RMQS *BioDiv* Bretagne

Tome 1 : Synthèse générale

<u>Février 2006 – Février 2009</u>

Coordinateur scientifique : Daniel CLUZEAU [3]

Bellido[3] A., Boulonne[1] L., Cannavacciuolo[11] M., Chaussod[9] R., Cortet[5] J., Fargette[7] M., Giteau[12] J-L., Guernion[3] M., Jolivet[1] C., Lavelle[4] P., Foucaud-Lemercier[2] B., Martin[9] F., Mateille[7] T., Mercier[3] V., Péres[3] G., Pernin[5] C., Plantard[8] O., Ponge[6] J.F., Ranjard[9] L., Rougé[3] L., Ruiz[4] N., Tico[12] S., Velasquez[4] H., Villenave[10] C., Walter[2] C.

RMQS *BioDiv* Bretagne

Tome 1 : Synthèse générale

<u>Février 2006 – Février 2009</u>

Coordinateur scientifique : Daniel CLUZEAU [3]

Bellido[3] A., Boulonne[1] L., Cannavacciuolo[11] M., Chaussod[9] R., Cortet[5] J., Fargette[7] M., Giteau[12] J-L., Guernion[3] M., Jolivet[1] C., Lavelle[4] P., Foucaud-Lemercier[2] B., Martin[9] F., Mateille[7] T., Mercier[3] V., Péres[3] G., Pernin[5] C., Plantard[8] O., Ponge[6] J.F., Ranjard[9] L., Rougé[3] L., Ruiz[4] N., Tico[12] S., Velasquez[4] H., Villenave[10] C., Walter[2] C.

[1] INRA Orléans InfoSol
[2] Agrocampus Rennes, UMR INRA *SAS*
[3] Université de Rennes1, UMR CNRS *EcoBio*
[4] Univ. Paris 12 - Bondy, UMR IRD *BioSol*
[5] ENSAIA-INPL Nancy, UMR INRA *Sols et Environnement*
[6] UMR CNRS Brunoy
[7] IRD Montpellier, UMR *CBGP*
[8] Agrocampus - INRA Rennes, UMR INRA *Bio3P*
[9] INRA Dijon, UMR INRA MGS
[10] IRD Montpellier, UMR *Eco&Sols*
[11] ESA Angers
[12] Chambre d'Agriculture de Bretagne

TOME 1 :

SYNTHESE GENERALE

Table des matières

INTRODUCTION **1**

Partie I : Démarche engagée **5**

Chapitre 1 : Protocoles et Procédures *6*

1.1 Description du réseau de sites 7

1.2 Description de la zone d'échantillonnage 8

1.3 Echantillonnage des différents groupes biologiques 11

1.3.1 Microbiologie 11

1.3.2 Nématofaune 12

1.3.3 Mésofaune 15

1.3.4 Lombriciens 16

1.3.5 Macrofaune totale du sol 17

1.3.6 Humus Index 18

Chapitre 2 : Gestion et traitements des données *19*

Partie II : Synthèse des résultats du programme RMQS BioDiv **23**

Chapitre 3 : Résultats du programme RMQS BioDiv *24*

3.1 Synthèse des résultats obtenus par groupes biologiques 24

3.1.1 Synthèse *Microbiologie* (Tome 3) 24

3.1.2 Synthèse *Nématofaune du sol* (Tome 4) 27

3.1.3 Synthèse *Nématodes phytoparasites* (Tome 5) 30

3.1.4 Synthèse *Mésofaune* (Tome 6) 32

3.1.5 Synthèse *Lombriciens* (Tome 7) 34

3.1.6 Synthèse *Humus Index* (Tome 9) 39

3.2 Référentiels des paramètres biologiques 40

3.2.1 Référentiels des paramètres globaux 41

3.2.2 Référentiels des paramètres « fonctionnels » 49

3.2.3 Référentiels des paramètres de biodiversité 59

3.2.4 Synthèse des résultats entre paramètres biologiques et variables explicatives 65

3.3 Lien entre les groupes biologiques étudiés 68

3.3.1 Lien entre paramètres biologiques globaux 68

3.3.2 Lien entre structure taxonomique des communautés 68

Chapitre 4 : Discussion et transfert de résultats vers les décideurs *71*

Partie III : Valorisation **81**

Chapitre 5 : Communication - Transfert *81*

5.1 Transfert vers la communauté scientifique 82

5.2 Transfert vers les professionnels 84

PERSPECTIVES et CONCLUSION **89**

INTRODUCTION

L'ADEME, de par son décret de création, a pour mission de susciter, animer, coordonner, faciliter et, le cas échéant, réaliser toutes études ayant notamment pour objet la limitation de la production de déchets, leur élimination, leur récupération et leur valorisation, ainsi que la prévention de la pollution des sols et la réhabilitation des sites pollués.

Dans le cadre de ses missions, l'ADEME est membre fondateur du Groupement d'Intérêt Scientifique Sol (GIS Sol[1]) dont les objectifs sont de constituer et de gérer un système d'information sur les sols de France, par rapport à leur distribution spatiale, leurs propriétés et l'évolution de leurs qualités. Parmi les différents programmes menés par le GIS Sol, l'ADEME participe notamment au RMQS (Réseau de Mesures de la Qualité des Sols) dont le principal objectif est de mesurer périodiquement différentes variables afin d'être en mesure d'évaluer la qualité des sols et d'estimer leur évolution (Jolivet, 2006). Actuellement, les mesures réalisées sont exclusivement physiques (ex : densité apparente, etc.) ou chimiques (ex : teneur en éléments traces, etc.). Ainsi, contrairement à d'autres réseaux européens (Allemagne, Pays-Bas, Irlande, Lettonie) de surveillance des sols, aucune mesure biologique n'est actuellement réalisée. Dès lors, le programme **RMQS *BioDiv* Bretagne** a été accueilli très favorablement par le Haut Comité de Groupement du GIS Sol lors de sa présentation en juin 2005, car d'une part il constitue une expérience unique de mesure spatialisée de la diversité biologique des sols en France, et d'autre part, ses conclusions permettront d'orienter le choix des paramètres biologiques à mesurer ultérieurement sur le réseau.

[1] http://www.gissol.fr/index.php

Ce programme complète également deux actions menées par l'ADEME à savoir :

- le programme national ADEME "Bioindicateurs de qualité des sols" qui a besoin d'acquérir des données sur différentes composantes biologiques du sol, dans différents contextes, afin de constituer des référentiels d'interprétation des données acquises par différents bioindicateurs (ADEME, 2004)
- le programme européen ENVASSO[2] (ENVironmental ASsessment of Soil for mOnitoring) pour lequel l'ADEME est notamment chargée d'animer et de coordonner les actions concernant la mesure de la biodiversité des sols et son interprétation.

Le RMQS *BioDiv* vise à établir un premier référentiel de la composante biologique des sols et de son activité grâce à une caractérisation de l'ensemble de la biodiversité des sols ; ses différents objectifs sont :

- évaluer des paramètres définissant l'état de la biodiversité structurelle et fonctionnelle
- étudier les relations possibles entre les paramètres définissant la qualité d'un sol et sa composante biologique
- pallier au manque d'outils de mesure des caractéristiques biologiques des sols

Ce programme est mené par l'UMR ECOBIO (Université de Rennes 1 / CNRS) et financé, en partie, par l'ADEME. Différents partenaires de toute la France (Rennes, Paris, Dijon, Montpellier, Nancy) se sont associés pour permettre cet inventaire de la biodiversité des sols bretons. Les groupes biologiques étudiés dans le cadre de ce programme sont : la macrofaune totale, les lombriciens, la mésofaune, les nématodes et la microbiologie. Ainsi, plusieurs échelles de taille d'organismes sont explorées (Figure 1).

[2] http://www.envasso.com/biodiversity.htm

- **Macrofaune**

② - Macro invertébrés (IRD Bondy UMR 137 BioSol, N. Ruiz)

① - Lombriciens (UMR CNRS Rennes EcoBio, D. Cluzeau)

- **Mesofaune**

③ - Collemboles & Acariens (ENSAIA-INPL/INRA Nancy, J. Cortet et UMR CNRS 7179 Brunoy, JF. Ponge)

- **Microfaune**

④ - Nématofaune totale (IRD Montpellier, UMR Seq-Bio, C. Villenave)

④ - Nématodes phytoparasites (IRD Montpellier, UMR CBGP, T. Mateille)

- **Microflore**

⑤ - Biomasse microbienne (UMR INRA Dijon, R. Chaussod)

⑤ - Structure génétique des communautées microbienne (UMR INRA Dijon, F. Martin)

Mesures complémentaires

② - Indice d'Humus (UMR CNRS 7179 Brunoy, JF. Ponge)

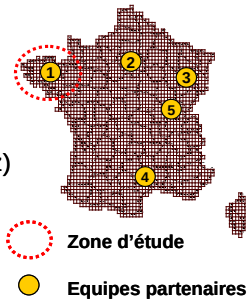


Figure 1 : Groupes biologiques étudiés et équipes partenaires associées du programme RMQS *BioDiv*

Ce document constitue la synthèse générale (Volume 1 - *Tome 1*) du programme RMQS *BioDiv*. Il est complété par un tome de méthodologie au terrain et au laboratoire : le cahier des méthodes (Volume 2 - *Tome 2*) et par sept tomes de résultats par groupes biologiques répartis en deux volumes :

Volume 3
- Microbiologie (*Tome 3*)
- Nématofaune du sol (*Tome 4*)
- Nématodes phytoparasites (*Tome 5*)

Volume 4
- Mésofaune (*Tome 6*)
- Lombriciens (*Tome 7*)
- Macrofaune (*Tome 8*)[3]
- Humus index (*Tome 9*)

[3] Ce tome sera fourni ultérieurement lorsque les données seront disponibles

Le tome 1 de synthèse générale est composé de trois parties. **La première partie** de ce rapport expose la démarche engagée en termes de protocoles et procédures, et de gestion et traitement des données. **La deuxième partie** présente une synthèse des résultats acquis au cours du programme RMQS *BioDiv*. Ces principaux résultats concernent les référentiels des paramètres biologiques des sols en Bretagne. Les réponses aux attentes de l'ADEME concernant des aspects pratiques, techniques et méthodologiques qui constituent des pistes pour de futures études sur la composante biologique des sols, y sont également discutées. **La troisième partie** est consacrée à la valorisation en détaillant les transferts réalisés vers la communauté scientifique et les professionnels.

Partie I : Démarche engagée

Dans le cadre du programme RMQS *BioDiv,* trois groupes de travail ont été constitués :

- Protocoles et procédures,
- Gestion et traitement des données,
- Modalité de transfert de connaissances.

Cette partie expose les démarches engagées au cours de ce programme. Elles concernent :

i) la création d'un cahier des méthodes, véritable outil pour de futurs programmes de monitoring de la biodiversité des sols,

ii) la réflexion sur l'harmonisation des traitements de données et la mise en lien avec les variables explicatives, la prise en compte de la dimension spatiale et le lien entre un très grand nombre de paramètres biologiques.

iii) la réflexion sur les modalités de transfert de connaissances avec l'ensemble des partenaires de Sols de Bretagne (Agrocampus UMR *SAS*, Chambre Régionale d'Agriculture de Bretagne, Unité INRA *InfoSol* Orléans) (voir partie III de ce rapport).

Chapitre 1 : Protocoles et Procédures

L'un des objectifs finalisés du programme RMQS *BioDiv* est de confirmer des méthodes de caractérisation de communautés du sol afin de contribuer à une meilleure définition de normes. Dans cet esprit, un **cahier des méthodes** ayant pour but de recenser les **protocoles et procédures** d'études des paramètres biologiques pris en compte dans le cadre de ce programme a été rédigé. Ce cahier est composé de nombreuses illustrations pour faciliter la compréhension des aspects « techniques ». Il est construit en deux parties : la première porte sur les stratégies d'échantillonnage et les méthodes de prélèvement au terrain, et la seconde sur les méthodes d'analyses au laboratoire.

Le chapitre de cette synthèse finale sur les protocoles et procédures est basé en grande partie sur le cahier des méthodes. Il en expose uniquement les principaux points. Dans un **premier temps**, le réseau de sites et la zone de prélèvement (appelé zone *BioDiv*) est décrite. Dans un **second temps**, une présentation succincte (méthode de prélèvements, paramètres obtenus, …) des différents groupes biologiques étudiés dans ce programme est exposée.

Pour de plus amples informations sur le déroulement du prélèvement, le matériel utilisé, les méthodes d'analyses au laboratoire et les personnes référentes, il est vivement conseillé la lecture approfondie du Tome 2 « Procédures & protocoles ».

1.1 Description du réseau de sites

Le programme RMQS *BioDiv* étant calé sur les sites du RMQS classique, son échantillonnage est systématique. Ce lien entre les deux programmes permettra de coupler les données biologiques avec un grand nombre de paramètres explicatifs (données physico-chimiques, données pédologiques, données agricoles).

La région Bretagne compte 114 sites RMQS, répartis sur une grille de 16 x 16 km.

- En 2006, une première campagne de terrain du programme RMQS *BioDiv* a permis d'échantillonner 34 sites. Lors de cette campagne, les prélèvements ont été réalisés en deux étapes : les lombriciens dans un 1er temps (entre le 15 février et le 15 avril), puis les autres prélèvements biologiques (du 5 au 20 avril).
- En 2007, les 75 sites restants ont pu être échantillonnés grâce à la composition de deux équipes de préleveurs travaillant en parallèle. Les prélèvements des différents groupes biologiques ont été réalisés en un unique passage, entre le 15 février et le 23 avril (Figure 2).

