Le RMQS comme support de suivi de la biodiversité des sols : Les programmes passés, présents et futurs

Camille Imbert, Lucia Santorufo, Carole Ortega, Claudy Jolivet, Nolwenn Bougon, Nathalie Cheviron, Daniel Cluzeau, Jérôme Cortet, Antoine Lévêque, Christian Mougin, et al.

▶ **To cite this version:**

Camille Imbert, Lucia Santorufo, Carole Ortega, Claudy Jolivet, Nolwenn Bougon, et al.. Le RMQS comme support de suivi de la biodiversité des sols : Les programmes passés, présents et futurs. Étude et Gestion des Sols, 2021, 28 (1), pp.193-206. hal-03484172

HAL Id: hal-03484172
https://hal.inrae.fr/hal-03484172

Submitted on 16 Dec 2021

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.

Numéro spécial
20 ans du RMQS

Le RMQS comme support de suivi de la biodiversité des sols

Les programmes passés, présents et futurs

C. Imbert(1*), L. Santorufo(2), C. Ortega(3), C. Jolivet(1*), N. Bougon(4), N. Cheviron(5), D. Cluzeau(6), J. Cortet(7), A. Lévêque(8), C. Mougin(5), C. Murat(9), G. Pérès(10), J. Pottier(11), L. Ranjard(12), C. Villenave(13) et A. Bispo(1*)

1) INRAE, InfoSol, 45075, Orléans, France.
2) Université Federico II, Département de Biologie, Corso Umberto I, 80138 Naples, Italie.
3) Muséum d'Orléans pour la Biodiversité et l'Environnement, 6, rue Marcel Proust 45000 Orléans, France.
4) Office Français de la Biodiversité, 12 cours Louis Lumière 94300 Vincennes, France.
5) INRAE, AgroParisTech, Université Paris-Saclay, UMR ECOSYS, Plateforme Biochem-Env, 78026, Versailles, France.
6) Université Rennes 1, UMR CNRS ECOBIO, Station Biologique, 35380 Paimpont, France.
7) CEFE / Université Paul-Valéry Montpellier 3, route de Mende, 34199 Montpellier cedex 5, France.
8) UMS PatriNat (OFB-CNRS-MNHN), CP 135, 43, rue Buffon 75005 Paris, France.
9) Université de Lorraine-INRAE, Interactions Arbres/Microorganismes (IAM), 54280 Champenoux, France.
10) Institut Agro AgroCampus Ouest-INRAE, SAS, 65 Rue de Saint-Brieuc, 35042 Rennes, France.
11) Université Clermont Auvergne, INRAE, VetAgro Sup, Ecosystème Prairial (UREP), 5 chemin de Beaulieu, 63000 Clermont-Ferrand, France.
12) AgroSup-INRAE, Agroécologie, 17 Rue Sully, 21000 Dijon, France.
13) Elisol Environnement, Z.A des Tourels, 10, Avenue du Midi 30111 Congénies, France.

* Auteur correspondant : camille.imbert@inrae.fr
claudy.jolivet@inrae.fr
antonio.bispo@inrae.fr

Comment citer cet article :
Imbert C., Santorufo L., Ortega C., Jolivet C., Bougon N., Cheviron N., Cluzeau D., Cortet J., Lévêque A., Mougin C., Murat C., Pérès G., Pottier J., Ranjard L., Villenave C. et Bispo A., 2021 - Le RMQS comme support de suivi de la biodiversité des sols : les programmes passés, présents et futurs - Étude et Gestion des Sols, 28, 193-206

Comment télécharger cet article :
http://www.afes.fr/publications/revue-etude-et-gestion-des-sols/volume-28-numero-1/

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

RÉSUMÉ

La biodiversité du sol représenterait environ un quart des espèces de la planète. Elle est menacée, et bien qu'indispensable aux activités humaines, elle est encore fortement méconnue et peu considérée. Le Réseau de Mesures de la Qualité des Sols (RMQS) joue un rôle notable pour lever ces zones d'ombre, par ses programmes sur les microorganismes du sol, la méso et macrofaune du sol, la flore des prairies, les truffes et plus récemment les activités enzymatiques. Ces programmes de recherche ont permis d'approfondir notre connaissance de la biogéographie des taxons, du lien avec l'usage du sol et les pratiques agricoles et d'identifier des bioindicateurs de la qualité du sol. Les premières cartes de distribution des phyla de bactéries à l'échelle nationale et de la faune du sol à l'échelle régionale (en Bretagne) ont été mises au point. Pour la truffe blanche, trois nouvelles zones de présence ont été identifiées en France. Les habitats des bactéries ont été également décrits pour la première fois. L'effet de l'usage du sol sur la biodiversité du sol a été mis en évidence (notamment sur la présence des phyla, de la biomasse et les réseaux d'interactions bactériens, sur l'abondance en faune du sol) ainsi que celui des pratiques agricoles (la gestion et la fertilisation des parcelles agricoles sur la faune du sol et le pâturage et le fauchage sur la flore prairiale). Un bioindicateur synthétique de l'effet des pratiques agricoles sur la biodiversité a été construit. Malgré ces résultats encourageants, la connaissance de la biodiversité du sol en est encore à ses balbutiements. Si la phase de test du RMQS-Biodiversité se révèle concluante, le RMQS pourrait combler ce manque de connaissances en devenant le support d'une surveillance à long terme de la biodiversité du sol..

Mots-clés

Faune du sol, fonge, flore, microorganismes, surveillance, distribution spatiale, habitats, bioindicateurs.

SUMMARY

THE FRENCH NATIONAL SOIL QUALITY MONITORING NETWORK (RMQS) AS A SUPPORT FOR MONITORING SOIL BIODIVERSITY: past, present and future programs

Soil biodiversity would represent about 25% of the species on Earth. It is threatened, and although it is essential for human activities, it remains largely unknown. The French National Soil Quality Monitoring Network (RMQS) has a significant impact in removing the grey areas through its programs on soil microorganisms, soil meso and macrofauna, meadow flora, truffles and more recently enzymatic activities. The first distribution maps of bacterial phyla on a national scale and of soil fauna on a regional scale (in Brittany) have been developed. For the white truffle, three new areas of presence have been identified in France. The habitats of the bacteria were also described for the first time. The effect of land use was highlighted on soil biodiversity (particularly, on the presence of phyla, biomass and bacterial interaction networks, the abundance of soil fauna) and that of agricultural practices (management and fertilisation of agricultural plots on soil fauna and grazing and mowing on grassland flora). A synthetic bioindicator of the effect of agricultural practices on biodiversity has been constructed. Despite of these encouraging results, knowledge of soil biodiversity is still at an early stage. If the test phase of the RMQS-Biodiversity proves conclusive, the RMQS could fill this knowledge gap by becoming the basis for a long-term monitoring of soil biodiversity.

Key-words

Soil fauna, fungi, flora, microorganisms, monitoring, spatial distribution, habitats, bioindicators

RESUMEN

LA RED DE MEDICIÓN DE LA CALIDAD DEL SUELO (RMQS) COMO MEDIO DE SEGUIMIENTO DE LA BIODIVERSIDAD DE LOS SUELOS: los programas pasados, actuales y futuros

La biodiversidad del suelo representaría aproximadamente una cuarta parte de las especies del planeta. Está amenazada, y aunque es indispensable a las actividades humanas sigue siendo muy desconocida y poco considerada. La Red de Medición de la Calidad del Suelo (RMQS) juega un papel notable para eliminar estas zonas de sombra, mediante sus programas sobre los microorganismos del suelo, la meso y la macrofauna del suelo, la flora de los prados, las trufas y más recientemente las actividades enzimáticas. Estos programas de investigación permitieron profundizar nuestro conocimiento de la biogeografía de los taxones, de la relación con el uso del suelo y las prácticas agrícolas así como identificar los bioindicadores de la calidad del suelo. Se realizaron los primeros mapas de distribución de las phyla de bacterias a escala nacional y de la fauna del suelo a escala regional (en Bretaña). Para la trufa blanca, se identificaron tres nuevas zonas de presencia en Francia. Se describieron igualmente los hábitats de las bacterias por primera vez. Se puso de relieve el efecto del uso del suelo sobre la biodiversidad del suelo (en particular en la presencia de phyla, de la biomasa y de las redes de interacciones bacterianas, en la abundancia de

la fauna del suelo) así que en el efecto de las prácticas agrícolas (la gestión y la fertilización de las parcelas agrícolas sobre la fauna del suelo y el pastoreo y la siega en la flora de praderas). Se elaboro un bioindicador sintético del efecto de las prácticas agrícolas sobre la biodiversidad. A pesar de estos resultados alentadores, el conocimiento de la biodiversidad del suelo está todavía en sus inicios. Si la fase de prueba de la RMQS-biodiversidad resulta concluyente, la RMQS podría colmar esta carencia de conocimientos convirtiéndose en el soporte de una vigilancia a largo plazo de la biodiversidad del suelo.

