

Intégration de la biodiversité des sols dans les réseaux de surveillance de la qualité des sols: exemple du programme pilote à l'échelle régionale, le RMQS BioDiv

Daniel Cluzeau, Guénola Pérès, Muriel Guernion, Rémi Chaussod, Jérôme Cortet, Mireille Fargette, Fabrice Martin-Laurent, Thierry Mateille, Céline Pernin, Jean-François Ponge, et al.

▶ **To cite this version:**

Daniel Cluzeau, Guénola Pérès, Muriel Guernion, Rémi Chaussod, Jérôme Cortet, et al.. Intégration de la biodiversité des sols dans les réseaux de surveillance de la qualité des sols: exemple du programme pilote à l'échelle régionale, le RMQS BioDiv. Étude et Gestion des Sols, 2009, 16 (3-4), pp.187-201. hal-00494011v2

HAL Id: hal-00494011
https://hal.science/hal-00494011v2

Submitted on 4 Nov 2014

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.

Intégration de la biodiversité des sols dans les réseaux de surveillance de la qualité des sols :

Exemple du programme-pilote à l'échelle régionale, le RMQS BioDiv

D. Cluzeau(1), G. Pérès(1), M. Guernion(1), R. Chaussod(2), J. Cortet(3), M. Fargette(4), F. Martin-Laurent(2), T. Mateille(4), C. Pernin(3), J-F. Ponge(5), N. Ruiz-Camacho(6), C. Villenave(7), L. Rougé(1), V. Mercier(1), A. Bellido(1), M. Cannavacciuolo(8), D. Piron(1), D. Arrouays(9), L. Boulonne(9), C. Jolivet(9), P. Lavelle(7), E. Velasquez(10), O. Plantard(11), C. Walter(12), B. Foucaud-Lemercier(12), S. Tico (13), J-L. Giteau(13) et A. Bispo(14)

1) Université de Rennes 1 - UMR CNRS EcoBio, Station Biologique, 35380 Paimpont, France
2) INRA-Université de Bourgogne, UMR MSE, BP 86510, 21065 Dijon cedex, France
3) INPL-ENSAIA, Laboratoire Sols et Environnement, Nancy-Université, INRA, 2 avenue de la Forêt de Haye, BP 172, 54505 Vandœuvre lès Nancy, France
4) INRA-IRD, UMR 1062 - CBGP (Centre de Biologie et de Gestion des Populations), Campus International de Baillarguet, CS 30 016, 34988 Montferrier sur Lez Cedex, France
5) Muséum National d'Histoire Naturelle, CNRS UMR 7179, 4 avenue du Petit-Château, 91800 Brunoy, France
6) IRD-UMR 137 BioSol, Centre de Bondy/Universités Paris VI/VII/XII, 93143 Bondy Cedex, France
7) UMR 210 ECO&SOLS IRD-INRA-SupAgro, 2 place Viala, 34060 Montpellier Cedex 1, France
8) Groupe ESA, 55, rue Rabelais, BP 30748, 49007 Angers Cedex 01, France
9) INRA, Unité Infosol, US 1106, 2163 avenue de la Pomme de Pin, CS 40001, Ardon, 45075 Orléans Cedex 2, France
10) Universidad Nacional de Colombia, Carrera 30, No 45-03, edificio 500, Bogota, Colombie
11) INRA-AGROCAMPUS OUEST, UMR 1099, Biologie des Organismes et des Populations appliquée à la Protection des Plantes (BiO3P), Domaine de la Motte, BP 35327, 35653 Le Rheu Cedex, France
12) INRA-AGROCAMPUS OUEST, UMR 1069, Sol, Agro et hydrosystème, Spatialisation, 65 rue de Saint Brieuc, CS 84215, 35042 Rennes Cedex, France
13) Chambre d'agriculture de Bretagne - Pôle Agronomie Productions Végétales, Technopole Atalante Champeaux, Rond Point Maurice Le Lannou, CS 74223, 35042 Rennes Cedex, France
14) ADEME, Département Animation de la Recherche Déchets & Sols, 20 avenue du Grésillé, BP 90406, 49004 Angers Cedex 01, France

Reçu : avril 2009 ; Accepté : septembre 2009

RÉSUMÉ

Le compartiment biologique des sols joue un rôle essentiel en délivrant des biens et des services écosystémiques clés, et il est impliqué directement et indirectement dans plusieurs fonctions du sol (cycle des nutriments, structure du sol, rétention de l'eau). La Commission Européenne a souligné l'intérêt de prendre en compte ce compartiment biologique. Elle a notamment demandé de développer des recherches sur ce thème dans les politiques de gestion des sols, en caractérisant la diversité spécifique et les fonctions biologiques de certains organismes du sol. Afin de répondre à de telles demandes et de réaliser un premier état de la biodiversité des sols à l'échelle régionale en relation avec les usages des sols et les paramètres pédoclimatiques, un programme français « RMQS BioDiv » a été mis en place sur les 109 sites du RMQS classique (Réseau de Mesure de la Qualité des Sols) en Bretagne. Un important réseau de collaborations scientifiques et de développement (12 équipes) a ainsi été créé pour étudier un très grand nombre de paramètres biologiques, à savoir la macrofaune (lombriciens, macrofaune totale), la mésofaune (collemboles et acariens), la microfaune (nématodes), et la microflore (biomasse microbienne, structure des communautés bactériennes et gènes fonctionnels), de même que des paramètres d'activité de la faune du sol (Humus Index).

Ainsi, ce programme s'est appuyé sur le Réseau de Mesures de la Qualité des Sols (RMQS) mis en place à l'échelle nationale pour suivre l'évolution de paramètres physico-chimiques et d'usage des sols en utilisant un échantillonnage systématique (grille de 16 X 16 km) couvrant l'ensemble du territoire français. Le lien entre ces deux programmes, travaillant selon la même grille d'échantillonnage, permettra d'étudier les paramètres biologiques au regard des caractéristiques agro-pédoclimatiques, et devrait permettre d'établir des pistes de réflexion pour l'évaluation d'indicateurs biologiques pertinents de la qualité des sols. Les objectifs de cet article sont i) de présenter les protocoles et procédures mis en place dans le cadre du programme RMQS BioDiv pour l'étude des différents paramètres biologiques, ii) de décrire la gestion et le traitement des données, et iii) de présenter les premiers résultats obtenus. Ces résultats résultent de l'analyse de 109 sites bretons échantillonnés en 2006 et 2007, et montrent la distribution spatiale de différents paramètres biologiques.

Mots clés

Biodiversité, organismes du sol, réseau de surveillance, qualité du sol, échelle régionale, Bretagne, programme de recherche.

SUMMARY

INTEGRATION OF SOIL BIODIVERSITY IN SOIL QUALITY MONITORING: example of a pilot-programme at regional scale, RMQS BioDiv

Soil biota play an essential role in delivering key ecosystem goods and services, and are both directly and indirectly responsible for many important functions (nutrient cycling, soil structure, water storage). European Union (EU) has underlined the interest of taking into account this biological compartment. EU has asked to develop biological researches in soil management policies, by characterizing biological species and biological functions of some soil organisms. To answer this request and make a first state at regional scale of soil biodiversity in relation to land use and pedoclimatic parameters, a French program « RMQS BioDiv » was developed on the 109 sites of Soil Quality Monitoring Network (RMQS) in Brittany. A large national research network (12 research teams) supported the program, that undertook the study of several biological parameters such as macrofauna (earthworms, total macro-invertebrates), mesofauna (Acarina and Collembola), microfauna (nematodes), and microflora (microbial biomass, community structure and functional genes), as well as biological activity parameters (Humus Index). So, this program leaned on RMQS which was developed at national scale to monitor physico-chemical soil parameters and land-use managements by using a systematic sampling (regular grid 16 X 16 km) covering the whole French territory. The link between these two programs, working on the same sampling grid, should allow the study of biological parameters in the light of soil and agricultural characteristics, and thus the definition of biological descriptors of soil quality. The objectives of this paper are i) to present the RMQS BioDiv program is terms of sampling design and protocols, ii) to describe the data management and treatment, and iii) to show some results as a first instance of the data analysis to be carried out in this program. Results were obtained from the analysis of 109 sites sampled in 2006 and 2007 across the Brittany Region, and showed the spatial distribution and density of the different biological groups.

Key-words

Biodiversity, soil organisms, soil monitoring, soil quality, regional scale, Brittany, research program.