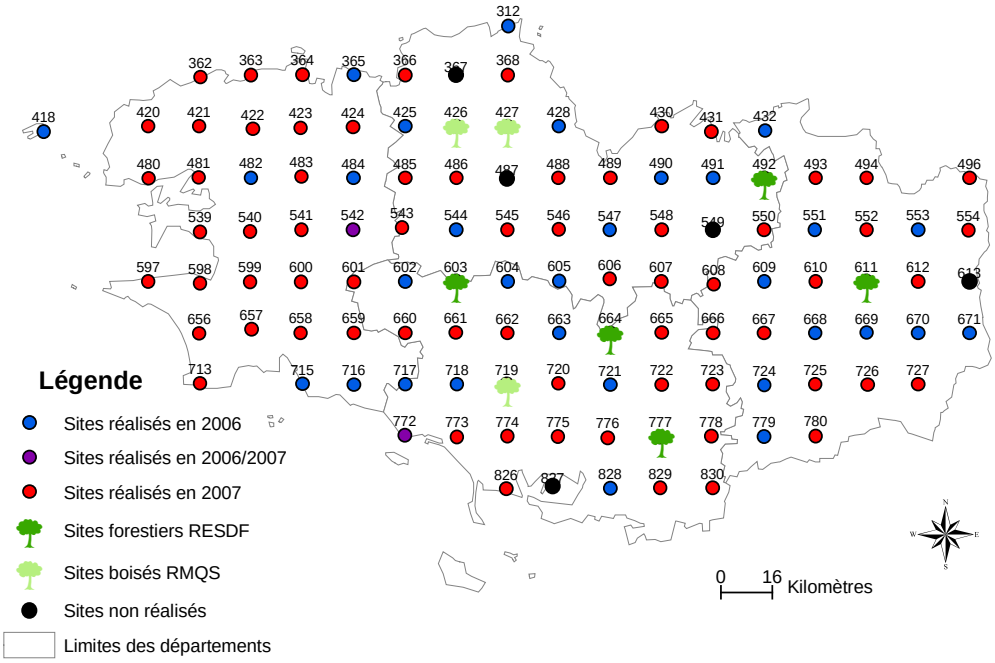


Figure 2 : Carte de réalisation des sites RMQS *BioDiv* Bretagne

1.2 Description de la zone d'échantillonnage

La zone d'échantillonnage *BioDiv* est une bande de 34 m sur 3 m, définissant une surface de 102 m², ce qui est en accord avec les recommandations européennes issues du programme ENVASSO. Cette zone est située à 5 m au Nord du carré d'échantillonnage composite RMQS classique (Figure 3). Cette distance a été retenue afin d'éviter au maximum d'interagir avec la zone composite tout en restant dans des conditions topo-pédologiques similaires.

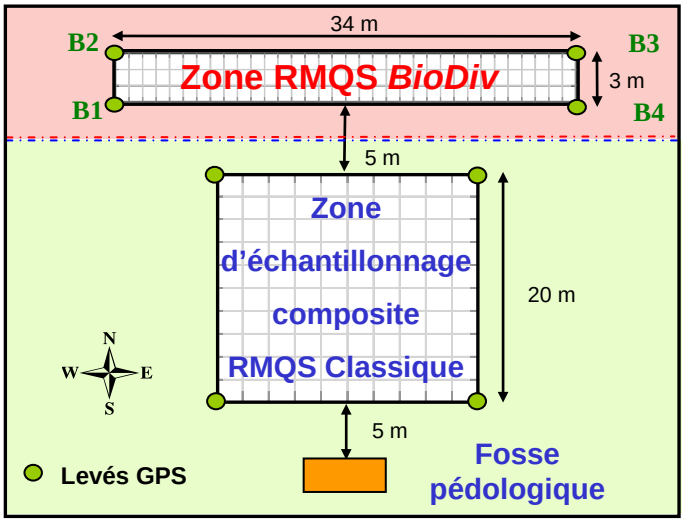


Figure 3 : Positionnement de la zone d'échantillonnage RMQS *BioDiv* par rapport à la zone d'échantillonnage RMQS classique.

Remarque : Par défaut, la zone d'échantillonnage RMQS *BioDiv* est implantée au Nord du carré d'échantillonnage RMQS classique. Mais des caractéristiques locales (limite de parcelle, zone hydromorphe…) peuvent conduire à modifier cette orientation. L'implantation de la zone d'échantillonnage est avant tout choisie en fonction de l'homogénéité de la parcelle.

A l'intérieur de la zone *BioDiv* sont clairement définis des secteurs de prélèvement pour chaque groupe taxonomique (Figure 4).

Figure 4 : La zone RMQS *BioDiv* : position des espaces de prélèvements des différents taxons

Les zones de prélèvements définies pour chaque groupe taxonomique sont ici matérialisées par des piquets de couleur.

Après l'implantation d'un site, la succession des prélèvements s'organise autour de deux équipes de préleveurs (Université de Rennes1 et IRD Bondy). Dans un premier temps, deux préleveurs de l'équipe de l'Université de Rennes 1 réalisent un échantillon composite issu de 32 carottes de sol, qui sera utilisé pour les analyses de la microfaune et de la microflore. Dans le même temps, la troisième personne de l'équipe effectue les prélèvements de la mésofaune (3 réplicats). Ensuite, l'échantillonnage des lombriciens, qui dure environ 1h30, est mis en œuvre sur 3 réplicats. Durant cette période, 2 ou 3 personnes de l'équipe de l'IRD Bondy prélèvent la macrofaune totale sur 6 réplicats.

1.3 Echantillonnage des différents groupes biologiques

Echantillon composite :
Les prélèvements de la microflore et de la nématofaune sont réalisés à partir d'échantillons de terre effectués sur 32 carottages élémentaires de sol (ø 7cm, profondeur 15 cm) sur l'ensemble de la zone *BioDiv*. La terre des 32 carottages est regroupée, tamisée (6 mm) puis homogénéisée pour former un échantillon composite. La conservation des échantillons au terrain et leur transport vers les laboratoires d'analyses (transporteur frigorifique) sont réalisés à + 4°C (norme ISO/DIS 10381-6).

1.3.1 Microbiologie

Trois kilogrammes de l'échantillon composite de sol sont utilisés pour les analyses de microbiologie en laboratoire.

Divers paramètres microbiologiques sont étudiés dans le cadre du programme RMQS *BioDiv*. Tout d'abord, la biomasse microbienne (**MOV et MOV%Ct**) est déterminée par la méthode de fumigation-extraction (Chaussod *et al*., 1988). Il s'agit d'une méthode aujourd'hui validée par la communauté scientifique et qui a donné lieu à une norme internationale (ISO 14-240.2).
Les communautés bactériennes telluriques sont également étudiées à l'aide de techniques basées sur l'extraction directe de l'ADN du sol selon la procédure décrite par Martin-Laurent *et al*. (2001) et en cours de normalisation auprès de l'ISO (texte ISO/CD 11063). Plusieurs analyses ont été conduites :

(i) L'abondance relative de la communauté globale bactérienne est déterminée par qPCR ciblant l'ADNr 16S de l'opéron ribosomique bactérien (**ADNr 16S**) à partir des extraits de l'ADN de sol

(ii) L'abondance relative des communautés bactériennes fonctionnelles impliquées dans la dénitrification (**narG**) et des communautés impliquées dans la dégradation du protocatechuate, un intermédiaire clef de la voie des β -cetoadipates

responsable de la biodégradation des composés phénoliques (**pcaH**), sont quantifiées.

(iii) La structure génétique de la communauté bactérienne globale est analysée par **B-ARISA** (Bacterial-Automated Ribosomal Intergenic Spacer Analysis, Ranjard *et al*., 2003).

On dispose ainsi de paramètres globaux purement quantitatifs (biomasse microbienne) et, pour les populations bactériennes, d'une part de paramètres qualitatifs (B-ARISA), d'autre part de paramètres semi-quantitatifs portant sur l'abondance relative de gènes marqueurs de populations (ADNr 16S) ou de fonctions (narG et pcaH).

1.3.2 Nématofaune

Pour les analyses de nématofaune en laboratoire, 1,5 kg de sol de l'échantillon composite sont utilisés.

1.3.2.1 Nématofaune totale

L'analyse de la nématofaune est réalisée selon la norme ISO 23611-4 (février 2008) sur 109 échantillons de sol frais. Les nématodes sont extraits des échantillons de sol par élutriation. Les extractions sont réalisées sur une aliquote de sol de 250 ml pour chaque échantillon de sol provenant d'un site RMQS. Chaque aliquote est pesée avec précision (poids moyen de l'ordre de 300g). Cette élutriation permet de séparer les nématodes des particules minérales et organiques de masses volumiques supérieures aux nématodes. Le produit de l'élutriation est filtré à travers quatre tamis de maille de 50 µm, ce qui permet d'éliminer les particules fines (<50 µm) sachant que les nématodes ont une longueur supérieure à 200 µm. Les nématodes et autres particules retenues sont alors placés sur un filtre en ouate monté sur un tamis de 1000 µm de maille placé pendant 2 jours sur une boîte de Pétri remplie d'eau. Les nématodes vivants traversent le filtre, se séparant des débris et sont retrouvés dans l'eau. Les suspensions sont alors concentrées par décantation et aspiration du surnageant dans un volume de 50 ml. Pour chaque échantillon, les nématodes sont

comptés sous stéréomicroscope et ce comptage sert à déterminer la densité totale de nématodes qui est exprimée en nombre de nématodes par gramme de sol sec.

Les nématodes sont ensuite fixés dans une solution formolée (formol 4%). Chaque échantillon est monté dans une lame d'ensemble, et, en moyenne, 200 nématodes ont été identifiés par échantillon sur critères morphologiques au microscope optique (x 400), en utilisant les clés d'identification des nématodes de Bongers (1994), Andrassy (1984), Jairajpuri & Ahmad (1992), Siddiqi (2000). Plus de 21 000 nématodes ont été identifiés sur l'ensemble des sites.

Les résultats des comptages et identifications de nématodes sont stockés dans une base de données électronique (tableur ou base de données). Les données de base (comptages sur les grandes lames) des analyses sont converties en unités de poids de sol sec.

La caractérisation des peuplements de nématodes s'effectue à différents niveaux :

- global : densité de nématodes libres et phytoparasites (nb ind/g sol sec),
- fonctionnel : densité des groupes trophiques, densité des guildes fonctionnelles, indices nématologiques (indices de maturité : MI, MI sans phyto, BaMI, FuMI, indice d'enrichissement (EI), indice de structure (SI), indice de décomposition (CI), le nematode channel ratio (NCR))
- taxonomique : densité des taxons (niveau espèces, genres ou rarement familles), densité des familles
- diversité : richesse taxonomique (niveau famille), l'indice de diversité de Shannon (H') et l'équitabilité (J')

1.3.2.2 Nématodes phytoparasites

Les nématodes sont extraits des échantillons de sol par élutriation (élutriateur Seinhorst). Les extractions sont réalisées sur une aliquote de sol de 250 ml pour chaque échantillon de sol provenant d'un site RMQS. Chaque aliquote est pesée avec précision (poids moyen de l'ordre de 300g).

Les nématodes sont observés, identifiés (niveau générique) et comptés (Merny, 1969) sur l'ensemble de la cellule de comptage à l'aide d'un stéréomicroscope.
Le procédé décrit ici est adapté de la Norme ISO 23611-4: 2008 (section 6.4 Data assessment). Les données peuvent être exprimées en nombre d'individus par dm^3 de sol ou par g de poids frais ou poids sec de sol. Cette procédure nécessite un séchage préalable du sol (étuve 40°C, ≥ 72h)

La caractérisation des communautés de nématodes phytoparasites comprend :

- la densité totale de nématodes phytoparasites (nb ind/g sol sec)
- les paramètres de diversité : richesse taxonomique, diversité, équitabilité
- la structure taxonomique des communautés : densité des taxons (niveau famille et genre)

1.3.2.3 Nématodes à kystes

500 g de l'échantillon composite de sol sont utilisés pour l'étude des nématodes à kystes qui a été réalisée uniquement pour les 32 échantillons de 2006.

Les nématodes à kystes sont caractérisés en présence-absence et en abondance sur les sites. Une détermination taxonomique est réalisée à partir des types morphologiques visibles des kystes. Cette détermination est complétée par une analyse génétique des séquences. Ainsi, la recherche d'homologies a permis l'identification de quatre 4 groupes et la réalisation d'un arbre phylogénétique.

La faible quantité de données ne permet pas d'en présenter des résultats.

1.3.3 Mésofaune

Les échantillons de sol, 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 tubes en plexiglas. Dans la mesure du possible, 3 profondeurs : 0-5, 5-10 et 10-15 cm ont été prospectées (norme ISO 23611-2:2006(E)). Pour chaque site, 3 répétitions sont effectuées.

Au laboratoire, l'extraction de la mésofaune est effectuée par un extracteur à haut gradient de températures. Les individus collectés sont comptés 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 : Oribatida, Actinedida, Acaridida et Gamasida.

La caractérisation des peuplements de mésofaune s'effectue à différents niveaux :

- global : abondance totale de mésofaune, de collemboles, d'acariens (nb ind/m²),
- fonctionnel : abondance des types biologiques de collemboles et de sous-ordres d'acariens,
- taxonomique : abondance des espèces de collemboles,
- diversité : richesse taxonomique des collemboles, diversité, équitabilité.

1.3.4 Lombriciens

Les prélèvements de lombriciens sont réalisés sur 3 réplicats de 1 m² chacun. Les lombriciens sont prélevés selon la méthode Bouché (1972) et la norme ISO 23611-1 adaptées au contexte agro-pédoclimatique (Cluzeau *et al*., 1999 et 2003) : trois arrosages de solution formolée (3 x 10 L, concentrations 0.25 %, 0.25%, 0.4%) sont appliquées sur un quadrat élémentaire de 1m², subdivisé en 64 pixels. Ces applications formolées permettent de prélever les lombriciens qui, adoptant un comportement de fuite en réponse aux propriétés urticantes du formaldéhyde, remontent à la surface du sol. Ce prélèvement chimique est complété par le tri manuel d'un bloc de sol d'1/16 m² (0,25 x 0,25 x 0,25 cm de profondeur) extrait après le prélèvement formol. Les lombriciens récoltés sont fixés et conservés dans une solution formolée (4%).