Palabras clave
Fauna del suelo, fungí, flora, microorganismos, vigilancia, distribución espacial, hábitat, bioindicadores.

La biodiversité du sol, c'est-à-dire les organismes vivants dans le sol et les fonctions associées (Bispo *et al*., 2009b), est un front de science encore peu exploré alors qu'elle représenterait environ 25 % des espèces de la planète (Decaëns, 2010), qu'elle est menacée (Orgiazzi *et al*., 2016b) et qu'elle est indispensable au bien-être humain (Comerford *et al*., 2013). La biodiversité du sol se compose majoritairement de microorganismes et d'invertébrés (Decaëns, 2010). Ces taxons sont bien moins étudiés que ceux vivant en surface, comme les plantes vasculaires ou les vertébrés (Decaëns, 2010 ; Phillips *et al*., 2017). Le sol reste donc une boîte noire car de nombreuses espèces sont encore à découvrir et l'autoécologie des espèces observées n'est pas encore réellement bien caractérisée.

Plusieurs initiatives ont été lancées pour synthétiser l'étendue des connaissances d'ores et déjà acquises. Aux niveaux européen et mondial, deux atlas sur la biodiversité du sol ont été publiés (Artz *et al*., 2010 ; Jeffery *et al*., 2013 ; Orgiazzi *et al*., 2016a). En France, deux bases de données ont aussi été constituées regroupant les données existantes : Betsi sur les traits des invertébrés du sol et Edaphobase qui recense la présence et l'habitat des organismes du sol (Burkhardt *et al*., 2014 ; Pey *et al*., 2014). Des méta-analyses et revues se sont aussi attelées à cette synthèse sur la biodiversité des sols aboutissant pour certains taxons à la production de cartes rendant compte de la distribution de taxons à l'échelle mondiale et européenne (Cameron *et al*., 2018 ; Decaëns, 2010 ; Phillips *et al*., 2019 ; Rutgers *et al*., 2019 ; van den Hoogen *et al*., 2019). Les premiers résultats remettent déjà en cause notre compréhension de la répartition de la biodiversité globale (Cameron *et al*., 2019 ; FAO *et al*., 2020 ; van den Hoogen *et al*., 2019). Par exemple, les zones de fortes abondances et forte diversité de la biodiversité du sol ne se superposent qu'à 25 % avec ceux de la biodiversité de surface (Cameron *et al*., 2019).

La recherche s'est largement intéressée à l'utilisation des organismes vivants pour développer des bioindicateurs environnementaux en partant du postulat que certains taxons réagissent de manière prévisible à une modification de l'état de l'environnement, avec la contrainte qu'ils soient facilement observables et quantifiables (Mc Geoch, 1998). Les sols ne sont pas en reste sur le sujet. En contexte agricole, l'étude de la biodiversité des sols a permis d'identifier des taxons bioindicateurs à intégrer aux outils d'aide à la décision pour les agriculteurs (Bispo *et al*., 2009a).

Le Réseau de Mesures de la Qualité des Sols (RMQS), crée en 2000, est déployé sur l'ensemble du territoire français métropolitain ainsi qu'aux Antilles, à la Réunion, à Mayotte et en Guyane, et repose sur un échantillonnage standardisé avec une maille de 16x16 km et 2240 sites suivis tous les 15 ans (Jolivet *et al*., 2018 ; Jolivet, 2020, https://www.gissol.fr/le-gis/programmes/rmqs-34). La première campagne d'échantillonnage (appelé ensuite RMQS1) a été réalisée de 2000 à 2015 et la deuxième a commencé en 2016 et se poursuivra jusqu'à 2027 (appelée ensuite RMQS2). Dans le cadre du RMQS, des données pédologiques et agronomiques sont générées. Le RMQS a également servi de support pour la surveillance de la biodiversité du sol.

Dans cet article, nous allons exposer les apports à la connaissance de la biodiversité des programmes adossés au RMQS. À ce jour, quatre sont terminés, un est encore en cours et la phase de test du dernier a débuté en automne 2020.

MATÉRIELS ET MÉTHODES

Présentation des programmes « Biodiversité » et de leurs questions de recherche

Six programmes de suivi de la biodiversité ont, sont ou pourraient être adossés au RMQS : le suivi des microorganismes (ECOMIC-RMQS en 2006, MetaTAXOMIC-RMQS en 2011 et MetaOMIC-RMQS en 2016 et Fungimic-RMQS en 2018, regroupés sous le terme ECOMIC-RMQS ensuite), RMQS-Biodiv Bretagne en 2006, GéoTruffe et Floris en 2017, le suivi des activités enzymatiques depuis 2016 et le RMQS-Biodiversité dont la phase de test a débuté durant l'automne 2020. Ces programmes sont très variés aussi bien par leurs objets d'étude, leur localisation, l'aire géographique couverte, leur durée et leur stade d'avancement *(Tableau 1).* Pour chacun de ces programmes, chaque site a été échantillonné une fois.

Tableau 1 : Présentation des programmes sur la biodiversité.
Table 1 : *Presentation of biodiversity programs.*

Programme	Assemblages biologiques	Méthodologie	Localisation	Période (Campagne RMQS*)	Résultats
ECOMIC-RMQS	Microorganismes	Echantillon composite de sol	France métropolitaine	Depuis 2006 (RMQS1 et 2)	Biogéographie Impact des modes d'usage Description des habitats
RMQS-Biodiv Bretagne	Vers de terre, nématodes, microarthropodes (collemboles, acariens) microorganismes, macrofaune endogée, dégradation de la matière organique	Echantillon de sol Carotte Test-bêche Sac de litière	Bretagne	2006-2007 (RMQS1)	Distribution Lien avec les pratiques agricoles (fertilisation, travail du sol et utilisation de pesticides)
GéoTruffe	Truffes (*Tuber magnatum, T. brumale, T. aestivum, T. melanosporum* et *T. indicum*)	Echantillon composite de sol	Sites dont les caractéristiques pédologiques et environnementales sont propices aux truffes	2017-2018 (RMQS2)	Amélioration de la connaissance de l'autoécologie et de la distribution des truffes en France
Floris	Flore des prairies permanentes de montagne	Relevés botaniques	Prairies du Massif Central	2017-2018 (RMQS1)	Effet des pratiques agricoles sur les communautés de flore des prairies permanentes
Activités enzymatiques	Activités enzymatiques Respiration cellulaire	Echantillon composite de sol	France métropolitaine	Depuis 2016 (RMQS2)	Analyses en cours, Création de référentiels
Phase de test du RMQS-Biodiversité	Bactéries, champignons et archées, Protistes, Nématodes, Mésofaune endogée Macrofaune endogée, Mésofaune de surface, Macrofaune de surface, Activité enzymatique, Porosité du sol, Dégradation de la matière organique, en discussion : Flore et Fonge	Echantillon composite de sol Carottes de sol Pots Barber Test-bêche et application de moutarde	Phase de test : 30 sites répartis sur l'ensemble de la France métropolitaine	2020-2021 (RMQS2)	Débuté en automne 2020

Ces programmes ont eu pour objectifs d'établir la distribution des différents taxons du sol à l'échelle nationale ou régionale, de décrire leurs habitats, de mettre en évidence l'effet de l'occupation du sol et des pratiques agricoles sur ces derniers et enfin de proposer des bioindicateurs de la qualité du sol.