RESUMEN

INTEGRACION DE LA BIODIVERSIDAD DE LOS SUELOS TIERRAS EN LAS REDES DE VIGILANCIA DE LA CUALIDAD DE LOS SUELOS: ejemplo del programa-piloto al la escalera regional, RMQS BioDiv

Los organismos del suelo juegan un papel fundamental que permite la obtención de un conjunto de bienes y servicios ecosistémicos clave y están implicados tanto de manera directa como indirecta en numerosas funciones realizadas por el suelo (ciclo de nutrientes,

estructura del suelo, retención de agua). Es esencial tener en cuenta este compartimento biológico a través de la caracterización de la diversidad específica y de las funciones biológicas realizadas por los organismos del suelo. Para realizar un primer inventario sobre el estado de la biodiversidad edáfica en relación con los diferentes tipos de utilización del suelo y de parámetros pedoclimáticos, un programa francés « RMQS-biodiv » ha sido desarrollado a nivel regional (Bretaña). Una importante red científica nacional (12 equipos de investigación) ha sido creada con el objetivo de estudiar un gran número de parámetros biológicos tales como la diversidad de la macrofauna (lombrices, macrofauna total), la diversidad de la mesofauna (colémbolos y ácaros), la diversidad de la nematofauna, la de los microorganismos (biomasa microbiana, biomasa bacteriana, diversidad bacteriana y fúngica) así como ciertos parámetros de actividad (índice del humus). Este programa está ligado a una red de envergadura más importante desarrollada a nivel nacional (Red de Seguimiento de la Calidad del Suelo – RMQS) que mide la evolución de los parámetros físico-químicos y de utilización del suelo empleando un muestreo sistemático (malla de 16 km X 16 km) que cubre la totalidad del territorio francés. El enlace entre estos dos programas permitirá estudiar los parámetros biológicos a la luz de las características agro-pedoclimáticas y debería así permitir el establecimiento de indicadores biológicos. Los resultados presentados en este artículo son el resultado del análisis de 109 sitios muestreados en 2006 y 2007 y muestran la distribución espacial de los diferentes grupos biológicos considerados.

Palabras clave

Biodiversidad, organismos del suelo, redes de vigilancia, cualidad de los suelos, nivel regional, Bretagne, programa-piloto.

INTRODUCTION

La biodiversité des sols

Le sol représente un des réservoirs les plus importants de biodiversité ; en effet, la diversité biologique des sols correspond plusieurs fois à celle observée au-dessus de la surface du sol (Heywood, 1995). Par ailleurs, au-delà de cet aspect quantitatif, il est maintenant reconnu que les organismes du sol (microorganismes comprenant microflore et microfaune, mésofaune et macrofaune) jouent des rôles fondamentaux dans le fonctionnement des écosystèmes, rendant de ce fait un grand nombre de services écosystémiques (Lavelle & Spain, 2001) ; ainsi contribuent-ils de manière directe ou indirecte à un grand nombre de processus tels que la dynamique de la matière organique (cycle des éléments nutritifs), le recyclage des déchets, la bioremédiation de composés xénobiotiques, la formation et le maintien de la structure, le transfert hydrique et la rétention de l'eau dans les sols, etc. Si certains de ces processus sont très spécifiques (cycle de l'azote), d'autres tels que la dégradation de la matière organique impliquent l'intervention d'un ensemble d'organismes très divers comprenant des bactéries, des champignons, des protozoaires et des invertébrés.

La nécessité de prendre en compte la biodiversité apparaît aussi de plus en plus évidente aux instances politiques à l'échelle mondiale et européenne. Ainsi, la Stratégie sur la Biodiversité de la Commission Européenne (http://europa.eu/scadplus/leg/fr/lvb/l28183.htm) ainsi que la Stratégie Thématique en faveur de la Protection des Sols (EC 2006a) ont toutes deux souligné la place de la biodiversité des sols comme une composante cruciale de l'intégrité des écosystèmes et de leur devenir. Par ailleurs, le déclin de la biodiversité des sols a été identifié par la Commission Européenne comme faisant partie d'un des risques majeurs pour les sols, de même que l'érosion, la diminution du stock organique ou la compaction, et le « déclin de la biodiversité » a été de ce fait introduit dans le projet de Directive-Cadre sur les Sols (Soil Framework Directive, EC 2006b). Malgré son importance quantitative et qualitative, force est de constater que l'étude de la biodiversité des sols reste souvent négligée et les connaissances sur la répartition de ces organismes du sol et les effets des usages et des pratiques sur cette ressource biologique restent encore très mal documentées. Les paramètres physico-chimiques des sols sont bien connus des scientifiques et des gestionnaires, qui les utilisent pour évaluer la qualité des sols, notamment vis-à-vis de la fonction de production agricole. Ces paramètres sont d'ailleurs largement intégrés à l'échelle européenne dans des réseaux de suivi de la qualité des sols, comme l'a souligné le programme européen ENVASSO (ENVironmental ASsessment of Soil for mOnitoring) (Arrouays 2008a et b ; Morvan 2008).

Compte-tenu de l'importance des organismes du sol et de leurs rôles dans le fonctionnement du sol, il conviendrait de prendre en compte de tels paramètres biologiques dans le suivi de la qualité des sols, et de mieux comprendre leur lien avec les paramètres de milieu (des conditions climatiques aux usages des terres, en passant par les caractéristiques physico-chimique des sols).

Le programme RMQS BioDiv

C'est dans ce contexte qu'un programme-pilote a été mis en place en Bretagne (2005-2009), le RMQS. L'échantillonnage est basé sur les sites du réseau national de mesures de la qualité

des sols (RMQS) sur lequel des paramètres pédologiques et physico-chimiques sont mesurés périodiquement afin d'évaluer la qualité des sols et d'estimer leur évolution (Jolivet, 2006). L'objectif global du programme RMQS est d'étudier un grand nombre d'organismes du sol afin d'établir un premier référentiel de la biodiversité des sols à l'échelle régionale, et de relier ces données biologiques aux données agro-physico-chimiques dans le but d'appréhender leur rôle de bioindicateur.

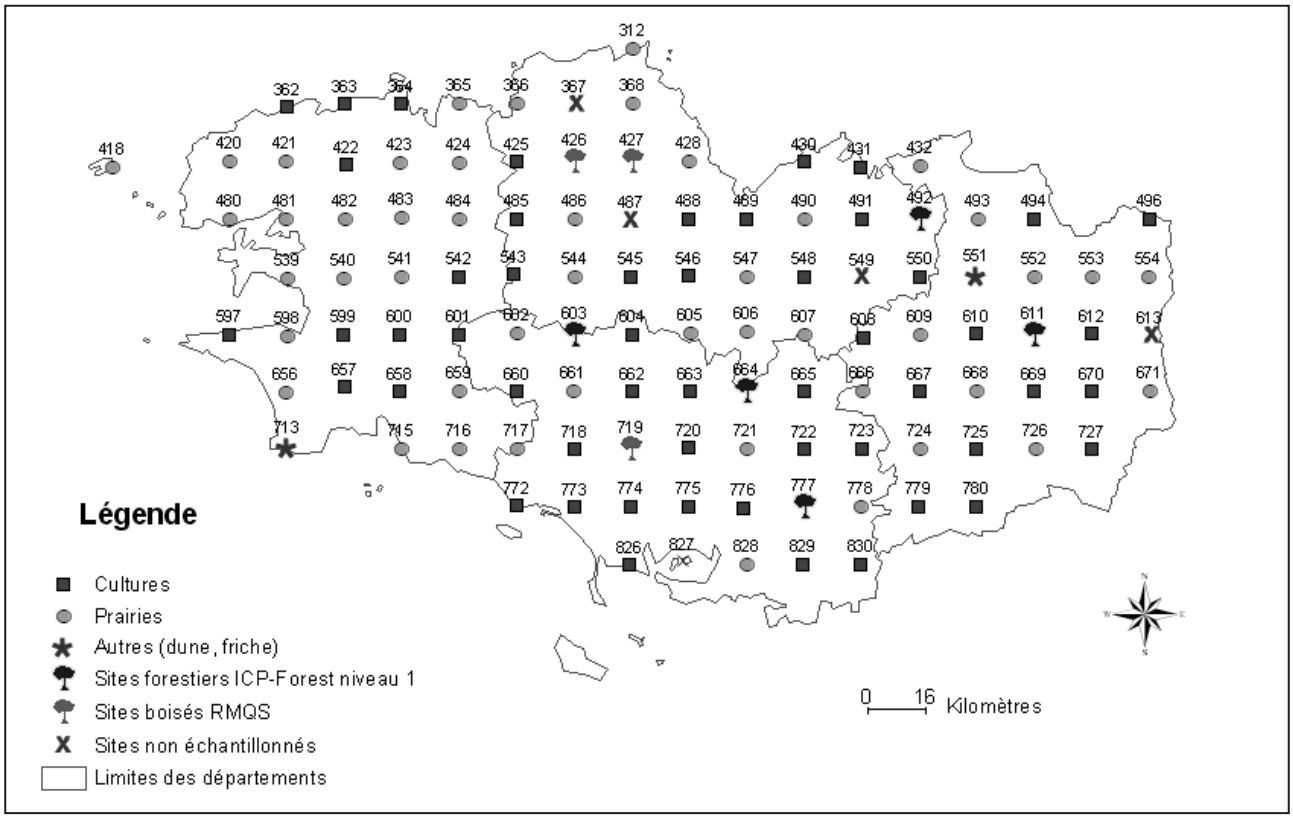
Le Haut Comité de Groupement du GIS Sol a accueilli très favorablement cette proposition de programme lors de sa présentation en juin 2005, d'une part car il constituait une expérience unique en France de mesures spatialisées de la diversité biologique des sols, et d'autre part car ses conclusions devaient permettre d'orienter le choix des paramètres biologiques à mesurer ultérieurement sur le réseau national. Par ailleurs, dans le contexte européen, ce programme-pilote présente la particularité de couvrir la plupart des organismes du sol, allant de la microflore (organismes de taille inférieure à 0,2 mm : bactéries et champignons) jusqu'à la macrofaune (organisme de taille supérieure à 4 mm) en passant par la microfaune et la mésofaune, alors que la plupart des réseaux européens de suivi de la biodiversité des sols (Ecosse, Hongrie, Irlande) se limitent à quelques organismes (Bispo, 2007).