Au laboratoire, les espèces lombriciennes sont déterminées au niveau infra-spécifique suivant une clé de détermination mise au point par Cluzeau (non publiée), basée sur les travaux de Bouché (1972). Les stades de développement (juvénile, sub-adulte ou adulte) sont précisés suivant le stade d'évolution des organes sexuels (pores mâles, puberculum, clitellum) et ils sont pesés individuellement (précision de la pesée : +/- 10 mg).

La caractérisation des peuplements lombriciens s'effectue à différents niveaux :

- ***global*** : abondance (nb ind/m²) et biomasse (g/m²),
- ***fonctionnel*** : abondance et biomasse des catégories écologiques,
- ***taxonomique*** : abondance des taxons, richesse taxonomique, diversité, …

1.3.5 Macrofaune totale du sol

Les prélèvements de la macrofaune totale du sol sont réalisés sur 6 pseudo-réplicats de 1/16 m² chacun. L'extraction de la macrofaune du sol est réalisée en utilisant la méthode TSBF (Tropical Soil Biology and Fertility) qui a été modifiée pour être adaptée aux milieux tempérés (Lavelle, 1988 ; Anderson et Ingram, 1993). Cette dernière méthode est par ailleurs en cours de standardisation (prochaine ISO 23611-5).

Cette méthode combine l'extraction au formol (étape 1) et le tri manuel du sol (étape 2). Sur des surfaces unitaires de 25 x 25 cm d'arête, deux applications d'une solution formolée (0.2%) réalisées à dix minutes d'intervalle sont suivies d'un tri manuel des premiers 15 cm du sol.

Les macro-invertébrés ainsi prélevés sont conservés dans du formol concentré à 4%.

Des mesures physiques sont également réalisées en lien avec les prélèvements de macrofaune totale. Il s'agit de la détermination de la teneur en eau, la densité apparente, la résistance à la pénétration, la résistance résiduelle au cisaillement. La morphologie du sol et la NIRS sont également caractérisées.

Le Tome de résultats concernant la macrofaune du sol sera fourni ultérieurement, car les données ne sont pas, à ce jour, disponibles.

1.3.6 Humus Index

La mesure de l'agrégation du sol est réalisée en utilisant une méthode adaptée de l'Humus Index développé par Ponge *et al*. (2002) en milieu forestier. Cette mesure, réalisée sur la couche superficielle du sol, fournit une information relative à l'activité de la faune du sol. Il s'agit d'un indice traduisant un appauvrissement des réseaux trophiques du sol, l'activité des enchytréides ne se percevant que lorsque celle des lombricides est absente ou réduite et, bien entendu, aucune structure visible n'étant réalisée en l'absence de ces deux groupes.
L'Humus Index correspond donc à une estimation semi-quantitative du degré de complexité des réseaux trophiques, les plus complets étant ceux renfermant une activité notable de vers de terre (Humus Index 1), les plus pauvres n'ayant ni vers de terre, ni enchytréides (Humus Index 3).
C'est donc un indicateur de biodiversité fonctionnelle, à relier à la biodiversité taxonomique.

Les mesures de l'Humus Index sont réalisées à partir des prélèvements de sol pour l'étude de la mésofaune. Chaque indice est la moyenne de trois valeurs, correspondant à chacune des trois profondeurs de sol qui ont été échantillonnées dans chacun des sites.
Le contenu de chaque cylindre est vidé dans une coupelle, puis un score de 1 à 3 est attribué à la structure observée (en l'effritant entre les doigts, sans forcer) :

- **1** pour une structure grumeleuse formée d'agrégats de taille supérieure à 1 mm (réalisée par les vers de terre),
- **2** pour une structure friable mais fine, formée d'agrégats de taille inférieure à 1 mm (réalisée par les enchytréides),
- **3** pour une structure massive, non friable ou, dans le cas des sols sableux, pulvérulente sous la forme de grains de sable non rassemblés en agrégats (pas d'activité structurante de la faune).

La mesure de l'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.

Chapitre 2 : Gestion et traitements des données

Dans un cadre large, le traitement des données du programme RMQS *BioDiv* s'inscrit dans une approche de Data Mining (DM). Le data mining est un processus d'extraction de connaissances. Le cheminement d'une telle approche comprend différentes phases successives : i) phase de description et d'exploration des données, ii) phase explicative, iii) phase prédictive et modélisation et iv) phase de validation.

Plus concrètement, un schéma d'organisation du traitement des données à trois niveaux d'organisation a été réalisé (Figure 5). La première étape concerne des analyses séparées sur chacun des groupes biologiques étudiés. Lors de la deuxième étape, la composante biologique des sols est étudiée dans son ensemble (lien entre les groupes et les taxa). Enfin, la troisième étape permet de mettre en relation les paramètres biologiques étudiés et les variables explicatives potentielles (paramètres physico-chimiques, pratiques agricoles, caractéristiques pédologiques, …). De plus, une approche spatiale est mise en œuvre pour vérifier l'existence ou non de structuration spatiale à l'échelle régionale.

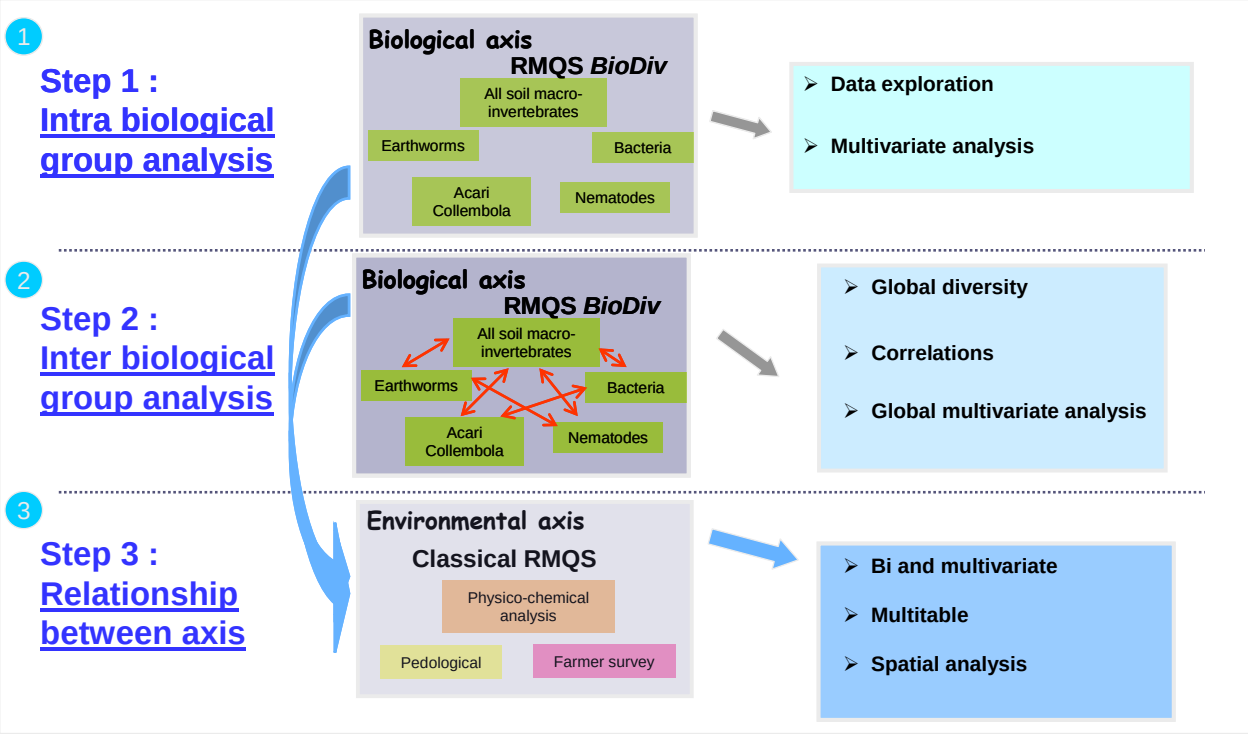


Figure 5 : Schéma conceptuel du traitement des données RMQS *BioDiv*

Les tomes de résultats des « groupes biologiques » sont construits selon un modèle commun, constitué de trois parties :

1) Exploration des données

Les statistiques descriptives et les représentations graphiques sous forme de boîtes à moustaches et d'histogrammes, permettent de caractériser chaque paramètre descripteur, comme l'abondance, la richesse et la diversité taxonomique. Ainsi, les valeurs moyenne, minimale, maximale et extrême sont identifiées. Des transformations peuvent être réalisées pour normaliser les données. Pour l'étude des structures taxonomiques (densité des taxons), des analyses multivariées (Analyse en Composantes Principales : ACP) sont réalisées.

2) Approche spatiale

La représentation cartographique permet une visualisation à l'échelle régionale des valeurs de chaque paramètre. Pour caractériser la structure spatiale des paramètres, le corrélogramme de l'indice de Moran est utilisé ainsi que l'analyse géostatistique (semi-variogramme) effectuée sur les paramètres qui suivent une distribution normale. La présence d'autocorrélation spatiale des taxons a été testée par un test ''Join-Count''.

3) Lien avec les variables explicatives.

Les paramètres biologiques et la structure taxonomique des communautés sont mis en relation avec les variables explicatives potentielles (paramètres physico-chimiques, occupation des sols, pratiques agricoles, données pédologiques …) obtenues dans le cadre du programme RMQS « classique » géré par l'unité Infosol d'Orléans (cf. Annexe IV).

Les logiciels utilisés pour réaliser les analyses sont les suivants :

- XLStat (Version 2007.6 © 1995-2007 AddinSoft),
- Minitab (Version 12.2 © 1998 Minitab Inc),
- R (Version 2.8.0 (2008-10-20) © 2008 The R Foundation for Statistical Computing)
- ArcGis (Version 9.2 © 1999-2006 ESRI Inc.)

* * *

Au regard du nombre important des données acquises (80 000) induisant une complexité des traitements de données, il s'avère nécessaire et incontournable d'engager une réflexion pour aboutir à la création d'un outil de gestion et d'organisation des informations collectées au cours du programme RMQS *BioDiv*. Cette base de données sur la biodiversité des sols serait en lien avec DONESOL gérée par l'INRA d'Orléans. Cette base **DonEcoSol**, créée en 2008 hors de ce programme, permet d'incrémenter toutes les données et métadonnées du RMQS *BioDiv* Bretagne (cf. Annexe II).

Partie II : Synthèse des résultats du programme RMQS BioDiv

Cette deuxième partie constitue une synthèse des principaux résultats obtenus au cours du programme RMQS *BioDiv*. Dans un premier temps, une synthèse par groupes biologiques est proposée. Elle est suivie de planches graphiques illustrant les référentiels, tant pour les paramètres globaux, fonctionnels que de biodiversité, des valeurs obtenues sur les sites bretons. Dans un second temps, un chapitre consacré plus spécialement aux aspects méthodologiques permet de répondre aux diverses attentes de l'ADEME.

Pour de plus amples informations, il est à noter que chaque groupe biologique étudié dans le cadre de ce programme fait l'objet d'un tome de présentation des résultats :

- Tome 3 : Microbiologie : biomasse microbienne et structure génétique des communautés
- Tome 4 : Nématofaune du sol
- Tome 5 : Nématodes phytoparasites
- Tome 6 : Mésofaune
- Tome 7 : Lombriciens
- Tome 8 : Macrofaune (tome non finalisé)
- Tome 9 : Humus Index

Chapitre 3 : Résultats du programme RMQS *BioDiv*

Ce chapitre expose les synthèses des résultats obtenus pour chaque groupe biologique. Il présente également, sous forme de planches graphique, les valeurs de références retrouvées sur les sites RMQS *BioDiv* Bretagne pour les paramètres biologiques étudiés. Trois planches graphiques sont proposées :

- *Planche A* : référentiels des paramètres globaux,
- *Planche B* : référentiels des paramètres fonctionnels,
- *Planche C* : référentiels des paramètres de biodiversité.

3.1 Synthèse des résultats obtenus par groupes biologiques

3.1.1 Synthèse *Microbiologie* (Tome 3)

Biomasse microbienne (MOV et MOV%Ct)

- Les valeurs de biomasse microbienne ne montrent pas de structuration spatiale à l'échelle régionale. Cela montre que d'autres facteurs, liés au sol et à son utilisation, ont une importance majeure.
- La comparaison des résultats obtenus sur les échantillons prélevés au printemps 2006 et au printemps 2007 ne met pas en évidence de *variabilité interannuelle.* Cela indique que le niveau de biomasse microbienne est moins sensible à une éventuelle variabilité climatique interannuelle qu'à des facteurs plus « permanents » comme le type de sol et son utilisation (système de culture, pratiques culturales).
- L'expression de la biomasse microbienne en valeurs relatives (MOV%Ct) discrimine très bien les trois *systèmes d'occupation des sols*
- Des corrélations intéressantes sont mises en évidence entre la biomasse microbienne et certains *paramètres physico-chimiques.* Par exemple, la corrélation négative avec le Phosphore assimilable est à mettre en relation avec un gradient d'intensification agricole entre les sols naturels, les prairies, les cultures. La corrélation positive avec l'humidité des sols est

probablement une fonction indirecte de propriétés des sols (texture, teneur en matière organique, etc.).

Abondance relative de la communauté bactérienne (qPCR ADNr 16S)

- L'abondance relative du gène ADNr 16S montre, comme les autres approches basées sur l'extraction directe de l'ADN, une nette variabilité interannuelle. Bien que l'on ne puisse exclure totalement un effet de la climatologie, il est très probable que cette variabilité soit en réalité d'origine méthodologique : l'ADN des échantillons traités en 2007 a été purifié avec un lot de PVPP différent de celui de 2006 et il a été observé par ailleurs que ce changement pouvait affecter les résultats.
- En termes de *systèmes d'occupation des sols*, ce paramètre discrimine les prairies des cultures. On n'observe pas, en revanche, de corrélations avec des paramètres physico-chimiques du sol. Le *Phosphore assimilable* est le seul paramètre pour lequel une tendance se dessine.