De nombreux taxons ont été étudiés, appartenant à la micro, méso et macrofaune du sol et à la flore des prairies permanentes. Le RMQS-Biodiversité (actuellement en phase de test), programme de surveillance de la biodiversité du sol en projet, s'inscrit dans la poursuite des programmes ECOMIC-RMQS, RMQS-Biodiv Bretagne et le suivi de l'activité enzymatique en élargissant au suivi des protistes, de la méso et macrofaune de surface et de la porosité du sol.

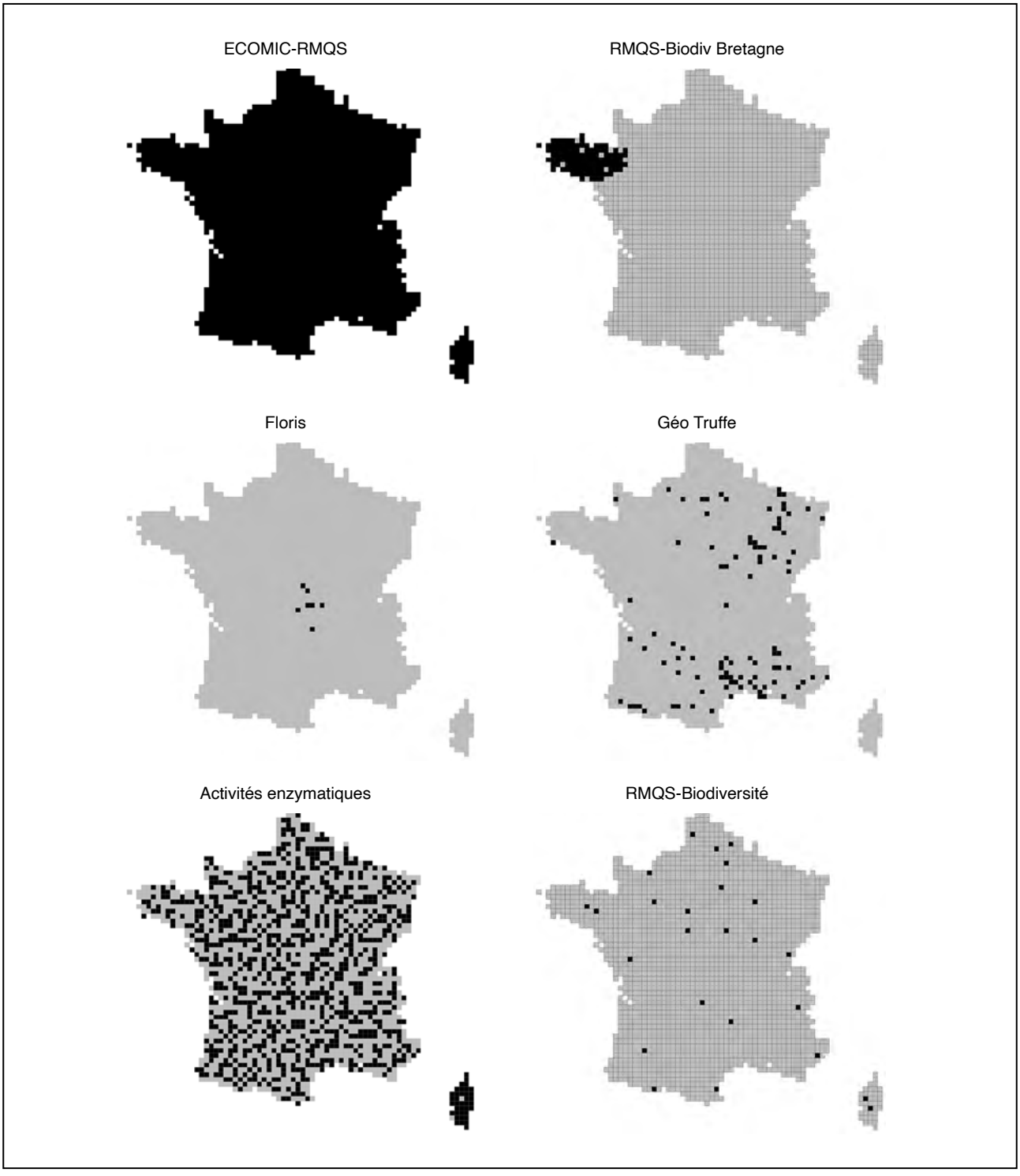
Sites RMQS échantillonnés

Durant la première campagne d'échantillonnage (RMQS1), seul ECOMIC-RMQS couvrait l'ensemble des sites RMQS de France métropolitaine. RMQS-Biodiv Bretagne et FLORIS se sont focalisés sur deux régions : respectivement la Bretagne et le Massif Central *(Figure 1).* Dans le programme GéoTruffe, les sites échantillonnés ont été choisis selon leurs caractéristiques pédologiques et leur végétation, propices ou non à la présence de truffes.

Depuis le début de la deuxième campagne (RMQS2), les microorganismes et les activités enzymatiques sont suivis sur l'ensemble des sites. Le RMQS-Biodiversité en est pour l'instant à l'étape de test et a vocation à être déployé sur l'ensemble des sites.

Figure 1 : Répartition des sites échantillonnés (en noir) pour les programmes ECOMIC-RMQS, RMQS-Biodiv Bretagne, FLORIS, Géotruffe, les activités enzymatiques (sites jusqu'à mars 2021, mais l'ensemble des sites de la 2e campagne RMQS seront analysés) et RMQS-Biodiversité (sites prévus pour 2020 et 2021, 4 encore à choisir).

Figure 1 : *Distribution of sampled sites (in black) for the programs ECOMIC-RMQS, RMQS-Biodiv Bretagne, FLORIS, Géotruffe, enzymatic activities (sites until March 2021 but the whole sites of the RMQS second campaign will be sampled) and the RMQS-Biodiversity (sites planned for 2020 and 2021, 4 still to choose).*



Utilisation des échantillons et des données du RMQS

Pour chaque site du RMQS, la physico-chimie du sol est analysée et les gestionnaires ou propriétaires sont interrogés sur les pratiques agricoles. Cette multiplicité des données sur un même site présente un fort intérêt car ces données peuvent être utilisées en tant que co-variables comme pour l'étude de la biodiversité du sol (Bouvais, 2018 ; *Tableau 2*).

Articulation de la phase de terrain des programmes « Biodiversité » avec celle du RMQS

Dans le cadre du RMQS, des prélèvements de sol sont effectués à différentes profondeurs. Pour chaque profondeur, les prélèvements sont mélangés de manière homogène pour former un échantillon composite. L'échantillon composite de surface correspond à une profondeur de 0 à 25 cm pour les sites en grandes cultures et à 0 à 30 cm pour les autres occupations du sol (Jolivet *et al*., 2018).

Dans le cadre des projets ECOMIC-RMQS et GéoTruffe, les échantillons de sol utilisés sont des aliquotes de l'échantillon composite de surface, prélevés lors de la première campagne du RMQS et entreposés au Conservatoire européen des échantillons de sols (CEES, *Tableau 3*). Pour GéoTruffe, deux sites complémentaires ont été échantillonnés afin de pouvoir tester sur des échantillons frais la méthode de caractérisation des espèces de truffe basée sur l'ADN et confirmer ou infirmer la réponse obtenue à partir des échantillons issus du conservatoire européen des échantillons de sol. Pour le projet RMQS-Biodiv Bretagne, les suivis de biodiversité étaient tous indépendants de l'échantillonnage du RMQS et étaient découplés des interventions RMQS (respectivement entre le 15/02 et le 25/04 en 2006 et 2007 et entre le 17/03/05 et 03/04/07). Ils étaient effectués sur une surface d'échantillonnage de 36 m² localisée à 5 m de celle du RMQS (Cluzeau *et al*., 2009, 2012).