Le programme RMQS est coordonné par l'Université de Rennes 1 (UMR ECOBIO, IFR CAREN) et co-financé par l'ADEME et les organismes de recherche impliqués. Compte-tenu du nombre important de groupes biologiques étudiés, il a nécessité l'implication d'un grand nombre de partenaires scientifiques (Université, INRA, CNRS, IRD, INPL) répartis sur l'ensemble du territoire français (Rennes, Paris, Dijon, Montpellier, Nancy) et de partenaires techniques (Chambres d'Agriculture de Bretagne). Cette collaboration a permis de réaliser l'inventaire de la biodiversité des sols bretons, en couvrant la majorité des organismes du sol, à savoir :

- La microflore (INRA Dijon, UMR MSE) ;
- La microfaune : nématodes libres dans le sol (phytophages et non phytophages) (IRD Montpellier, UR Seq-Bio) et nématodes phytoparasites (IRD Montpellier, UMR CBGP) ;
- La mésofaune : collemboles et acariens (INPL-ENSAIA Nancy, UMR INRA Sols et Environnement) ;
- La macrofaune : lombriciens (Université de Rennes1, UMR CNRS EcoBio) et macro-invertébrés totaux (IRD Bondy, UMR BioSol)

Par ailleurs, un indice synthétique d'activités liées à l'agrégation biologique a aussi été mesuré : Humus Index (MNHN Paris, UMR CNRS Brunoy).

Figure 1 - Carte de répartition des sites RMQS BioDiv.
Figure 1 - *Location of RMQS Biodiv sites.*



Le RMQS vise donc à établir un premier référentiel de la composante biologique des sols et de son activité grâce à la caractérisation des principaux taxons constituant la biodiversité des sols. Plus précisément, ses objectifs sont : i) de recenser les espèces (ou autre niveau taxonomique) sous forme d'inventaire en échantillonnant une gamme très large d'organismes couvrant la majorité des organismes du sol, ii) d'évaluer des paramètres définissant l'état de la biodiversité structurelle et fonctionnelle, iii) d'étudier les relations possibles entre les paramètres définissant la qualité d'un sol et sa composante biologique afin de participer à la définition d'indicateurs biologiques, iv) de pallier le manque de procédures et protocoles validés pour des outils de mesure de caractéristiques biologiques des sols.

Les objectifs de cet article sont i) de présenter les protocoles et procédures mis en place dans le cadre du programme RMQS pour l'étude des différents paramètres biologiques, ii) de décrire la gestion et le traitement des données, et iii) de présenter les premiers résultats obtenus.

PROTOCOLES ET PROCEDURES

Le dispositif d'échantillonnage du RMQS étant liéà celui du RMQS classique, nous proposons tout d'abord de présenter succinctement ce dernier avant de détailler le RMQS lui-même. Le lecteur est invité à se référer au manuel du RMQS de Jolivet (2006a et b) pour plus d'informations sur le RMQS.

Dispositif d'échantillonnage RMQS

Le Réseau de Mesures de la Qualité des Sols (RMQS) repose sur un suivi décennal d'environ 2 200 sites de prélèvement répartis uniformément sur le territoire français, selon une grille systématique de maille carrée de 16 km de côté. Ce programme est coordonné par l'Unité InfoSol de l'INRA d'Orléans.

Au centre de chaque maille de 16 km, un dispositif de prélèvement de sols est mis en place Ce dispositif comprend i) une fosse pédologique permettant la description du sol et la collecte d'échantillons de chaque horizon pour la mesure de différents paramètres (densité apparente, humidité du sol…), et ii) une surface d'échantillonnage de 400 m destinée à collecter des échantillons composites à différentes profondeurs pour l'évaluation et le suivi à long terme des paramètres du sol. Les analyses physico-chimiques (granulométrie, C, N, pH, $CaCO_3$, P, CEC et cations échangeables, éléments majeurs, éléments traces métalliques) sont complétées sur site par de nombreux autres descripteurs : géopositionnement GPS du dispositif, description de l'environnement du site, description de la végétation sur les parcelles non cultivées, enquête sur l'historique et les modalités de gestion de la parcelle. L'ensemble des données décrivant les sites sont codées et stockées dans la base de données nationale DONESOL (Jolivet, 2006a, b ; INRA, Unité INFOSOL, dictionnaire de données DONESOL, 2008).

Dispositif d'échantillonnage RMQS BioDiv

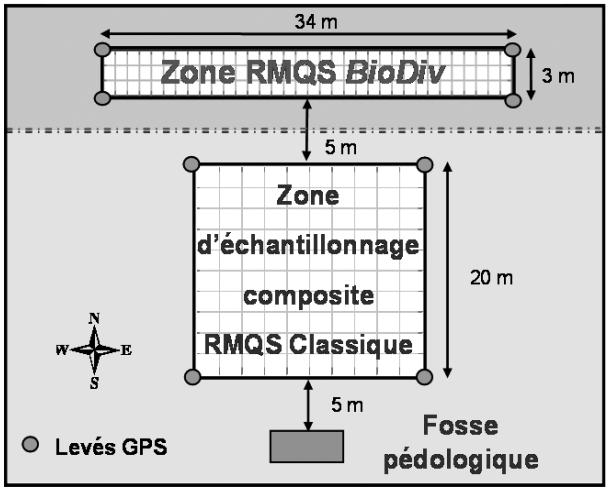
Les prélèvements biologiques ont été organisés suivant le maillage systématique appliqué au RMQS classique. Cent neuf sites (dont 8 sites forestiers, 52 sites en culture et 47 prairies) ont ainsi été échantillonnés lors de deux campagnes en 2006 (34 sites) et 2007 (75 sites) en suivant des protocoles de routine ou en développement (1).

Tous les prélèvements, exception faite de ceux concernant les macro-invertébrés totaux, ont été réalisés par une même équipe de préleveurs formés aux techniques de prélèvements, ceci afin de limiter le biais dans la qualité de ces différents prélèvements. Les campagnes ont été réalisées entre le 15 février et le 25 avril, période la plus propice dans cette région de France à l'inventaire de la faune et de la microflore du sol (conditions optimales de température, de réhumectation du sol, pause culturale) (Cluzeau 1999).

Afin de pouvoir relier les données biologiques issues du programme RMQS aux données issues du programme RMQS (analyses physico-chimiques du sol, description pédologique, occupation du sol et mode de gestion), la zone d'échantillonnage est localisée au plus près de la zone du RMQS classique, à savoir 5 m au Nord. Cette distance de 5 m a été retenue afin d'éviter au maximum d'interagir avec la zone de prélèvements composites du RMQS classique tout en restant dans des conditions agro-topo-pédologiques similaires. La localisation au Nord de la zone RMQS a été fixée de manière arbitraire, afin de pouvoir intervenir aux 3 autres points cardinaux (Est, Sud, Ouest) lors de nouvelles campagnes d'échantillonnage dans le cadre de suivi de la biodiversité ; cependant, des caractéristiques locales (limite de par-

Figure 2 - Localisation de la zone d'échantillonnage RMQS BioDiv par rapport à la zone d'échantillonnage RMQS classique.

Figure 2 - *Location of the RMQS BioDiv and RMQS sampling areas.*



celle, zone hydromorphe…) peuvent conduire à modifier cette orientation Nord.

La zone d'échantillonnage est une bande de 34 m sur 3 m (102 m), homogène d'un point de vue du couvert végétal et d'un point de vue pédologique. Cette zone est subdivisée en unités élémentaires de 1 m . Les secteurs de prélèvement sont définis pour chaque groupe et clairement matérialisés par des piquets de couleur, afin d'éviter les perturbations et interactions entre les groupes biologiques lors de des prélèvements.

Protocoles d'échantillonnage

Les analyses de la microflore et de la nématofaune sont effectuées sur des échantillons de terre composites réalisés à partir de 32 carottages élémentaires de sol (carottier de 7 cm de diamètre, hauteur 15 cm) effectués sur l'ensemble de la zone. La terre prélevée est tamisée (6 mm) puis homogénéisée pour former l'échantillon composite sur lequel les analyses seront effectuées.

Microorganismess (microflore)

Trois kilogrammes de l'échantillon composite de terre sont utilisés pour les analyses en laboratoire. Divers paramètres microbiologiques sont étudiés dans le cadre du programme RMQS :
- la biomasse microbienne (MOV et MOV%Ct) est déterminée par fumigation-extraction (Chaussod 1988),
- la proportion d'ADN bactérien est mesurée par le nombre de copies du gène ADNr 16S dans l'ADN microbien extrait directement à partir des échantillons de sol (Martin-Laurent 2001),
- les communautés bactériennes fonctionnelles impliquées dans la dénitrification et la dégradation de composés phénoliques sont estimées d'après le nombre de copies des gènes respectivement narG et pcaH dans l'ADN microbien extrait du sol
- la structure génétique des communautés bactériennes est réalisée par « fingerprint » B-ARISA (Bacterial-Automated Ribosomal Intergenic Spacer Analysis) (Ranjard 2001).