Abondance relative des communautés bactériennes fonctionnelles (*narG* et *pcaH*)

- Les gènes marqueurs d'activité fonctionnelle (*narG* et *pcaH*) ne montrent pas de structuration spatiale à l'échelle régionale.
- Comme pour les gènes ADNr 16S, on observe une nette *variabilité interannuelle.* Comme évoqué précédemment, cette variabilité est plus probablement d'origine méthodologique et en lien avec la purification de l'ADN extrait du sol.
- L'abondance relative (en nombre de copies par ng d'ADN) des gènes *narG* et *pcaH* permet de discriminer les *systèmes d'occupation des sols (prairies, cultures)*, alors que ce n'est pas le cas des ratios *narG*/ADNr16S et *pcaH*/ADNr16S.
- En ce qui concerne les *paramètres physico-chimiques*, la seule corrélation significative est celle observée entre le ratio *narG*/ADNr16S et l'aluminium échangeable. La relation négative entre ces deux paramètres est logique

dans la mesure où il y a généralement peu de nitrates dans les sols très acides (dans lesquels on peut trouver de l'aluminium échangeable).

Structure génétique de la communauté bactérienne globale (B-ARISA)

- Comme pour les paramètres précédents, basés sur une extraction directe de l'ADN du sol, on observe pour les B-ARISA une très forte *variabilité interannuelle* dont on a vu qu'elle est très probablement d'origine méthodologique (lots de PVPP).
- Pour une année donnée, les B-ARISA discriminent assez bien les *systèmes d'occupation des sols* (prairies, cultures, forêts).
- En revanche, les matrices de co-inertie ne mettent pas en évidence de relations claires avec les *paramètres physico-chimiques* des sols. Il possible que ces derniers aient moins d'influence que les cultures (plantes) sur la structure des populations bactériennes (effet rhizosphère et nature biochimique des rhizodépositions).

3.1.2 Synthèse *Nématofaune du sol* (Tome 4)

La nématofaune du sol, qui correspond à l'ensemble des nématodes qui vivent libres dans le sol, a été analysée dans 109 sites bretons aux printemps 2006 et 2007. Les nématodes ont été identifiés au niveau de l'espèce, du genre ou de la famille en fonction des individus (juvéniles / adultes) et des taxons.

Après regroupements pour simplification, 86 taxons ont été retenus, appartenant à 48 familles et correspondants à 7 groupes trophiques (bactérivores, fongivores, phytoparasites, phytophages facultatifs, omnivores, carnivores et entomopathogènes).

Les résultats analysés concernent les abondances (totales, familles, groupes trophiques), les indices nématofauniques (indices basés sur la nématofaune permettant de caractériser le fonctionnement du sol) et les indices de diversité classiques (richesse, diversité, équitabilité).

Le fonctionnement du sol dans les sites de Bretagne suite à l'analyse de la nématofaune peut être décrit comme suit :

- Les parcelles en grande culture présentent des communautés de nématodes avec une chaîne trophique simplifiée, dominées par les nématodes bactérivores opportunistes (en particulier Rhabditides). Ces sols apparaissent très riches en nutriments disponibles.
- Les prairies permanentes présentent de très forte densités de nématodes phytoparasites *Meloidogyne* mais également une plus forte densité de nématodes fongivores ; les prairies temporaires ont parfois des caractéristiques proches des parcelles de grandes cultures et parfois semblables aux prairies permanentes.
- Les forêts se distinguent de parcelles cultivées par un très grand nombre de paramètres nématologiques. De nombreux taxons ne sont trouvés en abondance que dans les forêts, en particulier des nématodes fongivores et omnivores.

Paramètres globaux de la nématofaune

- Les densités de nématodes du sol s'étendent de 2 à 56 nématodes par gramme de sol sec pour une valeur moyenne de 17 individus par gramme de sol sec. Ce sont des valeurs normales pour des sols tempérés.
- Quarante huit familles ont été observées, 20 familles pour les bactérivores, 5 pour les fongivores, 10 pour les phytoparasites, 1 pour les phytophages facultatifs, 5 pour les omnivores, 5 pour les carnivores et 1 pour les entomo-pathogènes. Parmi ces 48 familles, trois sont dominantes : les Rhabditidae, bactérivores opportunistes qui, en particulier, dominent les communautés des sols en grandes cultures ; les Meloidogynae, phytoparasites stricts qui pullulent dans les situations prairiales ; les Tylenchidae, phytophages facultatifs qui sont très abondants à la fois dans les forêts. Les taxons les plus abondants sur l'ensemble des sites sont également assez fréquents.

Paramètres fonctionnels de la nématofaune : groupes trophiques et indices nématofauniques

♦ Les abondances des nématodes des groupes trophiques discriminent parfaitement les occupations du sol : cultures, prairies, forêts. Les forêts sont caractérisées par des densités supérieures de phytophages facultatifs, de fongivores et d'omnivores que les cultures. Les prairies se distinguent des autres usages du fait de leur forte abondance de phytoparasites. Les indices nématofauniques montrent que les sites de forêts présentent une micro-chaîne tropique du sol plus complexe et plus diversifiée que les milieux cultivés (SI et MI élevés) ; les voies de décomposition de la matière organique sont essentiellement bactériennes dans les cultures, la part d'activité fongique augmente en prairie et est significativement plus élevée dans les forêts (CI, NCR). De plus, les parcelles de grandes cultures présentent un BaMI très faible (de l'ordre de 1,5) ce qui indique un milieu très enrichi (nutriments disponibles en forte concentration bien plus élevés que dans les prairies et les forêts). La valeur de cet indice (ainsi que de celle de EI) reflète la très forte fertilisation de sols cultivés en Bretagne et n'est pas une valeur usuelle pour des parcelles de grande culture (valeur plus faible que celle trouvée habituellement).

♦ Les différences sont très marquées entre sites en grande culture continue, prairies permanentes et forêts. Pour les situations de rotation prairies / cultures, la culture en place (grande culture ou prairie) conditionne essentiellement la nématofaune, mais une majorité de paramètres présente des valeurs intermédiaires (entre valeurs de culture et valeurs de prairie) reflétant la pratique de la rotation culture/prairie. L'indice de maturité (MI sans phyto) décroît entre forêts, prairies permanentes, prairies temporaires, cultures dans rotation culture / prairie et culture continue, montrant une augmentation de l'abondance des taxons opportunistes capables de se multiplier rapidement et peu sensibles aux stress et aux perturbations. L'augmentation de ces taxons se fait au détriment des taxons fragiles. De même les indices des parasites des plantes (PPI) d'enrichissement (EI) et de structure (SI) discriminent ces 5 situations.

♦ De nombreuses corrélations existent entre les paramètres fonctionnels de la nématofaune et les paramètres physico-chimique des sols sans qu'il soit facile de les interpréter. Cependant on peut signaler que les abondances de plusieurs groupes trophiques de nématodes du sol (phytoparasites, bactérivores) et de certains indices nématofauniques (EI & CI) sont positivement corrélés à des paramètres de fertilité du sol (teneurs en C, N, CEC, P assimilable, K échangeable). Les indices nématofauniques (BaMI, FuMI) sont négativement corrélées aux teneurs en métaux (Cr, Ni, Zn, Mo, Cu)

♦ Les paramètres de la nématofaune (globaux, fonctionnels et de diversité) ne présentent pas de structuration spatiale à l'échelle de la Bretagne pour la maille considérée. Trois familles présentent une auto-corrélation spatiale.

♦ Dans cette étude, les nématodes du sol sont sensibles à certaines des pratiques agricoles testées, dans les sols cultivés, l'absence de fertilisation se traduit par un indice d'enrichissement (EI) plus faible et un indice de maturité (MI sans phyto) plus élevé, traduisant une moindre disponibilité en nutriments. De plus, dans les situations sans traitement phytosanitaire la nématofaune présente une composante fongique plus importante (CI plus faible) ainsi qu'une nématofaune phytophage ayant une proportion de parasites moins importante (PPI plus faible).

♦ Très peu de relations sont trouvées entre groupes trophiques et indices nématofauniques et caractéristiques pédologiques de ces sols.

Structure taxonomique des communautés de nématodes du sol

Si l'on considère 6 niveaux d'occupations du sol (1-forêts, 2-prairies permanentes, 3-prairies de plus de 3 ans dans rotation culture prairies, 4-prairies de moins de trois ans dans rotation culture prairie, 5-culture dans rotation prairie culture, 6-Culture), la structure des communautés de nématode du sol permet de discriminer les usages du sol. Entre ces 4 niveaux d'analyse des nématodes du sol : taxons (86), familles (48), guildes fonctionnelles (17), groupes trophiques (7), le niveau de la famille apparaît présenter le meilleur rapport complexité de l'analyse (expertise nécessaire) / discrimination des situations étudiées ; en effet, il permet de mettre en évidence autant de différences entre les situations que le niveau taxon, alors que les niveaux guildes fonctionnelles et groupes trophiques induisent une perte d'information.

3.1.3 Synthèse *Nématodes phytoparasites* (Tome 5)

Diversité des nématodes phytoparasites

• 39 taxons ont été identifiés sur l'ensemble des sites RMQS *BioDiv*, dont 22 au rang du genre et 17 au rang de l'espèce.
• Ils appartiennent à trois ordres (Tylenchida, Dorylaimida et Aphelenchida).
• Ils représentent deux groupes trophiques : des phytoparasites stricts (inféodés aux plantes) et des phytoparasites généralistes (+ fongivores + bactérivores).

Densité totale de nématodes phytoparasites

• Les densités brutes de nématodes phytoparasites sont très hétérogènes et ne suivent pas une distribution normale.
• La relation « fréquence F / abondance A » des taxons sur l'ensemble des sites RMQS *BioDiv* suit une loi de distribution log-linéaire définissant une forte hiérarchie d'abondance des taxons.

• Les nématodes phytoparasites stricts représentent 64% de l'abondance moyenne en nématodes.
• L'année de prélèvement n'a pas d'incidence sur les densités totales.
• Les densités sont plus élevées dans le Nord Finistère et dans l'Ouest Ille & Vilaine qu'ailleurs.
• Il n'existe pas d'autocorrélation spatiale significative.
• Les densités totales sont corrélées avec les concentrations du sol en thallium (négatif) et en potassium (positif pour échangeable et négatif pour total).
• Les densités distinguent les systèmes cultivés et les forêts d'une part (densités faibles), des systèmes prairiaux d'autre part (densités élevées).
• 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.
• La fertilisation organique augmente la densité totale de nématodes phytoparasites.
• Toutes les autres variables explicatives ne modifient pas significativement les densités totales de nématodes phytoparasites .

Structure des communautés de nématodes phytoparasites :

• Aucune co-structure entre celle des nématodes phytoparasites et celle des variables physico-chimiques n'a été mise en évidence.
• L'occupation du sol structure les communautés de nématodes phytoparasites .
• L'introduction d'une culture dans un système prairial et inversement d'une prairie dans un système de culture ne modifient pas significativement la structure des communautés de nématodes phytoparasites « fixée » par les systèmes de base.
• Les pratiques agricoles (fertilisation, amendement et fertilisation organique, travail du sol et traitements phytosanitaires) structurent les communautés de nématodes phytoparasites seulement sur prairie.

3.1.4 Synthèse *Mésofaune* (Tome 6)

La mésofaune, essentiellement représentée dans cette étude par les collemboles et acariens du sol, a été échantillonnée sur 98 sites bretons aux printemps 2006 et 2007. Les résultats obtenus portent sur les paramètres d'abondance (mésofaune totale, acariens, collemboles, types biologiques de collemboles) de richesse, diversité et équitabilité des collemboles, ainsi que de structure des communautés de collemboles. Quatre points méritent d'être soulignés :

- La mésofaune semble plus **fortement liée aux usages des sols et pratiques agricoles** qu'aux variables d'état des sols (profils pédologiques…),
- De ce fait, la mésofaune présente une **structuration spatiale faible**,
- **Les collemboles épiédaphiques** ressortent comme un indicateur pertinent de milieux ouverts fréquemment perturbés,
- **Les acariens Oribatida** sont plus abondants dans les milieux forestiers.

Paramètres globaux de la mésofaune

- Les abondances observées en microarthropodes totaux, collemboles ou acariens apparaissent globalement conformes à la littérature sur le sujet, avec toutefois une forte hétérogénéité entre les sites étudiés.
- Parmi les collemboles, 67 espèces ont pu être identifiées : 8 espèces représentent environ 80% de l'abondance totale, et 4 espèces peuvent être considérées comme très fréquentes. Au contraire, 37 taxons apparaissent rarement.
- Les abondances de collemboles présentent des corrélations significativement négatives avec plusieurs métaux, confirmant la littérature sur le sujet. En revanche, ces abondances sont positivement corrélées à de nombreux facteurs liés à la fertilité du sol, comme la CEC ou le calcium. De même, globalement, la mésofaune apparait fortement liée à la qualité de l'humus dans les sols.
- Les paramètres globaux d'abondance et de diversité de la mésofaune du sol ne permettent pas de discriminer clairement les usages des sols ou encore les différentes pratiques agricoles. Seuls les acariens Oribatida montrent une abondance décroissante depuis les milieux forestiers jusqu'aux milieux de culture. Pour ces acariens, ce sont les usages (prairie, culture, forêt) plutôt que les

pratiques (AA, AA/M, M/AA, Mp) au moment du prélèvement qui déterminent leur abondance. Ces résultats ne permettent pas de valider la seule richesse taxonomique des collemboles (nombre d'espèces) comme bioindicateur pour le suivi de la qualité des sols.

- Les paramètres globaux d'abondance de la mésofaune ne présentent pas de structuration spatiale à l'échelle de la Bretagne, pour la maille considérée. Seule la diversité spécifique des collemboles présente une structuration spatiale significative. Dans l'état actuel des connaissances, aucune hypothèse ne peut être formulée pour expliquer cette structuration.