Tableau 2 : Données du RMQS utilisées comme co-variables dans les programmes sur la biodiversité (adapté de Bouvais, 2018).
Table 2 : *RMQS data used as co-variables in biodiversity programs (adapted from Bouvais, 2018).*

Programme « Biodiversité »	Données du RMQS		
	Usage du sol	Analyses physico-chimiques	Enquêtes agronomiques
ECOMIC-RMQS	Oui	Oui	Oui
RMQS-Biodiversité Bretagne	Oui	Oui	Oui
Floris	Uniquement en prairies	Oui	Oui
Activité enzymatique	Oui	Prévu	Prévu
GéoTruffe	Oui	Oui	Pas de site agricole
RMQS-Biodiversité	Prévu	Prévu	Prévu

Tableau 3 : Articulation de la phase de terrain des programmes « biodiversité » avec celle du RMQS.
Table 3 : *Managing of the fieldwork of biodiversity programs with RMQS one.*

Programme « Biodiversité »	Origine des échantillons	Etat des aliquotes de l'échantillon composite de surface	Période d'échantillonnage de la biodiversité en même temps que le terrain RMQS
ECOMIC-RMQS	RMQS	Sec	Simultanée
RMQS-Biodiversité Bretagne	Spécifique	Frais	Décalée
Floris	RMQS	Sec	Décalée
Activité enzymatique	RMQS	Frais	Simultanée
GéoTruffe	RMQS sauf pour quelques sites	Sec	Simultanée
RMQS-Biodiversité	RMQS	Frais	Simultanée

RÉSULTATS

Répartition des organismes du sol à l'échelle régionale et nationale

Les programmes « Biodiversité » ont permis d'acquérir des connaissances sur les aires de répartition de certains organismes du sol. Dans le cadre d'ECOMIC-RMQS, les premières cartes de distribution des phyla de bactéries à l'échelle de la France métropolitaine ont été mises au point et regroupées dans un atlas (Karimi *et al*., 2018a). Cet atlas offre un panorama de ces communautés bactériennes et de leur importance dans la qualité et la fertilité des sols (Karimi *et al*., 2018a). À l'échelle de la Bretagne, la distribution des taxa de vers de terre, collemboles et nématodes a été établie (Cluzeau *et al*., 2012 ; Pérès *et al*., 2008 ; Villenave *et al*., 2013). Pour la truffe blanche *Tuber magnatum*, trois nouvelles zones de présence ont été identifiées en Franche-Comté, en Auvergne-Rhône Alpes et Occitanie (Levesque, 2017). Tous ces suivis de biodiversité ont permis de mettre en évidence la structuration spatiale de la distribution des taxons. Ces suivis du RMQS ont mis en évidence une forte hétérogénéité dans les distributions des phyla de bactéries (Dequiedt *et al*., 2020 ; Karimi *et al*., 2018b). Les déterminants majeurs de la répartition des phylum bactériens sont des paramètres pédologiques et d'occupation du sol avec par ordre d'importance le pH, l'usage du sol, la texture, les nutriments et le climat alors que l'hypothèse initiale donnait un rôle plus important aux facteurs climatiques (Karimi *et al*., 2018b). En Bretagne, la structure spatiale des distributions des nématodes et des vers de terre découlent des propriétés physico-chimiques du sol et de l'usage du sol (Pérès *et al*., 2008).

Description des habitats des bactéries et des archées

Les habitats des bactéries ont été décrits en fonction des variables pédologiques et l'usage du sol (Karimi *et al*., 2018a). Cinq variables environnementales sont utilisées pour caractériser 16 habitats bactériens (décrits dans le *tableau 4*) : le pH, l'usage du sol, le ratio carbone/azote, la teneur en carbone organique du sol et la température annuelle moyenne.

Effet de l'usage du sol sur la biodiversité des sols

Pour les bactéries, l'usage du sol (cultures, forêts, prairies) explique la présence des phyla (richesse spécifique, biomasse) après le pH (*Tableau 5*, Karimi *et al*., 2018a). Les réseaux d'interactions bactériens sont plus complexes en forêts et prairies qu'en cultures annuelles ou pérennes (Dequiedt *et al*., 2020b ; Karimi *et al*., 2019). En Bretagne, la faune du sol (nématodes, acariens,

Tableau 4 : Liste des habitats décrits des bactéries et des archées (d'après Karimi *et al*., 2018a).
Table 4 : *List of bacteria and archea habitats (from Karimi et al., 2018a).*

Surface du territoire métropolitain pour chaque habitat (%)	Description de l'habitat
20,9	Sols alcalins de forêts
18,7	Sols acido-neutres de plaines cultivées
16,8	Sols alcalins des plaines cultivées du Nord et de l'Est
15,2	Sols acido-neutres de prairies et de milieux peu anthropisés
13,7	Sols acides de plaines cultivées
13,1	Sols alcalins des plaines du Sud-Ouest, du pourtour méditerranéen et du centre de la France
11,5	Sols acides de prairies
11,2	Sols acido-neutres de forêts de feuillus
9,7	Sols acides de forêts de feuillus et de milieux peu anthropisés
8,4	Sols légèrement acides et pauvres en carbone de plaines cultivées
8	Sols très acides de prairies ou de cultures
8	Sols légèrement acides et riches en carbone de prairies
7,3	Sols légèrement acides et riches en carbone de plaines cultivées
4,8	Sols très acides de forêts de feuillus et de milieux peu anthropisés
4,3	Sols très acides et sableux de forêts
1,1	Sols très acides de forêt des Landes

macrofaune endogée dont les vers de terre) est globalement plus abondante en forêt et prairies qu'en grandes cultures (Cluzeau *et al.*, 2012). La biomasse microbienne est aussi plus faible en grandes cultures (Cluzeau *et al.*, 2012). Chez les nématodes, les catégories trophiques dominantes diffèrent selon l'usage du sol : les bactériophages sont les plus abondants en grandes cultures, les phytoparasites en prairies et les fongivores en forêt (Cluzeau *et al.*, 2012 ; Villenave *et al.*, 2013).

Effet des pratiques agricoles sur la biodiversité des sols et la flore des prairies

Les travaux du RMQS-Biodiv Bretagne mettent en avant l'effet des pratiques agricoles sur les taxons du sol (*Figure 2*). La gestion et la fertilisation des parcelles agricoles influencent l'abondance en macrofaune et collemboles, ainsi que la richesse spécifique en collemboles et nématodes. Ces taxons réagissant

Tableau 5 : Effet de l'usage du sol sur la biodiversité du sol.