Microfaune (Nématodes)

Deux extractions sur 300 g de sol sont réalisées par élutriation puis la suspension obtenue est soumise à un passage actif de 48 heures au travers d'un tamis. Cette méthode est basée sur un procédé de flottation permettant la séparation des particules de sol en fonction de leur densité : un courant d'eau ascendant (au débit calibré) permet de séparer les nématodes des particules grossières de sol et de les récupérer en suspension avec les particules de sol légères (argiles, limons, particules organiques) alors que les grosses particules sédimentent (norme ISO 23611-4). Les nématodes vivants sont alors séparés, par passage actif des particules fines mais inertes de cette suspension.

Les nématodes sont ensuite dénombrés sous loupe binoculaire puis fixés dans une solution formolée. Environ 300 nématodes par échantillon sont ensuite montés dans une lame d'ensemble et identifiés sur critères morphologiques en microscopie optique.

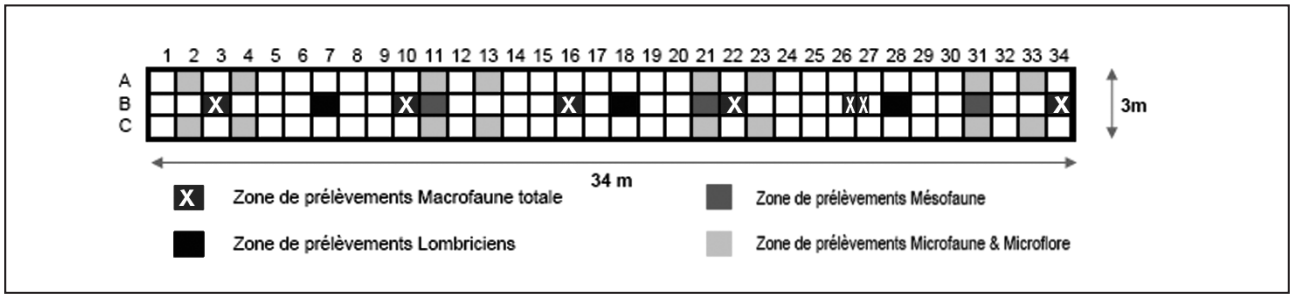
La caractérisation des communautés de nématodes s'effectue à différents niveaux :
- global : densité totale de nématodes (nb ind/g sol sec),
- fonctionnel : densité des différents groupes trophiques (bactérivores, fongivores, phytophages facultatifs, phytoparasites, omnivores, prédateurs), indices nématologiques,
- taxonomique : densité des taxons (niveau famille et genre),
- diversité : richesse taxonomique, diversité, équitabilité.

Mésofaune (collemboles, acariens)

Les échantillons de terre, utilisés pour l'analyse de la mésofaune, sont réalisés à l'aide d'un carottier spécialement conçu, qui conditionne directement l'échantillon de terre dans des cylindres en plexiglas de 6 cm de diamètre. Dans la mesure du possible, 3 profondeurs : 0-5, 5-10 et 10-15 cm ont été prospectées (norme ISO 23611-2 : 2006). Pour chaque site, 3 répétitions sont effectuées

Au laboratoire, l'extraction de la mésofaune est effectuée par un extracteur à haut gradient de température de type « MacFadyen » : la température augmente de 35 °C à 60 °C pendant 8 jours. Les individus collectés dans l'acide benzoïque (2,8 g/L) sont dénombrés sous une loupe binoculaire et l'identification des espèces de collemboles est réalisée sous microscope, suivant des caractères morphologiques. Les collemboles sont déterminés au niveau spécifique alors que les acariens sont déterminés au niveau des sous-ordres : Oribates, Actinedida, Acaridida et Gamasida.

Figure 3 - Positionnement des prélèvements des différents groupes biologiques au sein de la zone RMQS BioDiv.
*Figure **3** - Location of samples of the different biological groups within RMQS BioDiv area.*



La caractérisation des peuplements de mésofaune s'effectue à différents niveaux :
- global : abondance totale de la mésofaune, des collemboles, des acariens totaux et des différents sous-ordres d'acariens (nb ind/m),
- fonctionnel : abondance des types biologiques de collemboles,
- taxonomique : richesse taxonomique des collemboles, diversité spécifique et équitabilité.

Lombriciens

Les lombriciens sont prélevés, à raison de 3 répétitions par site, selon la méthode Bouché (1972) adaptée au contexte agro-pédoclimatique (Cluzeau 1999 et 2003) : trois arrosages de solution formolée (3 x 10 L, concentrations 0,25 %, 0,25 %, 0,4 %) sont appliqués à 15 minutes d'intervalle sur un cadrat élémentaire de 1 m . Ces applications formolées permettent de prélever des lombriciens qui, adoptant un comportement de fuite en réponse aux propriétés urticantes du formol, remontent à la surface du sol. Ce prélèvement chimique est complété par le tri manuel d'un bloc de sol d'1/16 m (0,25 x 0,25 x 0,25 cm de profondeur) extrait après le prélèvement au formol. Les lombriciens prélevés sont conservés dans une solution formolée à 4 %.

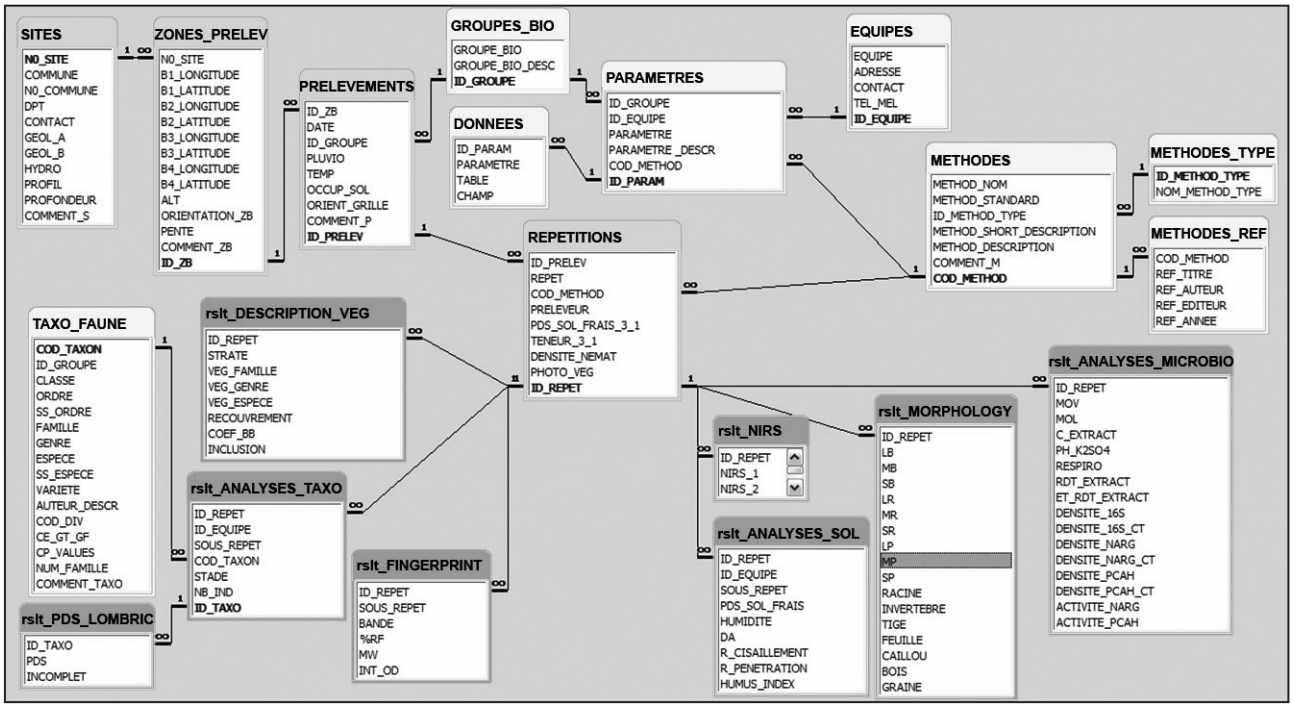
Au laboratoire, les lombriciens sont déterminés au niveau infra-spécifique, suivant une clé de détermination mise au point par Cluzeau (non publiée), basée sur les travaux de Bouché (1972) ; leur stade de développement (juvénile, sub-adulte et adulte) est précisé suivant le stade d'évolution des organes sexuels (pores mâles, puberculum, clitellum) et les individus sont pesés (précision de la pesée : +/- 10 mg).

La caractérisation des peuplements lombriciens s'effectue à différents niveaux :
- global : abondance (nb ind/m) et biomasse (g/m) lombricienne,
- fonctionnel : abondance et biomasse des catégories écologiques,
- taxonomique : abondance des taxons (espèces et sous-espèces), richesse taxonomique, diversité.

Macrofaune totale du sol

L'extraction de la macrofaune totale du sol est réalisée, à raison de 6 répétitions par site, en utilisant la méthode TSBF (Tropical Soil Biology and Fertility) modifiée pour être adaptée aux milieux tempérés (Lavelle, 1988 ; Anderson et Ingram, 1993) et qui est en cours de standardisation (prochaine ISO 23611-5). Cette méthode combine l'extraction au formol et un tri manuel du sol : sur une surface unitaire de 25 x 25 cm d'arête (1/16 m), deux applications d'une solution formolée (0,2 %) sont réalisées à dix minutes d'intervalle, un bloc de sol est ensuite prélevé sur une profondeur de 15 cm et trié manuellement. Les macro-invertébrés ainsi prélevés sont conservés dans du formol concentré à 4 %. L'intégration des données physico-chimiques classiques (RMQS) aux données de la macrofaune totale permet de définir un Indice Biologique de la Qualité des Sols (IBQS) (Ruiz, 2004).