Paramètres fonctionnels de mésofaune

- Les collemboles épiédaphiques permettent de discriminer les différents usages des sols. Ils permettent de définir un gradient de stabilité du milieu, depuis les zones ouvertes fréquemment perturbées (cultures céréalières intensives) où ils sont très abondants, jusqu'aux milieux fermés très stables (forêts) avec de faibles abondances, en passant par les milieux prairiaux.
- En effet, grâce à des traits de vie permettant une locomotion rapide, ils sont capables de recoloniser rapidement les milieux perturbés.
- Les espèces épiédaphiques présentent également l'intérêt d'être représentées par des individus de grande taille, pour la plupart visibles à l'oeil nu, et reconnaissables, même par des non spécialistes, sous une simple loupe binoculaire.
- Les paramètres fonctionnels de la mésofaune ne présentent pas de structuration spatiale à l'échelle de la Bretagne.

Structure taxonomique des communautés de la mésofaune

- La structure des communautés de la mésofaune permet de discriminer les usages des sols. Ces résultats confirment que la composition taxonomique est un indicateur plus pertinent que la seule richesse en espèces. Toutefois, les résultats n'apportent pas ou peu d'informations supplémentaires quant à l'usage des sols, des pratiques agricoles ou encore des caractéristiques pédologiques de ces sols, par rapport aux paramètres d'abondance des groupes fonctionnels.

3.1.5 Synthèse *Lombriciens* (Tome 7)

Caractérisation globale

Les sols des sites RMQS *BioDiv* Bretagne présentent, en moyenne, des abondances lombriciennes de 260 ind/m² et des biomasses de 91 g/m². Les abondances s'échelonnent de 3 à 1332 ind/m² et les biomasses de 1 à 438 g/m². Abondance et biomasse disricriminent les trois systèmes d'occupation du sol avec des valeurs élevées en prairies (350 ind/m² ; 138 g/m²), moyennes en cultures (215 ind/m² ; 63 g/m²) et faibles en forêts (50 ind/m² ; 8 g/m²). Dans le cadre de ce programme, l'influence des variables de pratiques agricoles et pédologiques n'a pas pu être mise en évidence sur l'abondance lombricienne. En revanche, la biomasse lombricienne, fortement influencée par la biomasse des anéciques, varie significativement en fonction du travail du sol : elle est plus élevée lorsque le travail du sol est absent ou simplifié (TCL) vis-à-vis d'un sol soumis à un labour supérieur à 25 cm.
Par ailleurs, des corrélations significatives sont retrouvées entre biomasse et le molydbène total.

Une réflexion a été menée pour répondre aux besoins de définitions de « baselines[4] » et « thresholds[5] » (valeurs de références et valeurs seuils). Fruit de cette réflexion, une première **proposition « à dire d'expert »** pouvant contribuer à définir des baselines est illustrée pour le paramètre d'abondance lombricienne (Figure 6).

[4] **Baseline** : valeur, ou gamme de valeurs, indiquant un état biologique des sols qui permet un fonctionnement durable des sols (bon état biologique pour un certain usage, pas de dégradation du sol, ou niveau de perte acceptable).

[5] **Threshold (seuil)** : valeur indiquant un niveau critique de l'état biologique des sols, qui limite ou menace la durabilité du fonctionnement du sol (dégradation des sols, pollution par métaux lourds, faible production agricole ou faible remédiation).

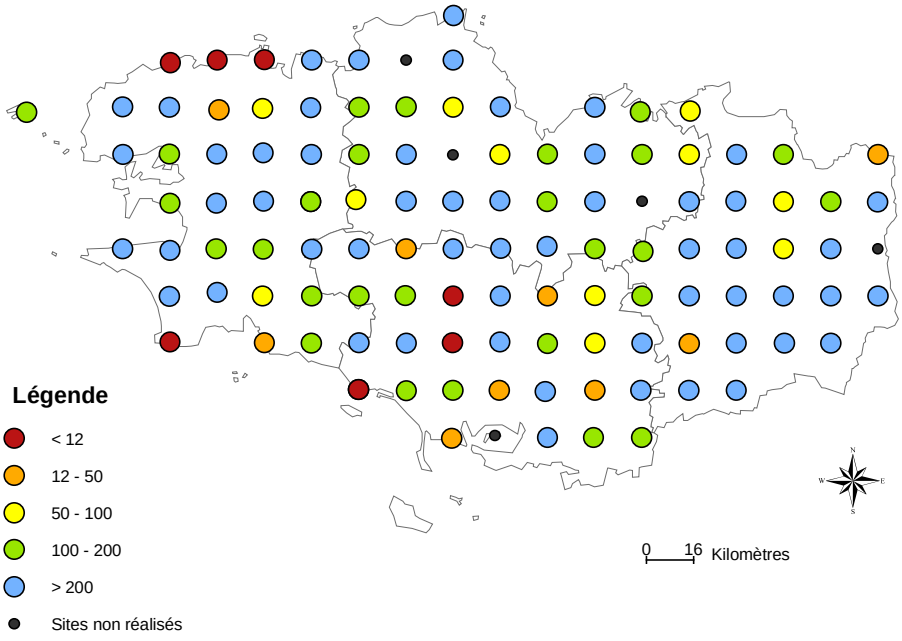


Figure 6 : Proposition de classes d'abondance lombricienne pouvant servir de références

Données FTM

Caractérisation fonctionnelle

L'information par catégories écologiques permet d'appréhender une structure fonctionnelle des peuplements. Les endogés dominent les peuplements (67%), les anéciques représentent 18% et les épigés 11%.

➢ Les **épigés** semblent constituer la catégorie écologique la plus sensible vis-à-vis des conditions au moment du prélèvement. En effet, une variabilité inter annuelle et une corrélation avec l'humidité des échantillons RMQS *BioDiv* sont trouvées pour l'abondance des épigés. L'abondance des épigés est également significativement plus faible en systèmes cultivés (18 ind/m²) par rapport aux systèmes prairiaux (43 ind/m²) et forestiers (24 ind/m²). En forêt, les épigés représentent la moitié des peuplements lombriciens. Leurs abondances sont, de plus, significativement plus faible en présence de traitements phytosanitaires. Notons que les épigés sont corrélés avec le molybdène total.

- Les **anéciques** apparaissent particulièrement sensibles à l'occupation des sols et aux pratiques agricoles. Abondance et biomasse des anéciques discriminent significativement les trois systèmes avec des valeurs plus importantes sous prairie (72 ind/m²), intermédiaires sous culture (30 ind/m²) et faibles en forêt (2 ind/m²). Pour les pratiques agricoles, les anéciques présentent des résultats significatifs avec les variables « travail du sol », « amendement et fertilisation organique », et « présence de traitements phytosanitaires ». L'abondance et la biomasse des anéciques sont significativement plus faibles lorsque le labour est profond (supérieur à 25 cm) par rapport à un travail du sol absent ou simplifié. La biomasse des anéciques est plus élevée lorsque l'amendement et la fertilisation organique sont de type lisier (« non-pailleux ») et plus faible lorsqu'ils sont de type fumier (pailleux). La biomasse des anéciques, contrairement à leur abondance, est significativement inférieure en présence de traitements phytosanitaires.

- Les **endogés** ne présentent pas de relations significatives avec les variables de pratiques agricoles et pédologiques. L'abondance des endogés est élevée sous cultures (160 ind/m²) et sous prairies (219 ind/m²) mais significativement plus faible sous forêts (22 ind/m²).

Caractérisation taxonomique

- L'échantillonnage RMQS *BioDiv* a permis l'identification, au niveau infra-spécifique, de 29 taxons lombriciens (correspondant à 23 espèces). Ce programme a permis de recenser trois nouvelles espèces en Bretagne.
- Quelques taxons présentent une structure agrégée. Il s'agit d'*Allolobophora icterica* **(AI),** *Lumbricus terrestris* **(LT),** *Lumbricus rubellus castanoïdes* **(LRC),** *Nicodrilus nocturnus* **(NN),** *Nicodrilus giardi* **(NG).**

Paramètres de biodiversité

Sur les sites RMQS *BioDiv*, en moyenne 8 taxons sont présents. Le nombre minimum de taxons observé sur un même site est de 1 et le nombre maximum de 13. La ***richesse taxonomique*** discrimine significativement les sites prairiaux, avec des

richesses plus importantes (9,6 taxons en moyenne), des sites cultivés et forestiers qui présentent des richesses moindres, respectivement 7,4 et 5. La richesse taxonomique varie significativement en fonction de variables de pratiques agricoles (fertilisation et traitements phytosanitaires). En effet, elle est plus faible lors d'apport de fumier (7,3), intermédiaire lors d'apport de lisier (8,8) et plus élevée (9) lorsqu'il n'y a pas d'apport (concerne principalement des surfaces toujours en herbe). La richesse taxonomique est également significativement plus élevée en absence de traitements phytosanitaires (9,5) qu'en leur présence (8). L'***indice de diversité*** de Shannon est en moyenne de 1,98 ± 0,6 avec des valeurs variant de 0 à 3,32. L'indice de diversité présente des résultats similaires à la richesse taxonomique vis-à-vis des variables explicatives. Les peuplements présentent une ***équitabilité*** assez élevée avec une moyenne de 0,7. L'équitabilité lombricienne est significativement influencée par les variables de pratiques agricoles : « amendement et fertilisation organique » et « traitements phytosanitaires ».

Structure des communautés lombriciennes

Les communautés lombriciennes présentent une structuration spatiale liée principalement à la répartition de *Lumbricus terrestris,* qui sont présents quasi exclusivement sur la moitié nord de la Bretagne. Cette structuration peut être mise en lien avec des paramètres physico-chimiques tels que le thallium et le phosphore total qui présentent une structuration spatiale avec des valeurs plus élevées dans le quart sud-ouest de la Bretagne. Le lien entre ce taxon et ces deux paramètres physico-chimiques est également confirme par analyse de co-inertie.

La structure des communautés lombriciennes permet de discriminer les usages des sols mais aussi certaines pratiques agricoles (traitements phytosanitaires). Les résultats obtenus ici sont uniquement descriptifs et univariés. De futurs traitements de données explicatifs sont envisagés. Ces derniers prendront en considération l'implication multifactorielle des variables explicatives dans la structuration de l'assemblage des communautés.

* * *

De manière générale, les valeurs obtenues dans le cadre du programme RMQS *BioDiv* sont en accord avec la littérature en contexte agricole breton (Cluzeau, 1992 ; Binet, 1993 ; Cannavacciuolo, 1998 ; Pérès, 2003 ; Piron, 2008) et la complètent judicieusement.

Comme le démontrent certains de ces auteurs, l'**occupation du sol** joue un rôle prépondérant sur le peuplement lombricien : les systèmes prairiaux, comparés aux systèmes cultivés, offrent des conditions plus favorables au développement lombricien (abondance, biomasse et diversité). Certaines pratiques agricoles influencent des composantes de peuplements lombriciens, par exemple le travail du sol sur les abondances et biomasses des anéciques. A contrario, les caractéristiques pédologiques sont peu structurantes pour les peuplements lombriciens. Les paramètres lombriciens (globaux, fonctionnels et de diversité) ne présentent pas de structuration spatiale à l'échelle de la Bretagne.

3.1.6 Synthèse *Humus Index* (Tome 9)

L'Humus Index est un paramètre assez synthétique, l'Humus Index de surface semblant plus approprié que l'Humus Index moyen (calculé sur l'ensemble des niveaux prospectés pour la mésofaune) pour comparer les sites entre eux. Cependant le faible nombre de valeurs qu'il peut prendre en milieu agricole (absence de structuration par la faune, structuration par les enchytréides, structuration par les vers de terre) le rend difficilement utilisable d'un point de vue statistique, limitant ainsi les analyses possibles, notamment géostatistiques.

Cet indice n'est pas affecté par la variabilité inter-annuelle, ce qui témoigne de sa robustesse par rapport aux changements climatiques sur le court terme, ce qui est à relier à son caractère synthétique.

On observe une structuration spatiale à faible distance, qui peut s'expliquer par le lien observé avec les paramètres décrivant les propriétés physico-chimiques des sols, notamment la granulométrie et l'hydromorphie. Cependant, l'absence de lien avec le système d'occupation des sols et les pratiques agricoles, jointe à la sensibilité de l'Humus Index vis-à-vis de la granulométrie, indique que son utilisation en milieu agricole devrait être restreinte à des substrats de même nature texturale. Il s'avère donc peu satisfaisant à l'échelle régionale.

3.2 Référentiels des paramètres biologiques

Le programme RMQS *BioDiv* en échantillonnant un grand nombre de points associés à des contextes agro-pédo-climatiques diversifiés, permet d'établir un premier référentiel de valeurs d'un grand nombre de groupes biologiques et ce au niveau global, fonctionnel ou taxonomique.
Cette partie de l'étude a pour but de synthétiser ces valeurs de références obtenues à l'échelle régionale. Les valeurs de références retrouvées sur les sites RMQS *BioDiv* Bretagne pour les paramètres biologiques étudiés sont présentées sous forme de planches graphiques.

Trois planches graphiques sont proposées :

- *Planche A* : référentiels des paramètres globaux,
- *Planche B* : référentiels des paramètres fonctionnels,
- *Planche C* : référentiels des paramètres de biodiversité.

Les boîtes à moustaches[6] et cartes[7] permettent d'illustrer la variabilité numérique et spatiale des valeurs référentielles observées. Des boîtes à moustaches et un diagramme étoile sont également utilisées dans certains cas pour représenter les valeurs en fonction de l'occupation du sol (culture, prairie, foret).

