non En développement

B19. Si oui, depuis combien de temps (détailler le nombre de mois ou années) ?**B20. Si non, avez-vous des références d'équipes qui réalisent l'analyse par des approches biochimiques (France ou à l'international) ?****B21. Est-il possible de traiter jusqu'à 200 échantillons par an ?**

Oui Non (combien)

B22. L'analyse pourrait-elle être transférée à un laboratoire privé ?

Oui (lesquels) Non

B23. Quelle est la durée de l'analyse (temps réel en h de l'analyse/échantillon) :**Coût (C)****C.1 Coût de l'échantillonnage de la variable sur le terrain (estimer le coût assez précisément en détaillant le personnel [durée x qualification] et le consommable)****C.2 Coût de l'identification/analyse de la variable avec des méthodes classique (estimer le coût assez précisément en détaillant le personnel [durée x qualification] et le consommable)****C.3 Coût de l'identification /analyse de la variable avec des méthodes moléculaires (estimer le coût assez précisément en détaillant le personnel [durée x qualification] et le consommable)****C.4 Coût de l'identification /analyse de la variable avec des méthodes biochimiques (estimer le coût assez précisément en détaillant le personnel [durée x qualification] et le consommable)****C5. Coût de la conservation à long terme**

QUESTIONNAIRE (SUITE) annexe 1. Questionnaire soumis aux experts des taxons et des fonctions du sol**Interprétation (D)****D1. Existe-il des références ou référentiels d'interprétation de la variable pour les sols métropolitains ?**

Oui (lesquelles) Non

D2. Existe-il des références ou référentiels d'interprétation de la variable pour les sols ultra-marins ?

Oui (lesquelles) Non

D3. L'interprétation de la variable est-elle qualitative ou quantitative ? (Préciser la réponse)**D4. Faut-il des informations complémentaires pour interpréter la variable (ex : usage, pratiques, paramètres du sol)**

Oui (préciser lesquelles) Non

D5. Avez-vous des éléments (ref. Publications) sur les réponses de la variable à différentes pressions ?**Par exemple :**

- Erosion
- Perte de matière organique
- Changements d'usage (ex : déforestation, retournement de prairies)
- Expansion urbaine
- Contamination (préciser si organique ou minérale)
- Changement climatique
- Pratiques de gestion des sols (si oui, préciser lesquelles) non-durables
- Tassement
- Acidification
- Dépôts atmosphériques azotés

Oui (lesquelles) Non

D6. Est-il possible d'utiliser une approche fonctionnelle (type traits), à partir des données mesurées ?

Oui Non

D7. Si oui, à travers des bases de données ou avec des mesures sur les individus ?**D8. Peut-on faire le lien avec un réseau trophique ?**

Oui (préciser la réponse) Non

D9. La variable est-elle indicatrice de fonctions du sol ?

Oui (lesquelles) Non

D10. La variable peut-elle être intégrée dans des indicateurs fonctionnels ?

Oui (lequel) Non

QUESTIONNAIRE (SUITE) annexe 1. Questionnaire soumis aux experts des taxons et des fonctions du sol

Communication (E)

E1. Les résultats sont-ils communicables facilement aux propriétaires/gestionnaires/exploitants des sites RMQS ?

Oui Non

E2. Comme pour un labo d'analyse physico-chimique, existe-t-il des bordereaux de restitution des résultats ?

Oui (lesquels) Non

E3. La compréhension de la variable est-elle simple pour un public non spécialisé ?

Oui Non

E4. Existe-t-il une/des espèce/s emblématique/s associée/s à l'indicateur pour communiquer auprès du grand public (ex. vers de terre, orchidée, girofle) ?

Oui (lesquelles) Non

E5. A quelles attentes des pouvoirs publics l'indicateur peut-il répondre (ex. rapportages européens sur la directive habitat) ?

Oui (lesquelles) Non