Figure 4 - Représentation simplifiée du Modèle Logique de Données de DonEcoSol.
Figure 4 - *Conceptual framework of DonEcoSol databasis.*



Des mesures physiques sont également réalisées afin d'établir un Indice Général de Qualité des Sols (IGQS) (Velasquez 2007) : teneur en eau, densité apparente, résistance à la pénétration, résistance résiduelle au cisaillement, morphologie du sol et matière organique estimée par des mesure de spectrométrie dans le proche infra-rouge (NIRS).

Humus Index

La mesure de l'agrégation du sol est réalisée en utilisant une méthode adaptée de l'Humus Index développé par Ponge. (2002) en milieu forestier, simplifié pour s'adapter aux sols sans couche de litière. Cette mesure, réalisée sur la couche superficielle du sol, fournit une information relative à la complexité des réseaux trophiques du sol. Il s'agit d'un indice semi-quantitatif, variant de 1 à 3, traduisant l'appauvrissement des réseaux trophiques du sol : les réseaux les plus complets sont ceux renfermant une activité notable de vers de terre (Humus Index 1), l'activité des enchytréides ne se perçoit que lorsque celle des lombricidés est absente ou réduite (Humus Index 2), et les réseaux trophiques les plus pauvres n'ont ni vers de terre, ni enchytréides ce qui se traduit par l'absence visible de structure d'origine biologique (Humus Index 3). C'est donc un indicateur très simplifié de la biodiversité fonctionnelle et qui peut être relié à la biodiversité taxonomique.

Les mesures d'Humus Index sont réalisées à partir des échantillons de sol utilisés pour la mésofaune. Chaque indice est la moyenne de trois valeurs, correspondant aux trois profondeurs de sol prélevées pour la mésofaune dans chacun des sites.

La mesure d'Humus Index est caractérisée par deux indices :
- l'Humus Index Moyen sur l'ensemble des profondeurs (0-5, 5-10 et 10-15 cm)
- l'Humus Index de Surface uniquement sur l'horizon 0-5 cm.

Stockage des échantillons

La mesure de paramètres très sensibles aux conditions de température, tels que la microflore, les nématodes et la mésofaune contraignent de maintenir une chaîne de froid depuis les prélèvements sur le terrain jusqu'aux différents laboratoires, assurant ainsi l'intégrité des échantillons (Norme ISO/DIS 10381-6) : dès leur collecte sur le terrain, les échantillons sont conservés à 4 °C, ils sont véhiculés dans un camion frigorifique, puis stockés dans une salle thermorégulée à 4 °C avant d'être expédiés de manière hebdomadaire par transporteur frigorifique aux différents laboratoires.

Gestion des données : La base de données DonEcoSol

Le nombre important d'échantillons récoltés et de paramètres étudiés au cours du programme RMQS, ainsi que le besoin d'harmonisation et de structuration de toutes ces données (80 000), ont conduit à la nécessité de se doter d'un outil de gestion et d'aide au traitement de l'information récoltée (Cannavacciuollo 2008). La structure de cet outil devait également permettre l'inter-connectivité avec les bases existantes (taxonomiques, pédologiques…), et en premier lieu, avec la base de données nationale DONESOL (gérée par l'INRA InfoSol d'Orléans), qui stocke les informations issues du programme RMQS « classique », afin de pouvoir analyser les corrélations entre la composante biologique et les caractéristiques agro-mésologiques des sols (InfoSol, dictionnaire de données DONESOL 2.0) (Grolleau 2004). C'est ainsi qu'en 2008 a été conçu un modèle de données, développé selon la méthode Merise et résultant de nombreux échanges entre les différentes équipes impliquées dans le programme Ce modèle a donné lieu au développement physique d'une base de données relationnelle, appelée DonEcoSol. Sa pertinence à répondre aux objectifs de traitement a été éprouvée avec un jeu de données-test, ce qui a permis d'aboutir en décembre 2008 à la version finale de DonEcoSol.

Son but est de saisir, de stocker et de structurer, de façon pertinente et sans redondance, l'ensemble des données et métadonnées récoltées au cours du programme RMQS, de manière à récupérer et à manipuler facilement ces données lors de requêtes. Cette démarche va permettre d'inventorier les espèces des 7 groupes d'organismes du sol étudiés et va constituer le support des analyses relationnelles des différents taxons entre eux et avec les paramètres issus du RMQS classique, dans le but de définir un système de bioindication.

Traitement des données

Le traitement des données biologiques se fait en 3 étapes successives.

La première étape (étape 1) consiste à étudier chaque groupe biologique de manière indépendante (analyse intra-groupe biologique). Cette approche permet de décrire les peuplements d'organismes du sol à travers i) des paramètres globaux (abondance, biomasse, activité microbienne), ii) des groupes fonctionnels (structure fonctionnelle des différents groupes biologiques), iii) des espèces ou taxons (structure taxonomique, richesse spécifique, indice de diversité, équitabilité). Elle aboutit notamment au recensement des espèces (ou autre niveau taxonomique) sous forme d'inventaire, rendant ainsi compte de la richesse spécifique (ou taxonomique) des sites étudiés et de la variabilité de cette richesse à l'échelle régionale. Par ailleurs, chaque paramètre est étudié au moyen de illustrées par des telles que des boîtes à moustaches et des

histogrammes. La représentation cartographique, présentée dans le cadre de cet article, permet également une visualisation de la distribution spatiale régionale des valeurs de chaque paramètre et est complétée par des tests rendant compte de la structuration spatiale des paramètres. Enfin, des (Analyse en Composantes Principales : ACP) sont réalisées afin d'étudier les structures taxonomiques.

La seconde étape des traitements de données (étape 2) consiste à étudier les relations existant entre les différents groupes biologiques (analyse inter-groupes biologiques). Elle met ainsi en œuvre des tests de corrélation (Spearman), des analyses multivariées (ACP, nonmetric MutiDimensional Scaling - nMDS), des analyses de regroupement « Cluster », des analyses de co-inertie ou encore des tests d'association d'espèces (Kendall).

La troisième étape (étape 3) consiste quant à elle à mettre en relation les données biologiques avec les variables explicatives (données pédologiques, usages des sols) issues principalement de la base de données DONESOL. Cette étape est réalisée des analyses bi-variées (tests de Kruskall-Wallis par exemple), ou encore des analyses multivariées (ACP, Analyse Factorielle de Correspondance : AFC, et Analyse en Composantes Multiples : ACM) et des analyses multitableaux (analyses sous contraintes : ACPVI, AFCVI ; analyses de co-inertie simple et multiple), voire par des approches spatiales (application d'outils de géostatistique). Cette dernière étape sera majeure dans l'identification d'indicateurs biologiques.

RÉSULTATS

L'originalité du programme RMQS réside dans le fait d'étudier la majorité des organismes du sol en un même point et un même espace-temps, mais aussi de couvrir l'ensemble d'un territoire régional (27 200 km) en appliquant un maillage systématique : cette approche permet ainsi d'obtenir la distribution à grande échelle d'un nombre important de paramètres biologiques. Dans le cadre de cet article, nous avons focalisé notre choix sur la représentation d'un certain nombre de paramètres rendant compte de la structure spatiale régionale de l'abondance des groupes biologiques étudiés.

Microorganismes

La biomasse microbienne, représentant la fraction vivante de la matière organique, varie très largement (de 130 à plus de 1900 mg C par kg de sol) selon les sites. La représentation sous forme de carte ne met pas en évidence de structure spatiale au niveau de la région étudiée. Cela n'est pas surprenant dans la mesure où les principaux facteurs déterminant le niveau de la biomasse microbienne sont le type de sol et le mode d'usage des sols. A cet égard, les résultats (non présentés ici) permettent de bien discriminer les situations : aussi bien en valeurs absolues qu'en valeurs relatives (en % du C organique total), les niveaux de biomasse microbienne sont globalement plus faibles dans les sols portant des cultures annuelles que sous prairie, alors que les valeurs les plus élevées sont observées sous forêt. Les méthodes basées sur l'ADN extrait du sol et notamment l'abondance relative des gènes fonctionnels et, montrent des variations considérables selon les sites et intègrent manifestement des sources de variation non prises en compte dans notre étude.

Nématodes libres

Les nématodes libres (phytophages et non phytophages) sont très bien représentés dans l'ensemble des sites échantillonnés (5c). Les densités s'échelonnent de 2 ind. g^{-1} sol sec à 58 ind. g^{-1} sols sec. La densité moyenne est de 17 ± 11 ind. g^{-1} sols sec. Quatre-vingt huit taxons (en général identifiés au niveau du genre) ont été répertoriés. Ces taxons ont été regroupés en 48 familles, puis en 17 guildes fonctionnelles (qui croisent des caractéristiques démographiques et des comportements alimentaires) et enfin en 7 groupes trophiques. Les nématodes du sol les plus abondants sont les nématodes bactérivores et phytoparasites (en moyenne respectivement 34 % et 36 %), les nématodes phytophages facultatifs sont également abondants (17 %). Les nématodes fongivores représentent en moyenne 6 % des nématodes du sol sur l'ensemble des sites alors que les nématodes omnivores et carnivores sont encore moins représentés avec seulement respectivement 4 % et 3 % de l'abondance totale ; quelques nématodes entomopathogènes ont également été observés. Les nématodes, caractérisés par leur abondance totale ne présentent pas de structuration spatiale à l'échelle régionale. L'analyse de la nématofaune permet une discrimination très nette des occupations du sol majeures (culture - forêt – prairies). Les indices nématologiques (MI, PPI, BaMI, SI et EI… ; Villenave et al., 2009) présentent des différences significatives pour les modes d'usage des sols ainsi que pour certaines variables explicatives liées aux pratiques agricoles (telles que la fertilisation, au travail du sol par exemple).