[6] + : la moyenne ; barre du milieu : la médiane ; ° et * : les valeurs extrêmes ; ● : valeur minimale et maximale

[7] La taille du cercle est proportionnelle au paramètre (abondance, densité, biomasse, …) observé sur le site

3.2.1 Référentiels des paramètres globaux

a) **Biomasse bactérienne** exprimée en nombre de copie d'ADNr 16S par nanogramme d'ADN du sol (N = 109)

b) **Biomasse microbienne** (MOV) exprimée en milligramme de carbone par kilogramme de sol (N = 109)

c) **Abondance (ou densité) de nématofaune du sol** exprimée en nombre d'individus par gramme de sol sec (N = 109)

d) **Abondance (ou densité) de nématodes phytoparasites** exprimée en nombre d'individus par gramme de sol sec (N = 109)

e) **Abondance de collemboles** exprimée en nombre d'individus par mètre carré sur l'horizon 0-5 cm (N = 98)

f) **Abondance d'acariens** exprimée en nombre d'individus par mètre carré sur l'horizon 0-5 cm (N = 98)

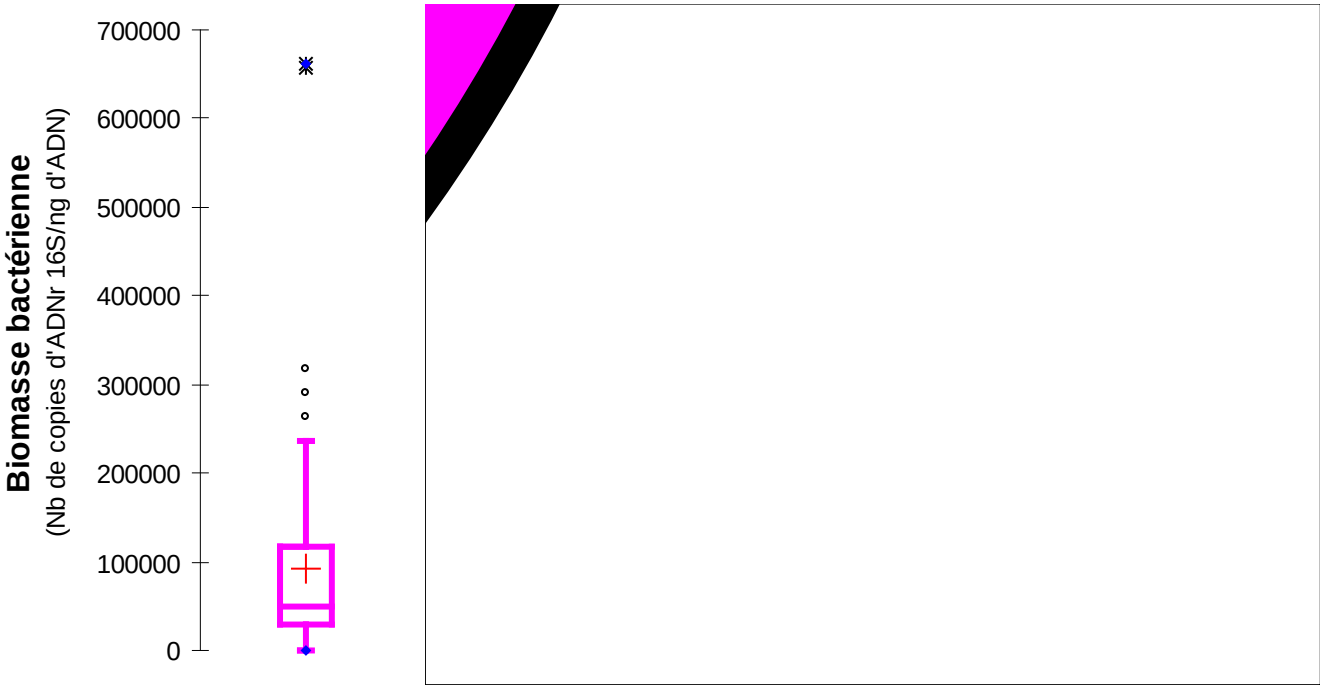
g) **Abondance lombricienne** exprimée en nombre d'individus par mètre carré sur les données formol avec la correction du tri manuel (N = 109)

h) **Abondance de la macrofaune totale** exprimée en nombre d'individus par mètre carré (N = 101)

Planche A : REFERENTIELS des PARAMETRES GLOBAUX

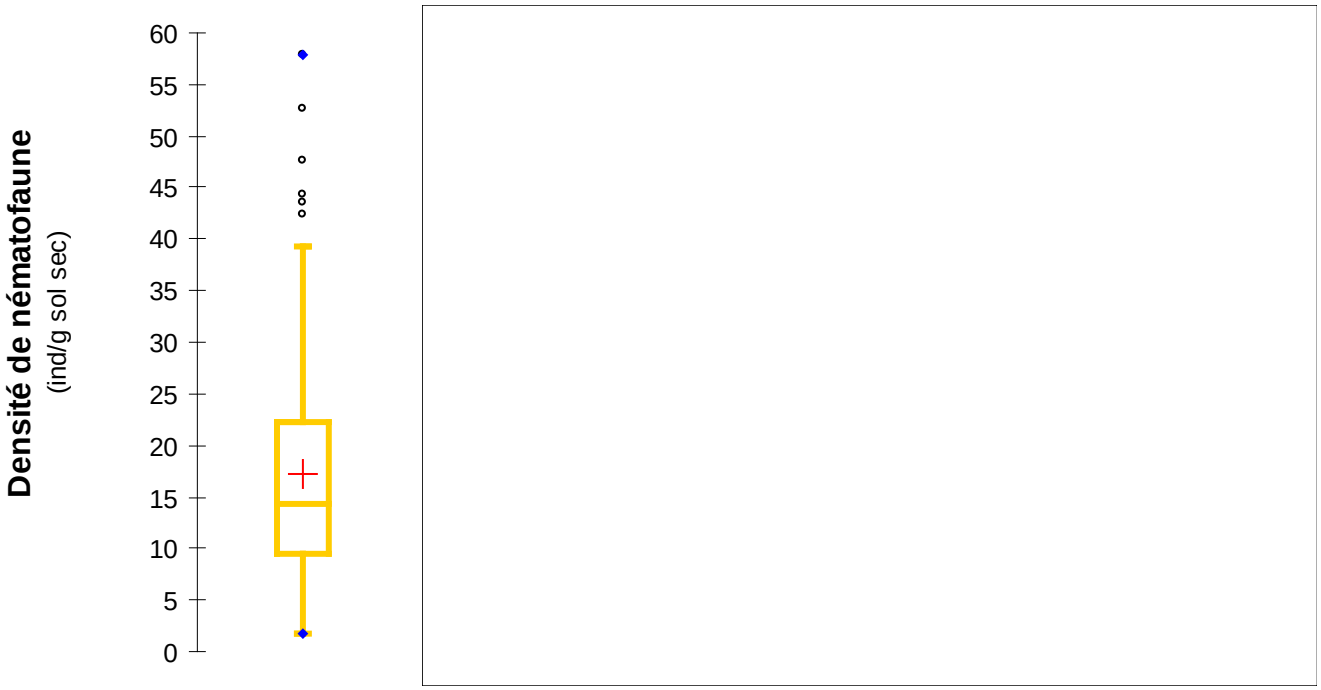
A.1 Paramètres biologiques globaux sur l'ensemble des sites

a)



b)

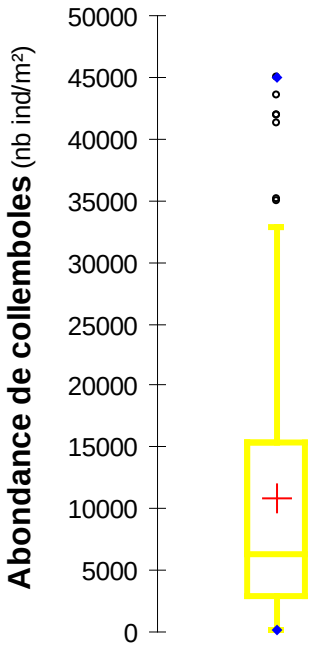
c)


Densité de nématofaune
(ind/g sol sec)
60
55
50
45
40
35
30
25
20
15
10
5
0

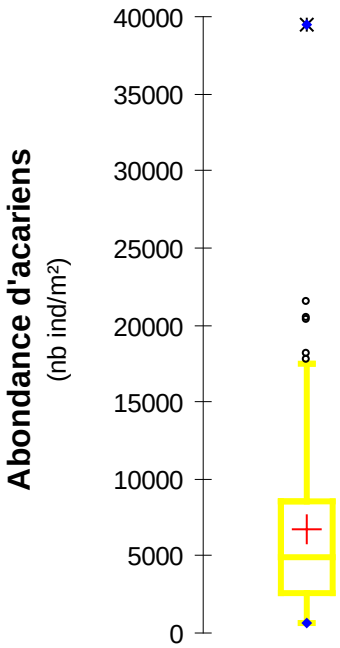
d)

Densité de nématodes phytoparasites
(ind/g sol sec)
50
45
40
35
30
25
20
15
10
5
0

e)


Abondance de collemboles (nb ind/m²)
50000
45000
40000
35000
30000
25000
20000
15000
10000
5000
0

f)


Abondance d'acariens
(nb ind/m²)
40000
35000
30000
25000
20000
15000
10000
5000
0

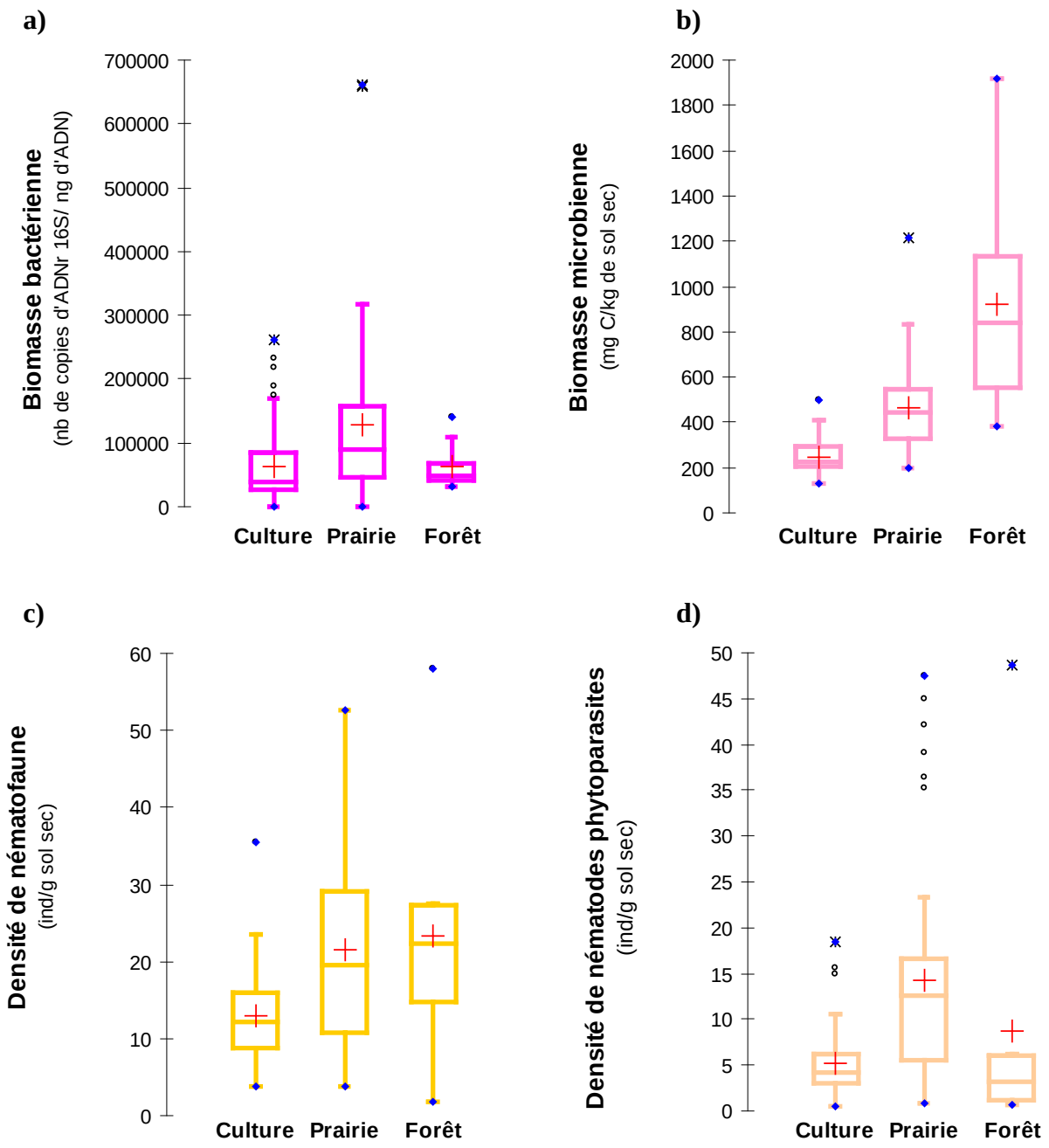
g)

Abondance lombricienne
(ind/m²)
1400
1200
1000
800
600
400
200
0

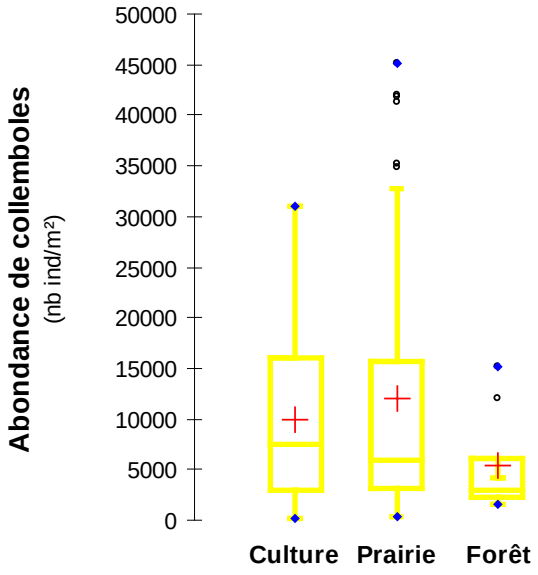
h)