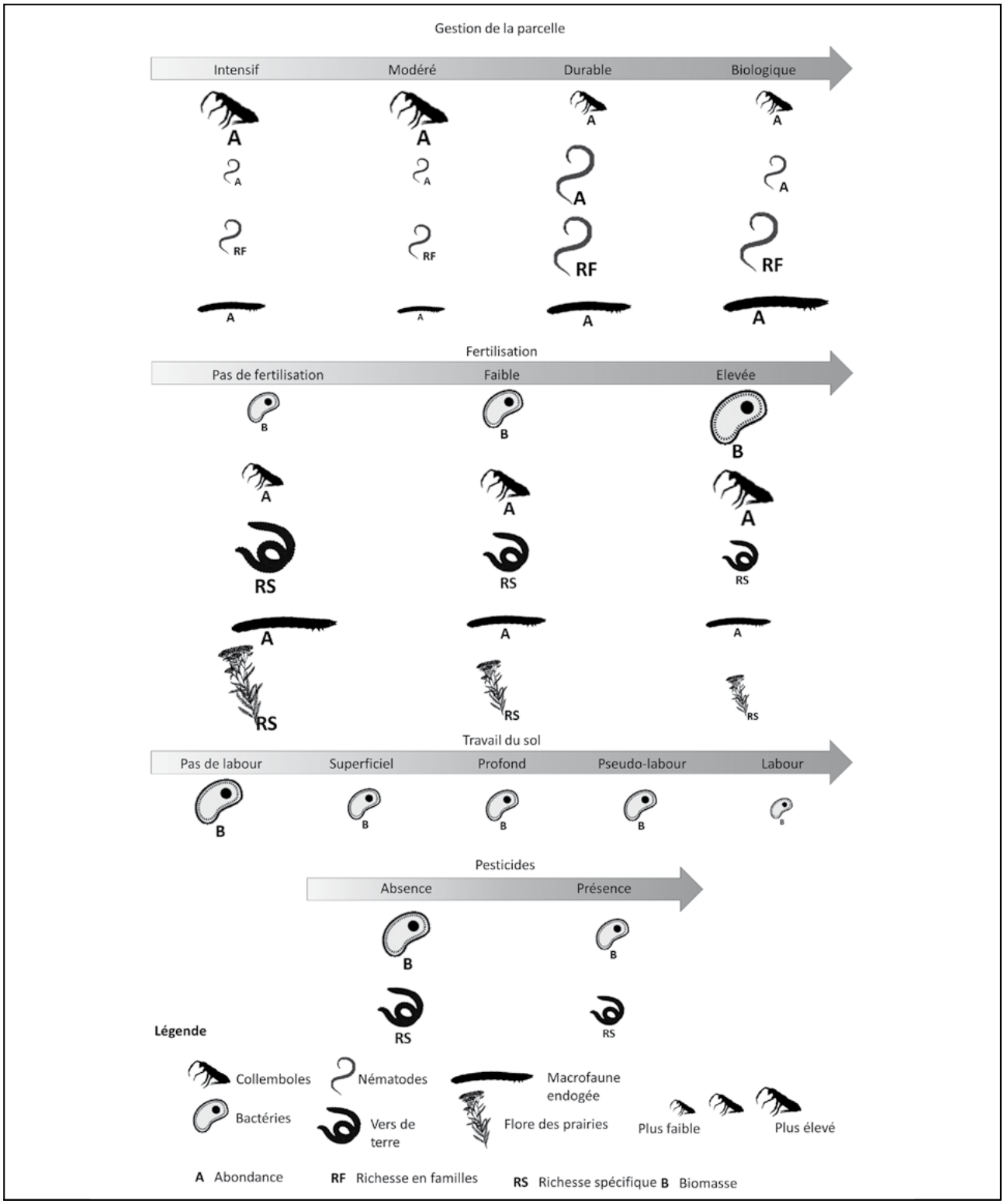
Table 5 : *Effect of land use on soil biodiversity.*

Compartiment de biodiversité	Critère	Comparaison entre usages du sol	Programme et source
Micro-organismes	Complexité du réseau d'interactions bactériens	< &	ECOMIC-RMQS Karimi et al., 2019
	Richesse spécifique	& <	ECOMIC-RMQS Dequiedt et al., 2020
	Biomasse	< &	ECOMIC-RMQS Dequiedt et al., 2020 RMQS-Biodiv Bretagne Cluzeau et al., 2012
	Abondance en ARN16S	< <	RMQS-Biodiv Bretagne Cluzeau et al., 2012
	Abondance en séquences de pcaH	< <	RMQS-Biodiv Bretagne Cluzeau et al., 2012
Nématodes	Abondance	< &	RMQS-Biodiv Bretagne Cluzeau et al., 2012
	Groupes trophiques dominants	Bactérivores Fongivores Phytoparasites	RMQS-Biodiv Bretagne Villenave et al., 2013
Acariens	Abondance	< <	RMQS-Biodiv Bretagne Cluzeau et al., 2012
Macrofaune totale endogée	Abondance	& <	RMQS-Biodiv Bretagne Cluzeau et al., 2012
Vers de terre	Abondance	& <	RMQS-Biodiv Bretagne Cluzeau et al., 2012
	Richesse spécifique	<	RMQS-Biodiv Bretagne Cluzeau et al., 2012

Légende : Cultures, Prairies, Forêt

Figure 2 : Effet du type de gestion, du niveau de fertilisation, du travail du sol et de l'utilisation de pesticides sur les microorganismes, la faune du sol et la flore des prairies (seuls les taxons présentant des différences significatives entre modalités sont représentés, d'après Cluzeau *et al.* (2012) et Perronne *et al.* (2019)).

Figure 2 : *Effect of management type, fertilization level, tillage and pesticide use on microorganisms, soil fauna and grassland flora (only taxa with significant differences between modalities are shown, based on Cluzeau et al. (2012) and Perronne et al. (2019)).*



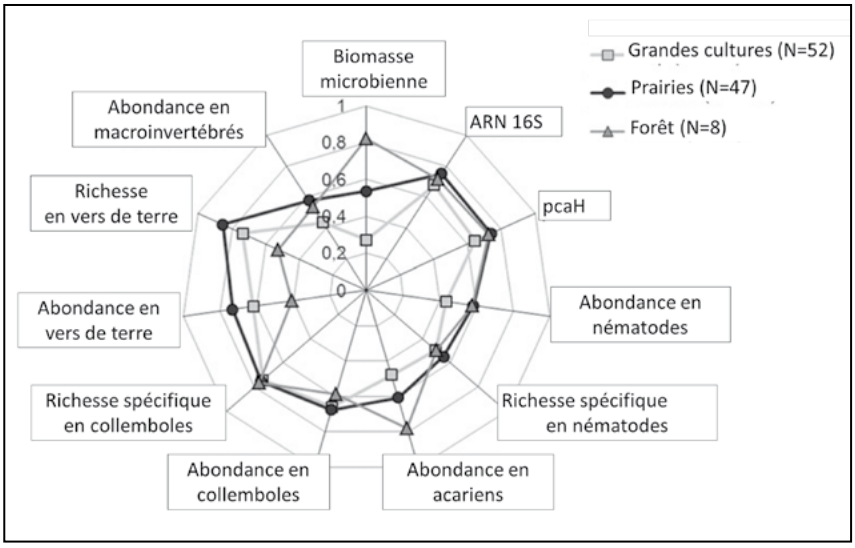


Figure 3 : Abondance et richesse spécifique de plusieurs groupes d'organismes du sol selon trois usages du sol. 0 correspond aux valeurs minimales et 1 aux valeurs maximales observées (tiré de Cluzeau *et al*., 2012).

***Figure 3** : Abundance and richness of several soil biological groups according to three land-use types. 0 corresponds to the minimal values and 1 to the maximal values recorded at the regional scale of Brittany (from Cluzeau et al., 2012).*

aux pratiques agricoles, peuvent être considérés comme des bioindicateurs de celles-ci (Cluzeau *et al*., 2012). Dans le cadre de Floris, il a été montré que l'augmentation de la quantité de biomasse exportée (pâturée ou fauchée) conduit d'une part à une diminution de la richesse spécifique en lien avec l'augmentation de la productivité (qui n'était que très faiblement liée aux apports totaux d'azote) et d'autre part, à une diminution de la richesse fonctionnelle liée à l'augmentation de la productivité (Perronne *et al*., 2019).

Mise au point d'un bioindicateur synthétique des pratiques agricoles

Un bioindicateur synthétique de l'effet des pratiques agricoles sur la biodiversité a été construit à partir des résultats du RMQS-Biodiversité en Bretagne. Il considère les groupes taxonomiques ayant la réponse la plus contrastée par rapport à la fertilisation, le travail du sol et le mode de gestion : les vers anéciques, les vers endogés, les macroarthropodes et les mollusques, les collemboles épigés, les nématodes phytoparasites, les nématodes consommateurs de bactéries et la biomasse microbienne. Cet indice ne demande pas une identification des taxons à l'espèce ce qui le rend mesurable par un public plus large que les taxonomistes spécialisés (Ponge *et al*., 2013). Une représentation synthétique a aussi été proposée, rendant compte de l'abondance et de la diversité des différents taxons (microorganismes, nématodes, acariens, collemboles, vers de terre, macro-invertébrés) en fonction de l'usage des sols (*Figure 3*).

DISCUSSION

Pour améliorer les connaissances sur la biodiversité du sol, il est nécessaire de mettre en place une surveillance des organismes et des fonctions du sol à large échelle (Gardi *et al*., 2009). Les programmes « Biodiversité » du RMQS y concourent en ayant 1) établi et révisé la distribution des organismes du sol et 2) identifié les taxons bioindicateurs de la qualité du sol.