Nématodes phytoparasites

En termes de diversité des nématodes phytoparasites, la Région Bretagne échantillonnée a permis l'identification de 39 taxons de nématodes phytoparasites, qui appartiennent à trois ordres (Tylenchida, Dorylaimida et Aphelenchida) et qui représentent deux groupes trophiques majeurs : des phytoparasites stricts (inféodés aux plantes) et des phytoparasites généralistes (+ fongivores + bactérivores). Globalement, les nématodes stricts ont des effectifs supérieurs (64 % de l'abondance totale). Les niveaux des populations des taxons rares (ceux dont la fréquence est <30%) sont faibles et la plupart des taxons fréquents ont des niveaux de populations élevés. A l'échelle de la Bretagne, la relation fréquence/abondance suit une loi de régression log-linéaire caractéristique des systèmes contraints qui indique que

Figure 5 - Cartes des paramètres biologiques sur les sites RMQS BioDiv : a) Biomasse microbienne (mg C. kg^{-1} de sol) ; b) Proportion d'ADN bacterienne (nb de copies d'ADNr 16S/ng d'ADN) ; c) Densité de nématodes (ind. g^{-1} sol sec) ; d) Densité de nématodes phytoparasites (ind. g^{-1} sol sec) ;

Figure 5 - *Map of biological parameters on RMQS BioDiv sites : a) Microbial biomass (mg C.kg^{-1} soil ; b) Proportion of bacterial DNA (copy nb of ADNr 16S/ng d'ADN) ; c) Nematodes density (ind. g^{-1} dried soil) ; d) Phytoparasitic nematodes (ind. g^{-1} dried soil)*

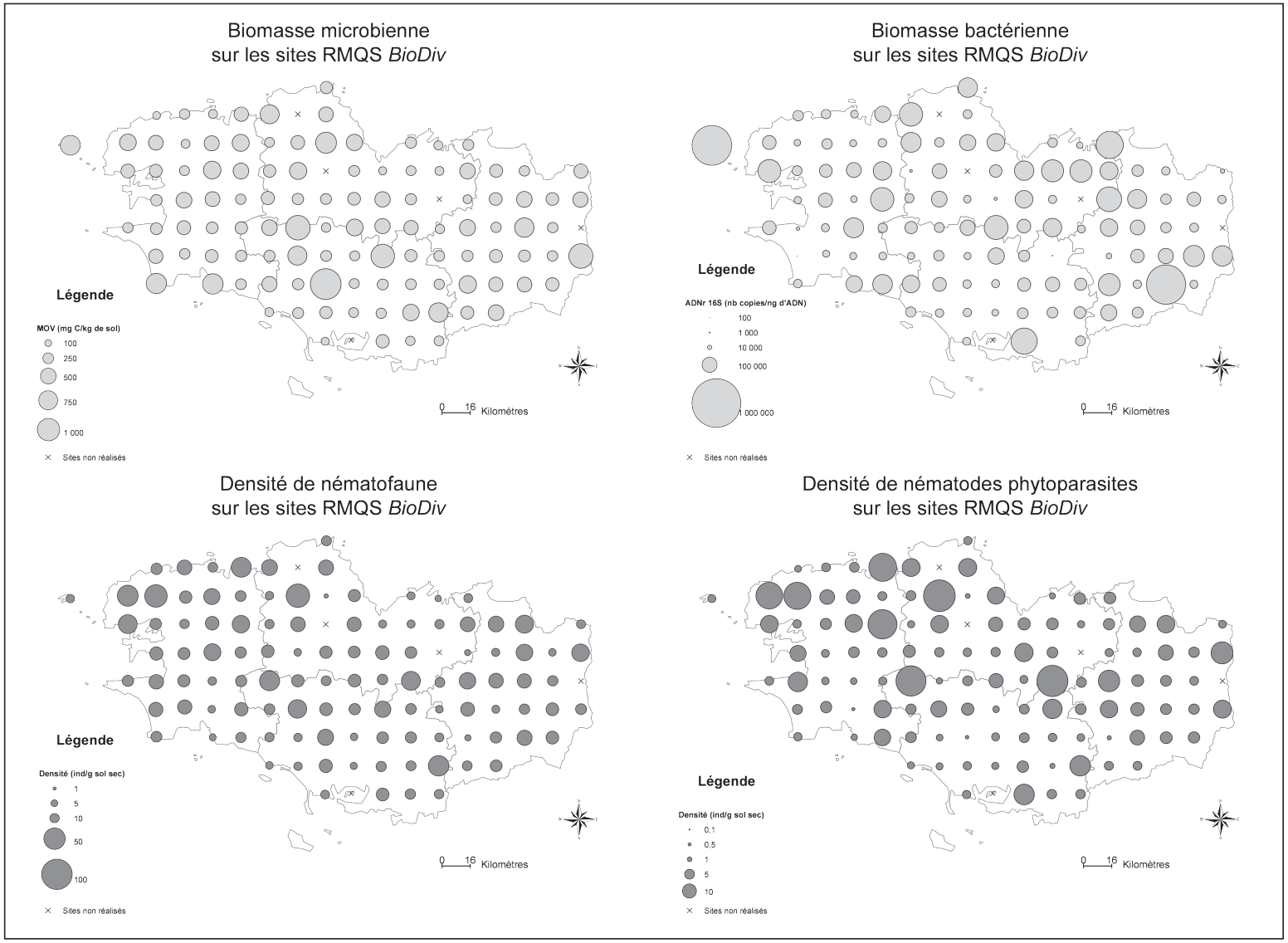


Figure 6 - Cartes des paramètres biologiques sur les sites RMQS BioDiv :
a) Abondance de collemboles (ind. m-2) ; b) Abondance d'acariens (ind. M-2) ; c) Abondance lombricienne (ind. M-2) ; d) Abondance de la macrofaune totale (ind. m)
Figure 6 - *Map of biological parameters on RMQS BioDiv sites*
a) Collembola abundance (ind. m-2) ; b) Acarina abundance (ind. m-2) ; c) Earthworm abundance (ind. m-2) ; d) Total macrofauna abundance



la grande fréquence de taxons dominants s'oppose à la rareté des autres, et, qu'ainsi, des taxons s'approprient la majorité des ressources disponibles de sorte qu'il s'établit une hiérarchie de compétition. Les abondances totales en nématodes phytoparasites (toute diversité confondue) sont très hétérogènes et il n'existe aucune structuration spatiale de cette variable globale à l'échelle de la région. Les densités totales sont cependant corrélées à d'autres paramètres, en particulier l'usage des terres. Les densités distinguent en effet les systèmes cultivés et les forêts d'une part (densités faibles), des systèmes prairiaux d'autre part (densités élevées) En outre, l'introduction d'une prairie dans un système cultivé augmente la densité totale, alors qu'au contraire l'introduction d'une culture dans un système prairial la diminue.

En termes de structure des communautés de nématodes phytoparasites, aucune co-structure entre les patrons des communautés de nématodes phytoparasites et la structure physico-chimique des sols n'a été mise en évidence. En revanche, l'occupation du sol structure fondamentalement les communautés de nématodes. Par contre, l'introduction d'une culture dans un système prairial et inversement d'une prairie dans un système de culture ne modifie pas significativement les communautés qui semblent « fixées » par les systèmes de base.

Mésofaune

Les sites RMQS présentent une abondance moyenne en collemboles très hétérogène, qui varie de 118 ind/m à 45042 ind/m . La qui illustre la répartition spatiale des abondances de collemboles (ind. m^{-2}) montre que ces derniers apparaissent plus abondants sur les sites côtiers. Au total 67 espèces ont pu être identifiées. L'abondance moyenne en acariens retrouvés sur les sites RMQS varie de 707 à 39500 ind/m , et présente donc une hétérogénéité élevée (coefficient de variation de 0,88). La, qui représente la distribution spatiale des acariens, permet de visualiser le caractère particulier du site dunaire (n° 713) situé sur la pointe sud-ouest de la Bretagne et particulièrement riche en acariens. Cependant, aucune structuration spatiale significative des paramètres globaux d'abondances des communautés mésofauniques n'apparaît à l'échelle régionale de la Bretagne pour la maille considérée. En effet, l'abondance de la mésofaune du sol semble déterminée par les types d'occupations des sols (culture, prairie ou forêt) qui ne présentent aucune structuration spatiale.