Macrofaune totale
(ind/m²)
3500
3000
2500
2000
1500
1000
500
0

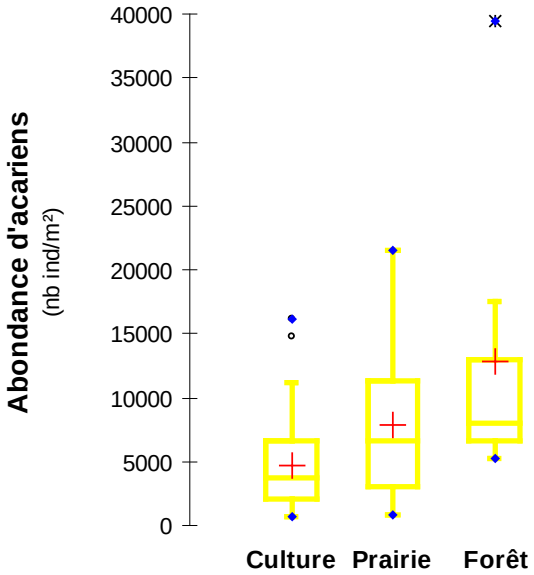
A.2 Paramètres biologiques globaux par système d'occupation des sols



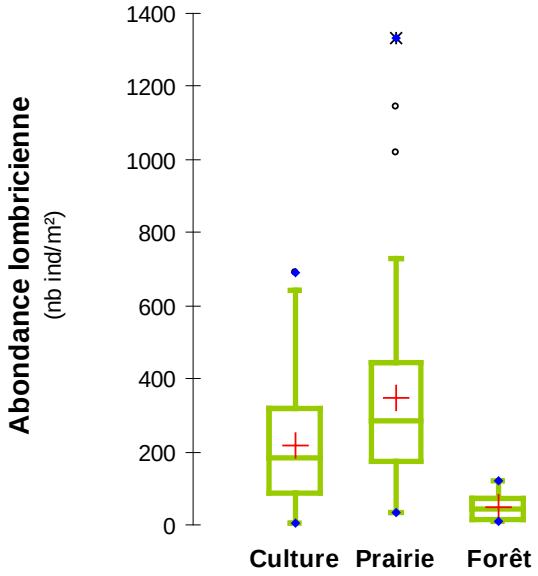
e)


Abondance de collemboles
(nb ind/m²)
50000
45000
40000
35000
30000
25000
20000
15000
10000
5000
0
Culture
Prairie
Forêt

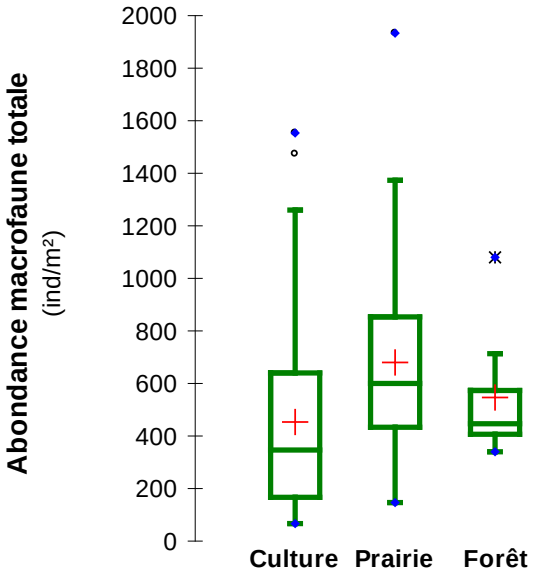
f)


Abondance d'acariens
(nb ind/m²)
40000
35000
30000
25000
20000
15000
10000
5000
0
Culture
Prairie
Forêt

g)


Abondance lombricienne
(nb ind/m²)
1400
1200
1000
800
600
400
200
0
Culture
Prairie
Forêt

h)


Abondance macrofaune totale
(ind/m²)
2000
1800
1600
1400
1200
1000
800
600
400
200
0
Culture
Prairie
Forêt

Les boîtes à moustaches permettent d'appréhender e représenter la variabilité des valeurs réelles observées sur les sites RMQS *BioDiv* en fonction de l'occupation des sols et ce pour chaque groupe biologique pris de manière isolée. Pour intégrer l'ensemble des groupes biologiques et illustrer leur structure globale permettre une comparaison des paramètres globaux en fonction de l'occupation du sol, une autre représentation graphique est utilisée, à savoir : le diagramme étoile (Figure 7).

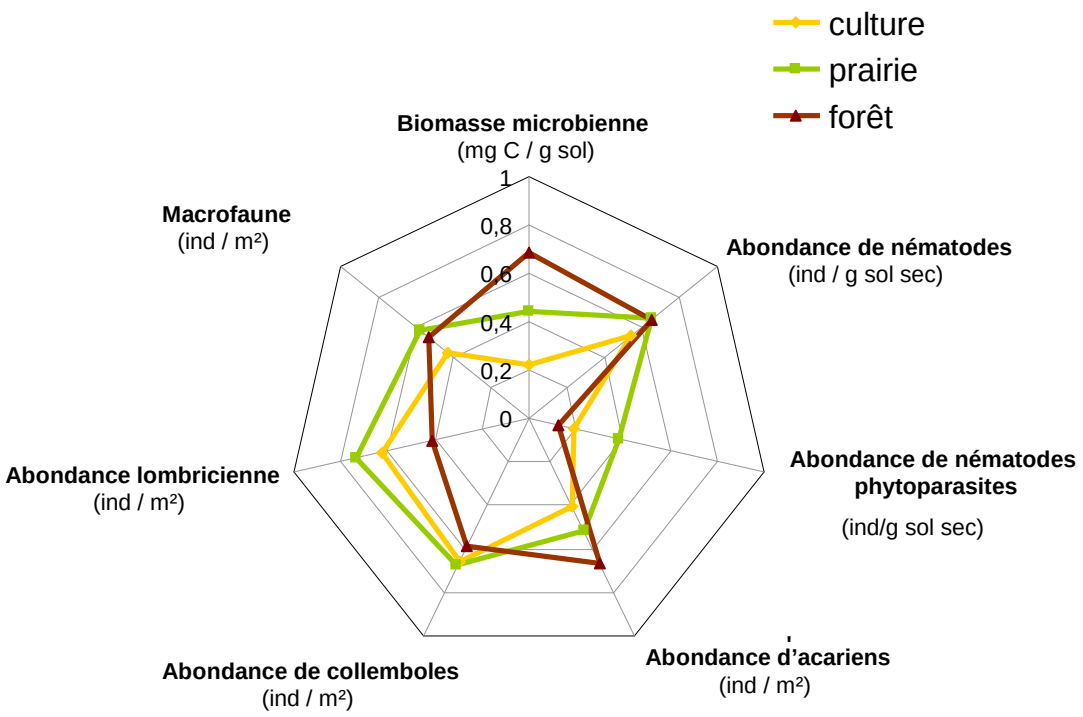


Figure 7 : Diagramme étoile comparant les valeurs des paramètres biologiques globaux en fonction de l'occupation des sols

A l'analyse de ce diagramme étoile, il apparaît que les abondances de nématodes, de collemboles et de macrofaune différent très peu quel que soit le type d'occupation des sols. A l'inverse, les valeurs de biomasse microbienne ou les abondances des nématodes phytoparasitaires, d'acariens ou de lombriciens sont caractéristiques des 3 occupations de sols étudiés. Ainsi, **i) la forêt** est caractérisée par la biomasse microbienne et l'abondance d'acariens les plus élevées, alors que les abondances lombriciennes y sont les plus faibles ; **ii) la prairie** présente les abondances lombriciennes et de nématodes phytoparasites les plus élevées ; enfin **iii) la culture** est caractérisée par les biomasses microbiennes les plus faibles (Figure 7).

3.2.2 Référentiels des paramètres « fonctionnels »

Seule l'information globale est illustrée dans cette planche graphique. L'information plus détaillée concernant l'occupation du sol, est présentée dans les points 3.1.2 des différents tomes.

a) **Gène narG et pcaH** exprimée en nombre de copie par nanogramme d'ADN du sol (N = 109)

b) **Abondance (ou densité) des groupes trophiques de nématofaune du sol** exprimée en nombre d'individus par gramme de sol sec (N = 109)

c) **Indices nématologiques** (N = 109). La représentation cartographique des indices nématologiques est réalisée en utilisant les quartiles.

d) **Abondance des types biologiques de collemboles** exprimée en nombre d'individus par mètre carré sur l'horizon 0-5 cm (N = 98)

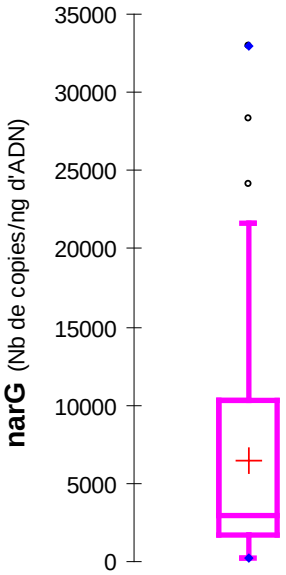
e) **Abondance des sous-ordres d'acariens** exprimée en nombre d'individus par mètre carré sur l'horizon 0-5 cm (N = 98)

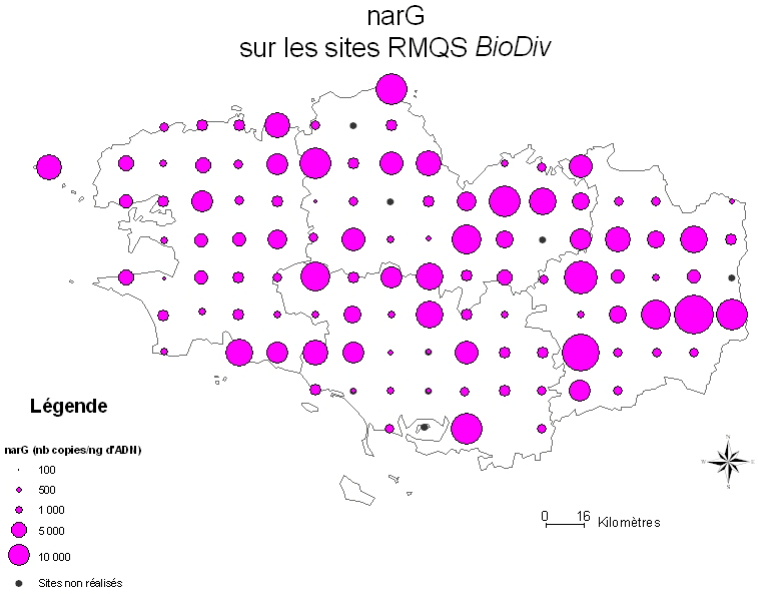
f) **Abondance des catégories écologiques lombriciennes** exprimée en nombre d'individus par mètre carré sur les données formol avec la correction du tri manuel (N = 109)

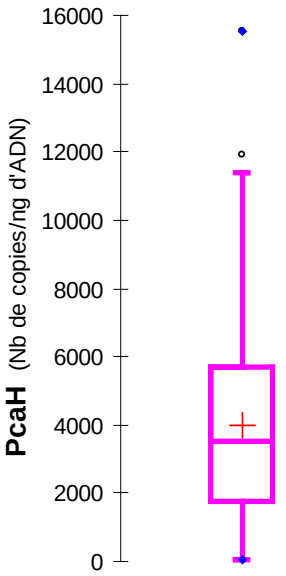
g) **Humus Index moyen et de surface** (N = 99)

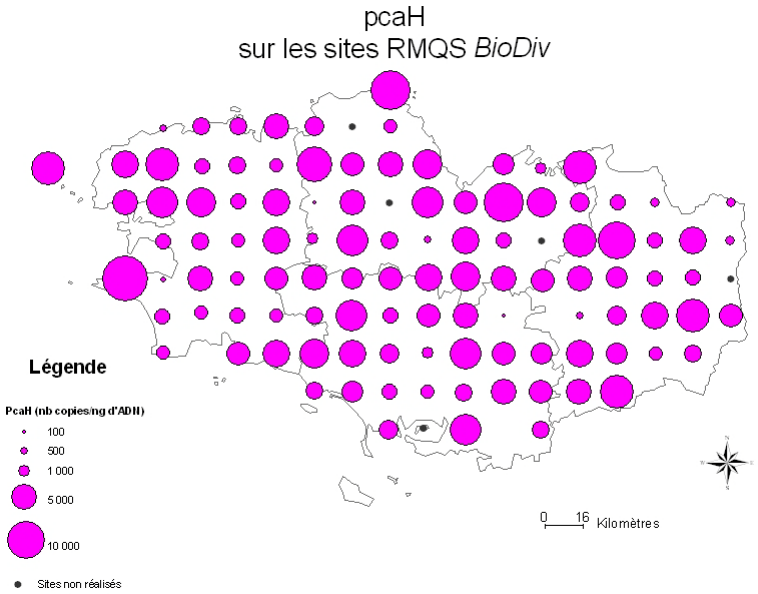
Planche B : REFERENTIELS des PARAMETRES « FONCTIONNELS »