Depuis le programme Bioindicateurs porté par l'ADEME (Bispo *et al*., 2009a ; Bispo *et al*., 2017 ; Pérès *et al*., 2012), il a été démontré que les taxons du sol à travers leur densité (abondance, biomasse) et leur diversité (fonctionnelle, spécifique) peuvent servir de bioindicateurs de la qualité du sol. La qualité du sol peut être définie comme la capacité d'un sol à fonctionner pour soutenir la productivité biologique, maintenir la qualité de l'environnement et promouvoir la santé des organismes (Doran et Parkin, 1994). Les bioindicateurs de la qualité des sols basés sur les organismes du sol constituent un outil d'aide à la décision développé pour les agriculteurs et de plus en plus utilisé par ces derniers. Nous pouvons citer les programmes Envasso, Ecofinders et Landmark déployés sur plusieurs pays européens (Bispo *et al*., 2009b ; Griffiths *et al*., 2016 ; Van Leeuwen *et al*., 2019) et, en France, les programmes Agrinnov de 2010 à 2015 et EcoVitisol débuté en 2018. Le critère employé (pour exemples, la richesse spécifique ou l'abondance) pour décrire le taxon est également important comme par exemple, pour les vers de terre : l'utilisation de pesticides influence négativement leur richesse spécifique alors qu'elle n'a pas d'effet sur l'abondance (Cluzeau *et al*., 2012).

Le RMQS a bénéficié des avancées obtenues grâce aux programmes antérieurs et a permis de tester à l'échelle régionale ou nationale la pertinence de certains indicateurs de biodiversité du sol. De plus, la force du RMQS réside aussi dans la prise en compte des co-variables qui a permis la création d'un référentiel à l'échelle nationale. Par son déploiement sur une grande part du territoire français et son échantillonnage standardisé, il offre un support robuste à la surveillance de la biodiversité. Il a fait faire un véritable bond en avant à la biogéographie des bactéries en permettant l'établissement pour la première fois de cartes de

distribution et de leurs habitats en France (Karimi *et al.*, 2018b). Pour d'autres organismes, comme la truffe blanche ou la faune du sol, les aires de répartition ont été révisées (Cluzeau *et al.*, 2012 ; Levesque, 2017 ; Pérès *et al.*, 2008 ; Perronne *et al.*, 2019 ; Villenave *et al.*, 2013). Ces cartes de distribution pourront servir à compléter le réseau d'aires protégées, en prenant en compte la biodiversité du sol ce qui n'est pour l'instant pas le cas (Dequiedt *et al.*, 2020b). L'effet de l'usage du sol sur les organismes du sol a aussi été mis en évidence. Ces résultats permettent également de revisiter certaines idées préconçues. Ainsi, paradoxalement, les bactéries présentent une richesse spécifique plus élevée dans les parcelles agricoles. Le stress modéré dû aux pratiques agricoles, augmenterait la richesse spécifique en diminuant la compétition entre les organismes (Terrat *et al.*, 2017). Ce résultat va à l'encontre de l'idée selon laquelle les zones naturelles sont plus riches en biodiversité que les zones anthropisées et plaide pour l'intégration de zones cultivées dans les aires protégées.

PERSPECTIVES

L'émergence de suivis fonctionnels avec la mesure des activités enzymatiques lors de la deuxième campagne du RMQS

Les fonctions écologiques ont été moins traitées dans les programmes de biodiversité du RMQS. L'approche fonctionnelle est complémentaire de l'approche taxonomique. Une approche purement taxonomique est très peu informative sur les interactions entre les organismes et les fonctions du sol même si cela est de moins en moins vrai avec les outils d'inférence fonctionnelle de la diversité.

La dégradation de la matière organique a été néanmoins suivie dans le cadre du RMQS-Biodiv Bretagne. Depuis 2016, les activités enzymatiques sont mesurées en routine sur les échantillons de RMQS (5 enzymes en 2016-2017 puis 10 enzymes depuis 2018 ; *Tableau 6*).

Les activités enzymatiques constituent des indicateurs du fonctionnement du sol (Nannipieri *et al.*, 2002) et de sa biodiversité fonctionnelle (Caldwell, 2005). Les mesures des activités enzymatiques des sols renseignent sur l'implication des microorganismes dans les cycles biogéochimiques et le métabolisme des macromolécules, et/ou traduisent l'activité métabolique globale de ces écosystèmes (Cheviron *et al.*, 2018). Un référentiel des activités enzymatiques est en cours de mise en place.

Surveillance de la biodiversité du sol avec le RMQS-Biodiversité

À l'exception des microorganismes, la limite principale des programmes « Biodiversité » jusque-là adossés au RMQS est leur durée assez courte qui limite l'étude de la dynamique temporelle de la biodiversité du sol. Conscients de ce manque, avec le soutien de l'Office Français de la Biodiversité (OFB), nous avons voulu savoir s'il était possible et soutenable d'adosser au RMQS un réseau de surveillance pérenne de la biodiversité du sol. Après concertations avec des experts des taxons et fonctions du sol, une première proposition a émergé sous le nom de RMQS-Biodiversité (Imbert *et al.*, 2019). Le RMQS-Biodiversité couvre largement les principaux groupes taxonomiques des sols. Au préalable d'un déploiement sur l'ensemble du réseau RMQS, une phase de test des protocoles d'échantillonnage sélectionnés a débuté à l'automne 2020 et se poursuivra en 2021, sur 30 sites. L'objectif de cette phase de test est d'estimer les besoins humains, logistiques et financiers à la mise en œuvre du RMQS-Biodiversité afin de décider de sa faisabilité et de son déploiement futur.

CONCLUSION

Les programmes de recherche « Biodiversité » s'appuyant sur le RMQS ont d'ores et déjà permis de répondre à des questions fondamentales sur la biogéographie des microorganismes, à des questions plus appliquées sur l'effet des pratiques agricoles et de l'usage du sol sur la biodiversité du sol et la flore des prairies permanentes et à l'établissement de bioindicateurs et de valeurs de référence. Avec la deuxième campagne du RMQS, la dimension temporelle pourra être abordée pour les microorganismes sur l'ensemble du territoire, et aussi pour d'autres taxons déjà connus sur des territoires plus restreints, à l'échelle régionale. Les fonctions ne sont pas en reste avec la mesure des activités enzymatiques sur des échantillons de sol prélevés à partir de 2016 et leur intégration au projet du RMQS-Biodiversité national.

Tableau 6 : Années de suivi des activités enzymatiques lors de la deuxième campagne du RMQS.

Table 6 : *Monitoring years of the enzymatic activities during the RMQS second campaign.*

Activité	2016	2017	2018	2019
Phosphatase	Oui	Oui	Oui	Oui
β-Glucosidase	Oui	Oui	Oui	Oui
Arylsulfatase	Oui	Oui	Oui	Oui
Uréase	Oui	Oui	Oui	Oui
Arylamidase	Oui	Oui	Oui	Oui
Phosphatase alcaline			Oui	Oui
Phosphodiestérase			Oui	Oui
α -Glucosidase			Oui	Oui
β-Galactosidase			Oui	Oui
ν-acetyl-glucosaminidase			Oui	Oui

Si le RMQS-Biodiversité est finalement étendu à l'ensemble du territoire français, le RMQS ouvrirait alors un front de recherche sur la biodiversité du sol. Les sites RMQS, par la variété des données récoltées, se rapprochent petit à petit de sites ateliers pour les pédologues, les agronomes et aujourd'hui pour les écologues.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient l'ensemble des acteurs du RMQS : les exploitants, propriétaires et gestionnaires des sites, les partenaires régionaux en charge des prélèvements et observations de terrain, les laboratoires d'analyse, les agents d'InfoSol et du CEES. Les auteurs remercient également l'ensemble du personnel des laboratoires partenaires du RMQS ayant contribué à la réussite de ces programmes.

De nombreux financeurs ont appuyé ces programmes : pour GéoTruffe, le département INRAE ECODIV et le labex ARBRE (ANR-11-LABX-0002-01), pour RMQS-Biodiv Bretagne, l'ADEME, pour Floris, la région Auvergne-Rhône-Alpes, le FEDER et le programme « Investissements d'avenir » (16-IDEX-0001 CAP20-25), pour ECOMIC-RMQS, l'ANR et l'ADEME, pour le RMQS-Biodiversité, l'OFB et pour le RMQS, le Gis Sol.

Biochem-Env est un service 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 » portant la référence ANR-11-INBS-0001.