Lombriciens

Les sols des sites RMQS Bretagne présentent, en moyenne, des abondances lombriciennes de 260 ind. m^{-2}. Les valeurs sont très hétérogènes et s'étendent de 3 à 1332 ind. m^{-2} Ce paramètre ne présente pas de structuration spatiale à l'échelle régionale. L'abondance lombricienne discrimine significativement les trois systèmes d'occupation du sol avec des valeurs moyennes plus importantes sous prairie (350 ind. m^{-2}), intermédiaires sous culture (215 ind. m^{-2}) et faibles sous forêt (50 ind. m^{-2}). Les valeurs obtenues dans le cadre du programme RMQS sont en accord avec la littérature dans le contexte agricole breton (Binet, 1993; Pérès, 2003). L'analyse de la structure fonctionnelle par catégorie écologique montre que les endogés dominent les peuplements (67 %), les anéciques représentent 18 % et les épigés 11 %. L'échantillonnage RMQS a permis l'identification de 29 taxons lombriciens identifiés au niveau infra-spécifique (correspondant à 23 espèces). Trois espèces jusqu'alors non recensées sur le territoire breton ont été identifiées: et 8 taxons sont présents en moyenne sur les sites RMQS Dans le cadre de ce programme, l'influence des variables liées aux pratiques agricoles et pédologiques n'a pas pu être mise en évidence sur l'abondance lombricienne. En revanche, la richesse taxonomique, l'indice de diversité ou l'abondance des catégories écologiques sont significativement liées aux variables explicatives (notamment fertilisation et présence de traitements phytosanitaires).

Macrofaune totale

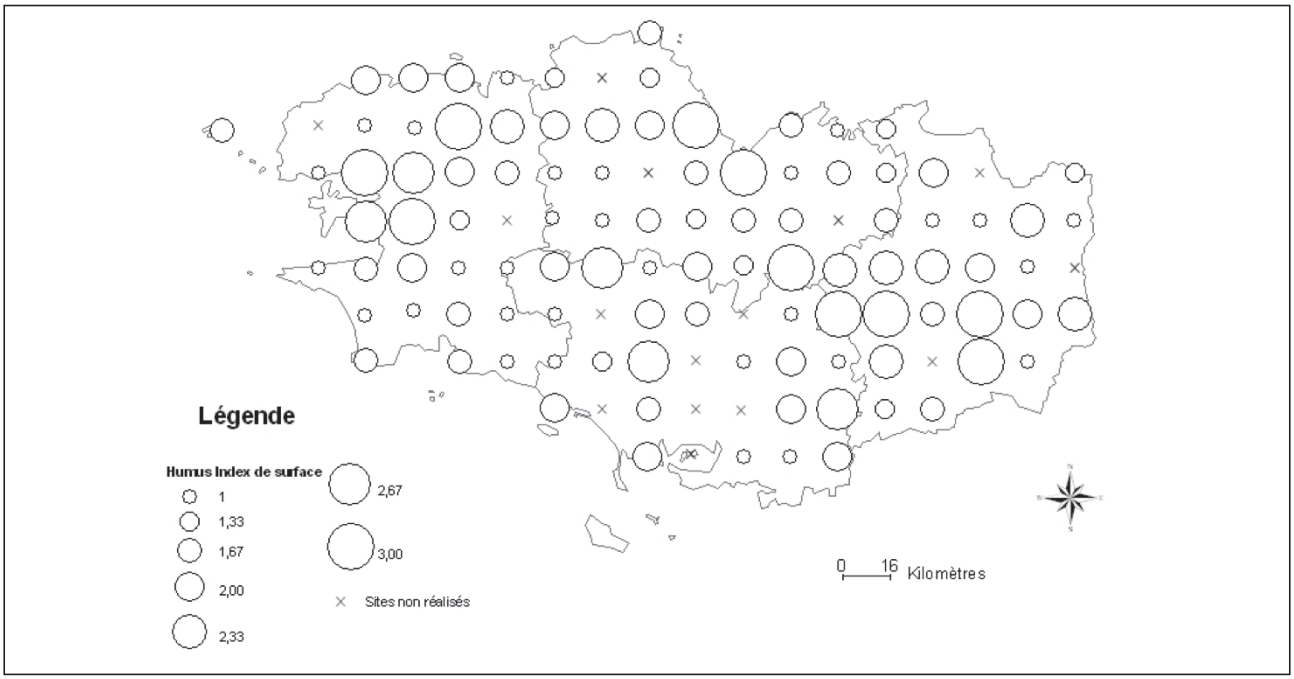
La macrofaune du sol présente une abondance moyenne de 583 ind. m^{-} si l'on considère l'ensemble des sites du RMQS La densité minimale (64 ind. m^{-}) a été trouvée dans un sol cultivé alors que la plus forte valeur correspond à un milieu naturel représenté par un système dunaire (3061 ind. m^{-}). Aucune structuration à l'échelle régionale n'est observée pour cette variable. Les trois utilisations du sol considérées (Prairies, Cultures, Forêts) montrent des valeurs d'abondances plus fortes pour les prairies (678 ind. m^{-}) qui sont suivies des forêts possédant une densité moyenne de 544 ind. m^{-} . Les sols cultivés (465 ind. m^{-}) présentent une forte hétérogénéité en fonction des systèmes de culture considérés, avec des valeurs de densité qui peuvent osciller entre 64 et 1555 ind. m^{-} . Malgré les différences observées entre les trois types principaux d'utilisation du sol, l'hétérogénéité des valeurs suggère l'influence d'autres facteurs davantage liés aux pratiques de gestion qu'à l'occupation du sol.

Humus index

Seules les données relatives à l'Humus Index de Surface (HIS) sont présentées ici *(figure 7).* Une répartition spatiale par « taches » est observée pour l'Humus Index de Surface à l'échelle de la Bretagne et ce contrairement à l'Humus Index Moyen.

Un test de Joint-Count est réalisé, permettant de tester l'autocorrélation spatiale entre les 3 catégories de cet indice (faible: 1, moyen: 2 et élevé: 3; cf. paragraphe Matériel et Méthodes). Les résultats sont significatifs pour les catégories « moyen » et « élevé », mais démontrant des autocorrélations spatiales différentes: z « moyen » = -2,20 (p = 0,028) et z « élevé » = 2,63 (p = 0,009) ce qui signifie qu'il est plus probable de retrouver des HIS « élevés » proches les uns des autres que suivant le hasard,

Figure 7 - Valeur d'Humus Index de Surface (HIS) sur les sites RMQS BioDiv
Figure 7 – *Values of Surface Humus Index (SHI) on RMQS BioDiv sites*



et moins probable de trouver des HIS « moyens » proches., les résultats ne sont pas significatifs pour la catégorie « faible » (z = -0,4931, p = 0,622), ce qui indique l'absence de structuration spatiale de cette catégorie. Il existe donc des taches correspondant à des sites présentant une structuration des sols non liée à l'activité biologique (« HIS » élevé, pas de structuration par la faune), alors que la spatialisation de l'impact de la faune (impact des lombriciens) sur la structure n'est pas observable (« HIS » faible). Le résultat concernant HIS « moyen », correspondant à la structuration par les enchytréides (annélides oligochètes de petite taille) est significatif mais non interprétable.

CONCLUSION

Le programme RMQS par l'étude d'un nombre important de groupes biologiques du sol,était ambitieux. En effet, si le programme Européen ENVASSO préconise la prise en compte de trois paramètres biologiques (lombriciens, collemboles et activité respiratoire microbienne) dans le cadre du suivi du déclin de la biodiversité des sols (Bispo 2007), le programme RMQS a élargi de manière significative ce nombre de paramètres biologiques. Il a ainsi permis de mieux connaître la richesse taxonomique des sols à l'échelle régionale (27200 km), notamment en recensant 3 espèces lombriciennes jusqu'alors non répertoriées sur ce territoire, ainsi qu'en dressant la liste des groupes fonctionnels de nématodes et de mésofaune jusqu'alors non documentés. La diversité des situations agronomiques et pédologiques de la Région Bretagne a permis d'étudier un éventail important de contextes agro-pédo-climatiques, ce qui a contribué à initier un large référentiel de la biodiversité des sols en zone tempérée.

Le plan de charge des campagnes de terrain du RMQS était lui aussi ambitieux, mais il a été mené avec succès, notamment grâce au choix d'utiliser toujours la même équipe logistique et à leur constante coordination avec les membres du consortium scientifique ainsi créé ; ces personnels communs ont assuré les opérations de prélèvements sur le terrain, la gestion et le traitement des données. Ce programme a été l'occasion de mettre en place des procédures et protocoles qui sont actuellement discutés au niveau européen et qui pourront servir à valider l'usage de certains paramètres biologiques au sein des réseaux de suivi de l'évolution des sols, en lien avec le changement des usages et des modes de gestion des terres. A cet égard, notre étude représente une contribution majeure au choix des paramètres biologiques potentiellement utilisables comme indicateurs de la qualité des sols.

Ce programme a par ailleurs généré une base conséquente de données biologiques (plus de 80 000 données) organisées dans une métabase de données DonEcoSol, associée à celle du RMQS classique, DONESOL de l'INRA d'Orléans (InfoSol). Une première étape d'analyse de ces données a été réalisée, permettant de représenter, des cartes de distribution, certains pa-

ramètres biologiques à cette échelle régionale. Cette première partie de l'analyse des données, correspondant à l'étude intra-groupes biologiques, va être approfondie afin d'appréhender la biodiversité des sols par un certain nombre de variables (indices de diversité, équitabilité,...). Cette étape va être complétée par l'analyse des interactions entre les différents groupes biologiques (étape 2 du processus de traitement des données), afin de mettre en exergue et de mieux comprendre les structurations biologiques observées (relations de compétition, mutualisme,...). La dernière étape (étape 3) va consister en l'étude des relations entre les différents paramètres biologiques et les facteurs explicatifs potentiels du milieu environnant (usage des sols, données pédologiques et physico-chimiques), elle sera majeure dans l'identification d'indicateurs biologiques.

C'est à travers l'ensemble de ces approches complémentaires que le programme RMQS s'inscrit dans une démarche de « suivi » de la qualité des sols ; le nombre considérable de données biologiques enregistrées représente un état des lieux qui pourra, le cas échéant, être utilisé pour juger des évolutions de l'état biologique des sols dans le temps, en fonction de changements d'origine anthropique (mode d'usage des sols, pratiques culturales, contamination) ou climatique. La mise en regard des données biologiques les données du milieu environnant (usage des sols, données physico-chimiques et pédologiques) (étape 3 de l'analyse des données) participera à la définition de valeurs-seuils rendant compte de la perturbation ou non des milieux, permettant de construire des indicateurs de la qualité des sols. Ce dernier aspect répond notamment au besoin exprimé par les politiques et les organismes de développement, de créer des outils permettant d'estimer le niveau de perturbation ou contamination d'un milieu afin de pallier les conséquences d'un dysfonctionnement du sol.

REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier l'ensemble des agriculteurs chez qui nous avons échantillonné, pour leur accueil et leur participation à ce programme.

BIBLIOGRAPHIE

Anderson J.P.E. et Ingram J.S.I., 1993 - Tropical Soil Biology and Fertility. A Handbook Of Methods. CAB International. Oxon, UK, 221 p.

Arrouays D., Richer de Forges A., Morvan X., Saby N.P.A., Jones A.R. et Le Bas C., (eds). 2008 a - Environmental Assessment of Soil for Monitoring : Volume IIb Survey of National Networks. EUR 23490 EN/2B, Office for the Official Publications of the European Communities, Luxembourg, 254 p.

Arrouays D., Morvan, X., Saby N.P.A., Richer de Forges A., Le Bas C., Bellamy P.H., Berényi Üveges J., Freudenschuß A., Jones A.R., Jones R.J.A., Kibblewhite M.G., Simota C., Verdoodt A. et Verheijen F.G.A., (eds) 2008b - Environmental Assessment of Soil for Monitoring : Volume IIa Inventory & Monitoring. EUR 23490 EN/2A, Office for the Official Publications of the European Communities, Luxembourg, 188 p.

Binet F., 1993 - Dynamique des peuplements lombriciens et fonctions des lombriciens en sols cultivés tempérés. Thèse de Doctorat, Université de Rennes 1, 299 p.

Bispo A., Peres G., Cluzeau D., Graefe U., Römbke J., Rutgers M., Fuchs M., Schulte R., Dombos M., Simon B., Gál A., Cortet J., Chaussod R., Ritz K., Creamer R., Winding A., English M., Boixadera J. et Rubio J.L., 2007 - ENVASSO (Environmental assessment of soil for monitoring) WP 5 – Decline in soil biodiversity. EU Contract No. 022713, 22 p.

Bouché M.B., 1972 - Lombriciens de France. Ecologie et Systématique. INRA Annales de Zoologie, Ecologie Animale, 671 p.

Cannavacciuolo M., Bellido A., Cluzeau D., Rougé L., Pérès G., Jolivet C., Fargette M., Mateille T., Foucaud-Lemercier B. et Dubs F., 2008 - DONECOSOL : A software tool to manage biodiversity's data. Colloquium Eurosoil Vienna, August 2008. Présentation affichée.

Chaussod R., Houot S., Guiraud G. et Hétier J.M., 1988 - Size and turnover of the microbial biomass in agricultural soils : laboratory and field measurements. In : Nitrogen efficiency in agricultural soils, D.S. Jenkinson and K.E. Smith, Eds., Elsevier Applied Science : pp. 312-326.

Cluzeau D., Cannavacciuolo M. et Pérès G., 1999 - Indicateurs macrobiologiques des sols : les lombriciens – Méthode d'échantillonnage dans les agrosystèmes en zone tempérée. In 12ème Colloque Viticole et OEnologique Ed. ITV Paris : pp. 25-35.

Cluzeau D., Lemercier B., Ablain F., Pérès G. et Grandin V., 2003 – Ecologie des lombriciens & Interactions avec les activités agricoles en zone tempérée (Cas particulier de cuivre). Les Cahiers du BIOGER. Vol 2/2003, 240 p.

EC (European Community). 2006a - Proposal for a directive of the European Parliament and of the council establishing a framework for the protection of soil and amending Directive 2004/35/EC. COM(2006) 232 final.

http://ec.europa.eu/environment/soil/pdf/com_2006_0232_en.pdf

EC (European Community). 2006b - Thematic Strategy for Soil Protection. COM(2006)231 final. http://ec.europa.eu/environment/soil/pdf/com_2006_0231_en.pdf

Grolleau E., Bargeot L., Chafchafi A., Hardy R., Doux J., Beaudou A., Le Martret H., Lacassin J.C., Fort J.L., Falipou P. et Arrouays D., 2004 - Le système d'information national sur les sols : DONESOL et les outils associés. Etude et Gestion des Sols, 11 (3) : pp. 255-269.

Heywood V.H., (ed.). 1995 - Global Biodiversity Assessment. United Nations Environment Programme. Cambridge University Press, Cambridge, pp. xi + 1140.

ISO (International Organization for Standardization) 23611-2 : 2006 - Qualité du sol -- Prélèvement des invertébrés du sol - Partie 2 : Prélèvement et extraction des micro-arthropodes (Collembola et Acarina). Genève, Suisse, 15 p.

ISO (International Organization for Standardization) 23611-4 : 2007 - Qualité du sol - Prélèvement des invertébrés du sol - Partie 4 : Prélèvement, extraction et identification des nématodes du sol. Genève, Suisse, 15 p.

ISO/DIS (International Organization for Standardization) 10381-6 : 2007 - Soil quality - Sampling - Part 6 : Guidance on the collection, handling and storage of soil under aerobic conditions for the assessment of microbiological processes, biomass and diversity in the laboratory. Genève, Suisse, 12 p.

ISO/CD (International Organization for Standardization) 23611-5 : 2009 - Qualité du sol -- Prélèvement des invertébrés du sol - Partie 5 : Prélèvement et extraction des macro-invertébrés du sol, Genève, Suisse, 17 p.

INRA, Unité INFOSOL, dictionnaire de données DONESOL, version 2.0 du 1er Juin 2008, téléchargeable sur le site du GIS Sol, www.gissol.fr 340 p.

Jolivet C., Boulonne L. et Ratié C., 2006a - Manuel du Réseau de Mesures de la Qualité des Sols de France (RMQS). Edition 2006, Unité InfoSol, INRA Orléans, France, 190 p. Téléchargeable sur le site du GIS SOL, www.gissol.fr.

Jolivet C., Arrouays D., Boulonne L., Ratié C. et Saby N., 2006b - Le Réseau de Mesures de la Qualité des Sols de France (RMQS). Etat d'avancement et premiers résultats. Etude et Gestion des Sols, 13(3) : pp. 149-164.

Lavelle P. et Spain A.V., 2001 - Soil ecology. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht. 654 p.

Lavelle P., 1988 - Assessing the abundance and role of invertebrate communities in tropical soils : aims and methods. Journal of African Zoology, 102 : pp. 275-83.

Martin-Laurent F., Philippot L., Hallet S., Chaussod R., Germon G., Soulas G. et Catroux G., 2001 - DNA extraction from soils : old bias for new microbial diversity analysis methods. Applied and Environmental Microbiology, 67 : pp. 2354-2359.

Morvan X.P.P., Saby N.P.A., Arrouays D., Le Bas C., Jones R.J.A., Verheijen F.G.A., Bellamy P.H., Stephens M. et Kibblewhite M.G., 2008 - Soil monitoring in Europe : a review of existing systems and requirements for harmonisation. Sci. Tot. Env., 391 : pp. 1-12.

Pérès G., 2003 - Identification in situ des interactions entre la diversité lombricienne et la macrobioporosité dans le contexte polycultural breton. Influence sur le fonctionnement hydrique des sols. Thèse de doctorat, Université de Rennes 1, 253 p.

Ponge J.F., Chevalier R., Loussot P., 2002 - Humus Index : an Integrated tool for the assessment of forest floor and topsoil properties. Soil Science Society of America Journal, 66 : pp. 1996-2001.

Ranjard L., Poly F., Lata J.-C., Mougel C., Thioulouse J. et Nazaret S., 2001 - Characterization of bacterial and fungal soil communities by automated ribosomal intergenic spacer analysis fingerprints : biological and methodological variability. Applied and Environmental Microbiology, 67(10) : pp. 4479-4487.

Ruiz N., 2004 - Mise au point d'un système de bioindication de la qualité du sol basé sur l'étude des peuplements de macro-invertébrés. Thèse de Doctorat de l'Université Paris 6, Spécialité Science de la Vie, 14 septembre 2004, Bondy : 327 p.

Velasquez E., Lavelle P. et Andrade M., 2007 - GISQ, a multifunctional indicator of soil quality. Soil Biology and Biochemestry, 39 : pp. 3066-3080.

Villenave C., Ba A.O., Rabary B., 2009 - Diagnostic du fonctionnement biologique du sol par l'analyse de la nématofaune : semis direct versus labour sur les hautes terres près d'Antsirabé (Madagascar). EGS V16/3-4. pp. 369-378