Les auteurs remercient les relecteurs Alexis Thoumazeau et Eric Blanchart pour leurs conseils et suggestions qui ont permis d'améliorer le manuscrit de cet article.

BIBLIOGRAPHIE

Artz R., Anastasiou D., Arrouays D., Bastos A.C., Bendetti A., Bispo A., Brandmayr P., Broll G., Bunning S., Castracani C. (2010). European atlas of soil biodiversity. Office des Publications Officielles des Communautés Européennes.

Bispo A., Grand C., Galsomies L. (2009a). Le programme ADEME "Bioindicateurs de qualité des sols" : Vers le développement et la validation d'indicateurs biologiques pour la protection des sols. Etude et Gestion des Sols. 16(3/4). 145-158.

Bispo A., Cluzeau D., Creamer R., Dombos M., Graefe U., Krogh P.H., Sousa J.P., Pérès G., Rutgers M., Winding A., Römbke J. (2009b). Indicators for Monitoring Soil Biodiversity. Integr. Environ. Assess. Manag. 5, 717–719.

Bispo A., Jolivet C., Ranjard L., Cluzeau D., Hedde M., Pérès G. (2017). Mise en place d'outils et de bio-indicateurs pertinents de la qualité des sols. Sols Vie Souterr. Enjeux Majeurs En Agroécologie 175–206.

Bouvais A. (2018). Amélioration des enquêtes du réseau de mesures de la qualité des sols (RMQS) concernant les pratiques de gestion des sites (Mémoire de fin d'études). France. Ecole Nationale des Ingénieurs des Travaux Agricoles de Bordeaux.

Burkhardt U., Russell D.J., Decker P., Döhler M., Höfer H., Lesch S., Rick S., Römbke J., Trog C., Vorwald J., Wurst E., Xylander W.E.R. (2014). The Edaphobase project of GBIF-Germany—A new online soil-zoological data warehouse. Appl. Soil Ecol., XVI International Colloquium on Soil Zoology & XIII International Colloquium on Apterygota, Coimbra, 2012 – Selected papers 83, 3–12. https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2014.03.021

Caldwell B.A. (2005). Enzyme activities as a component of soil biodiversity: a review. Pedobiologia. 49, 637–644.

Cameron E.K., Martins I.S., Lavelle P., Mathieu J., Tedersoo L., Bahram M., Gottschall F., Guerra C.A., Hines J., Patoine G., Siebert J., Winter M., Cesarz S., Ferlian O., Kreft H., Lovejoy T.E., Montanarella L., Orgiazzi A., Pereira H.M., Phillips H.R.P., Settele J., Wall D.H., Eisenhauer N. (2019). Global mismatches in aboveground and belowground biodiversity. Conserv. Biol. 33, 1187–1192. https://doi.org/10.1111/cobi.13311

Cameron E.K., Martins I.S., Lavelle P., Mathieu J., Tedersoo L., Gottschall F., Guerra C.A., Hines J., Patoine G., Siebert J., Winter M., Cesarz S., Delgado-Baquerizo M., Ferlian O., Fierer N., Kreft H., Lovejoy T.E., Montanarella L., Orgiazzi A., Pereira H.M., Phillips H.R.P., Settele J., Wall D.H., Eisenhauer N. (2018). Global gaps in soil biodiversity data. Nat. Ecol. Evol. 2, 1042–1043. https://doi.org/10.1038/s41559-018-0573-8

Cheviron N., Grondin V., Mougin C. (2018). Biochem-Env: a platform of biochemistry for research in environmental and agricultural sciences. Environ. Sci. Pollut. Res. 25, 6154–6157. https://doi.org/10.1007/s11356-017-8973-x

Cluzeau D., Bellido A., Boulonne L., Cannavacciuolo M., Chaussot R., Cortet J., Fargette M., Giteau J.L., Guernion M., Jolivet C., Lavelle P., Foucaud-Lemercier B., Martin F., Mateille T., Mercier V., Pérès G., Pernin C., Plantard O., Ponge J.F., Ranjard L., Rougé L., Ruiz N., Tico S., Velasquez H., Villenave C., Walter C. (2009). RMQS BioDiv Bretagne, rapport final. Tome 2 : cahier des méthodes. Ademe, Rennes.

Cluzeau D., Guernion M., Chaussod R., Martin-Laurent F., Villenave C., Cortet J., Ruiz-Camacho N., Pernin C., Mateille T., Philippot L., Bellido A., Rougé L., Arrouays D., Bispo A., Pérès G. (2012). Integration of biodiversity in soil quality monitoring: Baselines for microbial and soil fauna parameters for different land-use types. Eur. J. Soil Biol. 49, 63–72. https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2011.11.003

Comerford N.B., Franzluebbers A.J., Stromberger M.E., Morris L., Markewitz D., Moore R. (2013). Assessment and Evaluation of Soil Ecosystem Services. Soil Horiz. 54, sh12-10-0028. https://doi.org/10.2136/sh12-10-0028

Decaëns T. (2010). Macroecological patterns in soil communities: Soil community macroecology. Glob. Ecol. Biogeogr. 19, 287–302. https://doi.org/10.1111/j.1466-8238.2009.00517.x

Dequiedt S., Karimi B., Prévost-Bouré N.C., Terrat S., Horrigue W., Djemiel C., Lelievre M., Nowak V., Wincker P., Jolivet C. (2020). Le RMQS au service de l'écologie microbienne des sols français. Etude Gest. Sols 27, 51–71.

Doran J.W., Parkin T.B. (1994). Defining and Assessing Soil Quality. Defin. Soil Qual. Sustain. Environ. sssaspecialpubl, 1–21. https://doi.org/10.2136/sssaspecpub35.c1

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., Montanarella L., Arrouays D., Bispo A., Lemanceau P., Jolivet C., Mulder C., Ranjard L., Römbke J., Rutgers M., Menta C. (2009). Soil biodiversity monitoring in Europe: ongoing activities and challenges. Eur. J. Soil Sci. 60, 807–819. https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2009.01177.x

Griffiths B.S., Römbke J., Schmelz R.M., Scheffczyk A., Faber J.H., Bloem J., Pérès G., Cluzeau D., Chabbi A., Suhadolc M. (2016). Selecting cost effective and policy-relevant biological indicators for European monitoring of soil biodiversity and ecosystem function. Ecol. Indic. 69, 213–223.

Imbert C., Santorufo L., Ortega C., Jolivet C., Bispo A. (2019). Un réseau de surveillance de la biodiversité adossé au Réseau de mesures de la qualité des sols (RMQS) ? Presented at the Améliorer le suivi de la Biodiversité des forêts métropolitaines : pourquoi, comment ? Plateforme Biodiversité pour la Forêt (PBF), Paris.

Jeffery S., Gardi C., Jones A., Montanarella L., Marmo L., Miko L., Ritz K., Pérès G., Römbke J., van der Putten W.H., Artz R., Anastasiou D., Arrouays D., Bastos A.C., Bendetti A., Bispo A., Brandmayr P., Broll G., Bunning S., Castracani C., Campbell C., Cluzeau D., Coates D., Creamer R., Diafas I., Durrant T., Foissner W., Fritz G.B., Gemmill-Herren B., Graefe U., Grasso D., Hol G., Hoogmoed M., Jabiol B., Jiménez J.J., Hedlund K., Krogh P.H., Lemanceau P., Licona-Manzur C., Luster J., Maistrello L., Menta C., Mulongoy K.J., Neilson R., Nienstedt K., Nileson U., Olazabal C., Pagliai M., Pawlik-Skowronska B., Ponge J.-F., Ritz K., Ranjard L., Roberti R., Rutgers M., Sartori G., Schill R.O., Sousa J.P., Stephenson S., Taiti S., Taylor A., Verheijen F., Wall D., Wolowski K., Zanella A. (2013). Atlas Européen de la Biodiversité des Sols. Commission Européenne. Office des Publications Officielles des Communautés Européennes. https://doi.org/10.2788/89331

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 RMQS2 : deuxième campagne métropolitaine2016–2027.

Karimi B., Dequiedt S., Terrat S., Jolivet C., Arrouays D., Wincker P., Cruaud C., Bispo A., Chemidlin Prévost-Bouré N., Ranjard L. (2019). Biogeography of Soil Bacterial Networks along a Gradient of Cropping Intensity. Sci. Rep. 9, 3812. https://doi.org/10.1038/s41598-019-40422-y

Karimi B., Prévost-Bouré N.C., Dequiedt S., Terrat S., Ranjard L. (2018a). Atlas français des bactéries du sol. Biotope Editions.

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

Levesque E. (2017). Etude de la distribution de la truffe blanche (Tuber magnatum Pico) en France (Rapport de stage) IUT Nancy-Brabois Génie Biologique Santé.

Mc Geoch M.A. (1998). The selection, testing and application of terrestrial insects as bioindicators. Biol. Rev. 73, 181–201. https://doi.org/10.1111/j.1469-185X.1997.tb00029.x

Nannipieri P., Kandeler E., Ruggiero P. (2002). Enzyme activities and microbiological and biochemical processes in soil. Enzym. Environ. Marcel Dekker N. Y. 1–33.

Orgiazzi A., Bardgett R.D., Barrios E. (2016a). Global soil biodiversity atlas. European Commission.

Orgiazzi A., Panagos P., Yigini Y., Dunbar M.B., Gardi C., Montanarella L., Ballabio C. (2016b). A knowledge-based approach to estimating the magnitude and spatial patterns of potential threats to soil biodiversity. Sci. Total Environ. 545, 11–20.

Pérès G., Chaussod R., Cortet J., Fargette M., Mateille T., Ponge J.-F., Ranjard L., Ruiz N., Villenave C., Mercier V. (2008). Relevance of different soil fauna and microflora groups in the monitoring of soil biodiversity: RMQS-Biodiv, a French pilot area experience., in: 15th International Colloquium on Soil Zoology.

Perronne R., Amiaud B., Bloor J., Benquey G., Jolivet C., Choler P., Violle C., Pottier J. (2019). Quelle pertinence du modèle diversité-productivité-perturbations pour analyser l'influence des pratiques agricoles sur la diversité des prairies permanentes du Massif central ? Fourrages 237, 47–55.

Pey B., Laporte M.-A., Nahmani J., Auclerc A., Capowiez Y., Caro G., Cluzeau D., Cortet J., Decaëns T., Dubs F., Joimel S., Guernion M., Briard C., Grumiaux F., Laporte B., Pasquet A., Pelosi C., Pernin C., Ponge J.-F., Salmon S., Santorufo L., Hedde M. (2014). A Thesaurus for Soil Invertebrate Trait-Based Approaches. PLoS ONE. 9, e108985. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0108985

Phillips H., Cameron E.K., Ferlian O., Türke M., Winter M., Eisenhauer N. (2017). Red list of a black box. Nat. Ecol. Evol. 1, 1–1.

Phillips H.R.P., Guerra C.A., Bartz M.L.C., Briones M.J.I., Brown G., Crowther T.W., Ferlian O., Gongalsky K.B., van den Hoogen J., Krebs J., Orgiazzi A., Routh D., Schwarz B., Bach E.M., Bennett J.M., Brose U., Decaëns T., König-Ries B., Loreau M., Mathieu J., Mulder C., van der Putten W.H., Ramirez K.S., Rillig M.C., Russell D., Rutgers M., Thakur M.P., de Vries F.T., Wall D.H., Wardle D.A., Arai M., Ayuke F.O., Baker G.H., Beauséjour R., Bedano J.C., Birkhofer K., Blanchart E., Blossey B., Bolger T., Bradley R.L., Callaham M.A., Capowiez Y., Caulfield M.E., Choi A., Crotty F.V., Crumsey J.M., Dávalos A., Cosin D.J.D., Dominguez A., Duhour A.E., van Eekeren N., Emmerling C., Falco L.B., Fernández R., Fonte S.J., Fragoso C., Franco A.L.C., Fugère M., Fusilero A.T., Gholami S., Gundale M.J., López M.G., Hackenberger D.K., Hernández L.M., Hishi T., Holdsworth A.R., Holmstrup M., Hopfensperger K.N., Lwanga E.H., Huhta V., Hurisso T.T., Iannone B.V., Iordache M., Joschko M., Kaneko N., Kanianska R., Keith A.M., Kelly C.A., Kernecker M.L., Klaminder J., Koné A.W., Kooch Y., Kukkonen S.T., Lalthanzara H., Lammel D.R., Lebedev I.M., Li Y., Lidon J.B.J., Lincoln N.K., Loss S.R., Marichal R., Matula R., Moos J.H., Moreno G., Morón-Ríos A., Muys B., Neirynck J., Norgrove L., Novo M., Nuutinen V., Nuzzo V., Rahman M.R., Pansu J., Paudel S., Pérès G., Pérez-Camacho L., Piñeiro R., Ponge J.-F., Rashid M.I., Rebollo S., Rodeiro-Iglesias J., Rodríguez M.Á., Roth A.M., Rousseau G.X., Rozen A., Sayad E., van Schaik L., Scharenbroch B.C., Schirrmann M., Schmidt O., Schröder B., Seeber J., Shashkov M.P., Singh J., Smith S.M., Steinwandter M., Talavera J.A., Trigo D., Tsukamoto J., de Valença A.W., Vanek S.J., Virto I., Wackett A.A., Warren M.W., Wehr N.H., Whalen J.K., Wironen M.B., Wolters V., Zenkova I.V., Zhang W., Cameron E.K., Eisenhauer N. (2019). Global distribution of earthworm diversity. Science. 366, 480–485. https://doi.org/10.1126/science.aax4851

Ponge J.-F., Pérès G., Guernion M., Ruiz-Camacho N., Cortet J., Pernin C., Villenave C., Chaussod R., Martin-Laurent F., Bispo A., Cluzeau D. (2013). The impact of agricultural practices on soil biota: A regional study. Soil Biol. Biochem. 67, 271–284. https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2013.08.026

Rutgers M., van Leeuwen J.P., Vrebos D., van Wijnen H.J., Schouten T., de Goede R.G.M. (2019). Mapping Soil Biodiversity in Europe and the Netherlands. Soil Syst. 3, 39. https://doi.org/10.3390/soilsystems3020039

Terrat S., Horrigue W., Dequietd 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

van den Hoogen J., Geisen S., Routh D., Ferris H., Traunspurger W., Wardle D.A., de Goede R.G.M., Adams B.J., Ahmad W., Andriuzzi W.S., Bardgett R.D., Bonkowski M., Campos-Herrera R., Cares J.E., Caruso T., de Brito Caixeta L., Chen X., Costa S.R., Creamer R., Mauro da Cunha Castro J., Dam M., Djigal D., Escuer M., Griffiths B.S., Gutiérrez C., Hohberg K., Kalinkina D., Kardol P., Kergunteuil A., Korthals G., Krashevska V., Kudrin A.A., Li Q., Liang W., Magilton M., Marais M., Martín J.A.R., Matveeva E., Mayad E.H., Mulder C., Mullin P., Neilson R., Nguyen T.A.D., Nielsen U.N., Okada H., Rius J.E.P., Pan K., Peneva V., Pellissier L., Carlos Pereira da Silva J., Pitteloud C., Powers T.O., Powers K., Quist C.W., Rasmann S., Moreno S.S., Scheu S., Setälä H., Sushchuk A., Tiunov A.V., Trap J., van der Putten W., Vestergård M., Villenave C., Waeyenberge L., Wall D.H., Wilschut R., Wright D.G., Yang J., Crowther T.W. (2019). Soil nematode abundance and functional group composition at a global scale. Nature. 572, 194–198. https://doi.org/10.1038/s41586-019-1418-6

Van Leeuwen J.P., Creamer R.E., Cluzeau D., Debeljak M., Gatti F., Henriksen C.B., Kuzmanovski V., Menta C., Pérès G., Saby N. (2019). Modelling of soil functions for assessing soil quality: Soil biodiversity and habitat provisioning. Front. Environ. Sci. 7, 113.

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 J. Soil Sci. 3, 30–45. https://doi.org/10.4236/ojss.2013.31005