a) Quantité des gènes narG et PcaH

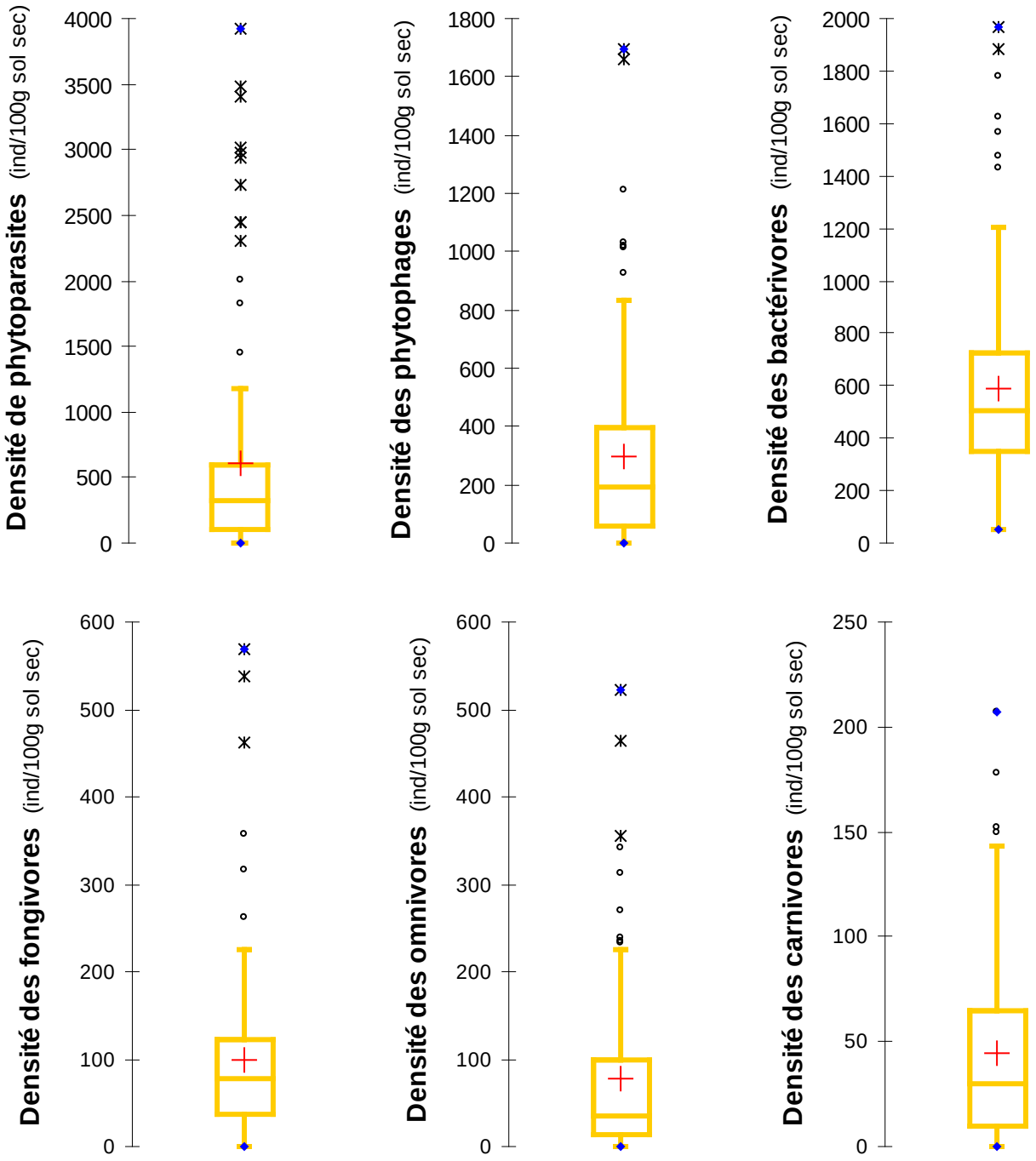








b) Abondance (ou densité) des groupes trophiques de nématofaune du sol

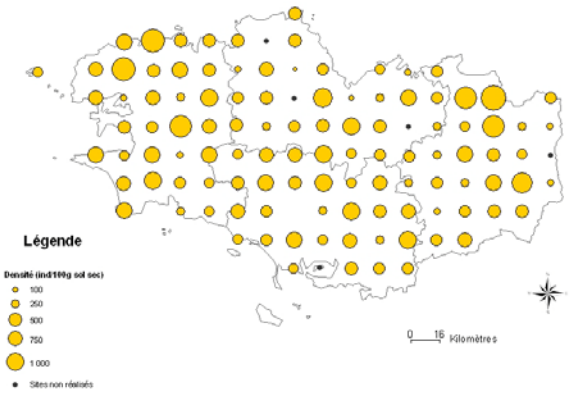


L'information plus détaillée, notamment par occupation du sol, est présentée dans le point 3.1.2 du Tome 4

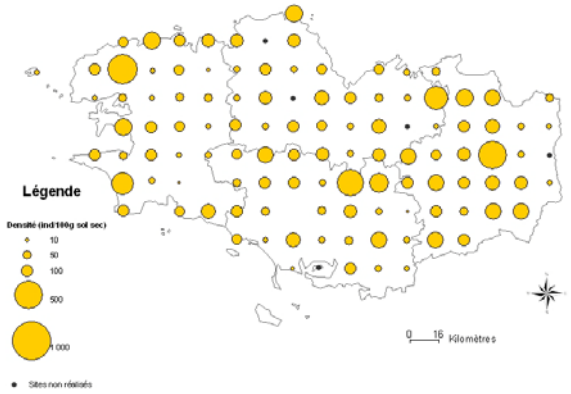
Densité de nématodes phytoparasites
sur les sites RMQS *BioDiv*

Densité de nématodes phytophages
sur les sites RMQS *BioDiv*

Densité de nématodes bactérivores
sur les sites RMQS *BioDiv*



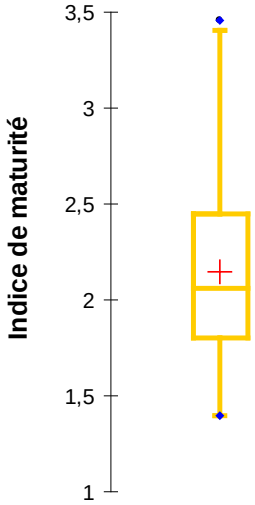
Densité de nématodes fongivores
sur les sites RMQS *BioDiv*

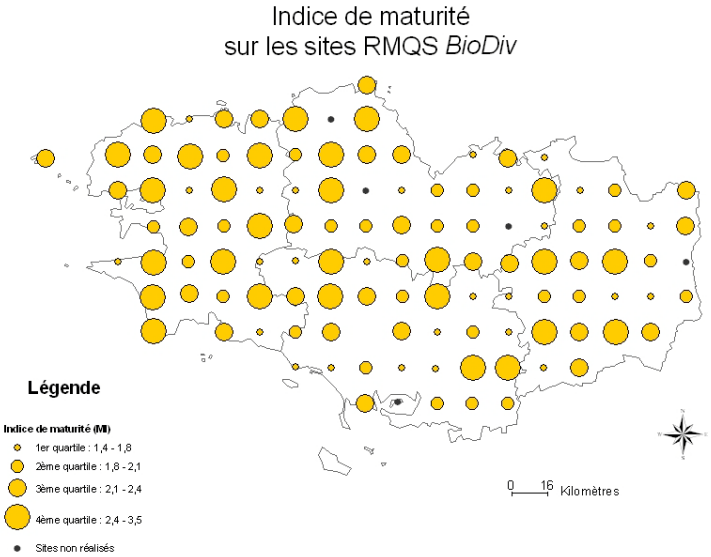


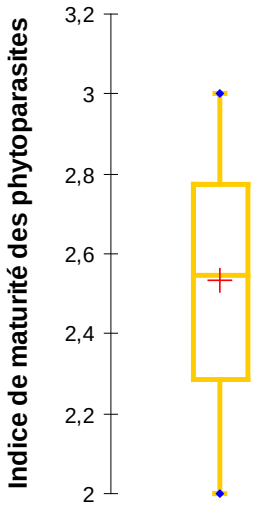
Densité de nématodes omnivores
sur les sites RMQS *BioDiv*

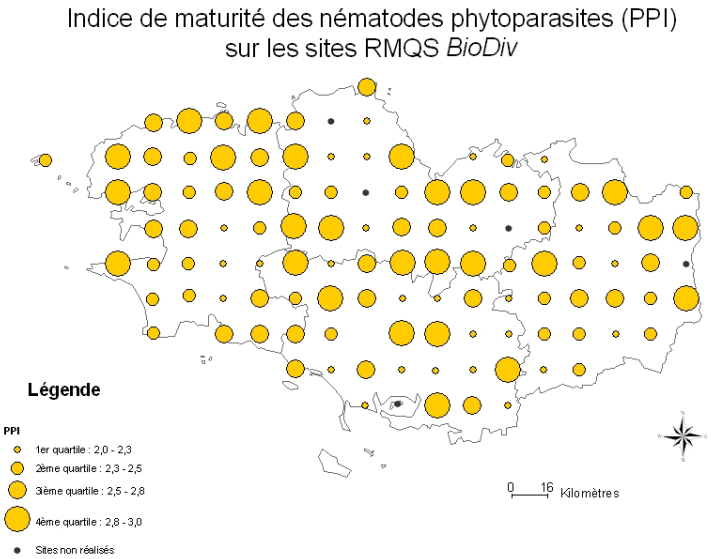
Densité de nématodes carnivores
sur les sites RMQS *BioDiv*

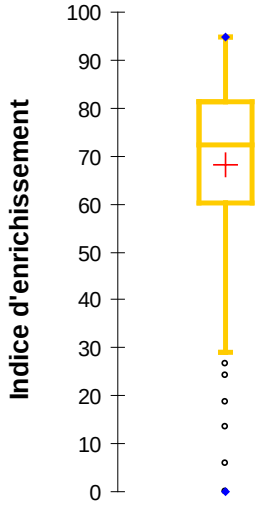
c) Indices nématologiques

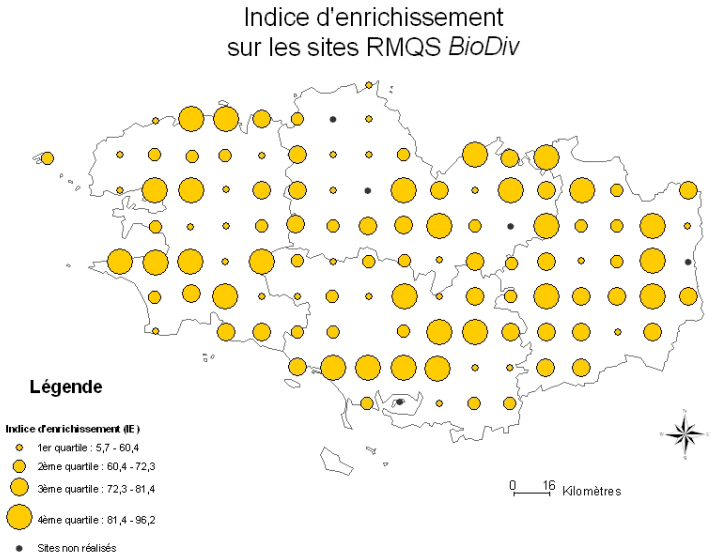


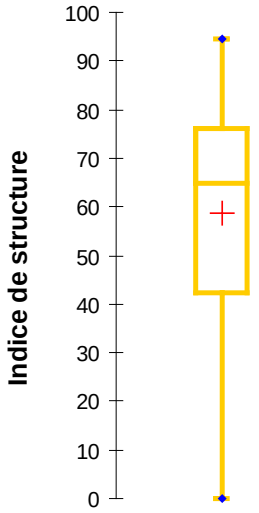


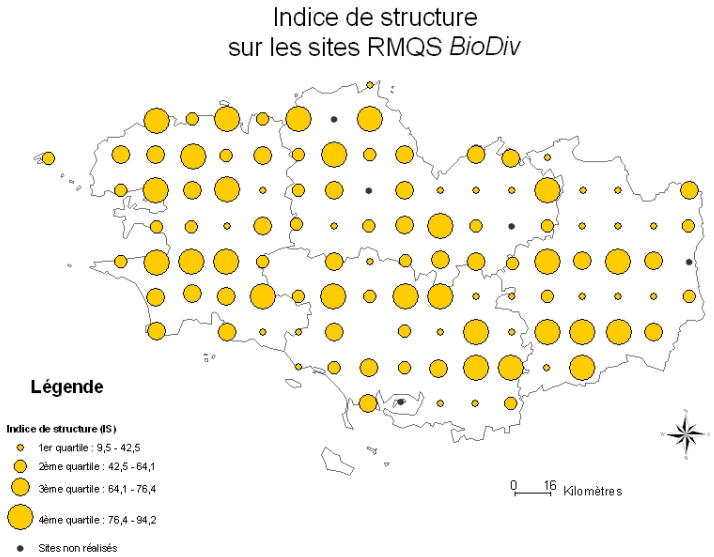


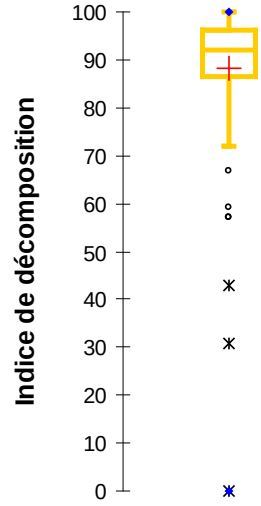


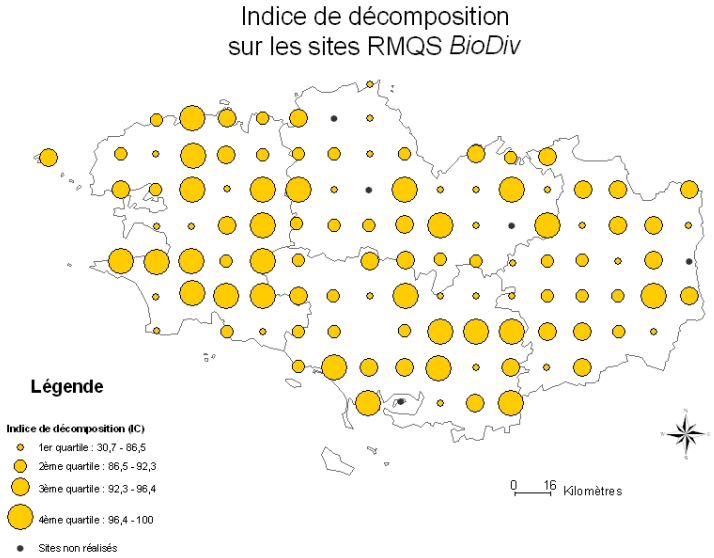

Indice d'enrichissement
100
90
80
70
60
50
40
30
20
10
0


Indice d'enrichissement
sur les sites RMQS *BioDiv*
Légende
Indice d'enrichissement (IE)
1er quartile : 5,7 - 60,4
2ème quartile : 60,4 - 72,3
3ème quartile : 72,3 - 81,4
4ème quartile : 81,4 - 96,2
Sites non réalisés
0 16 Kilomètres

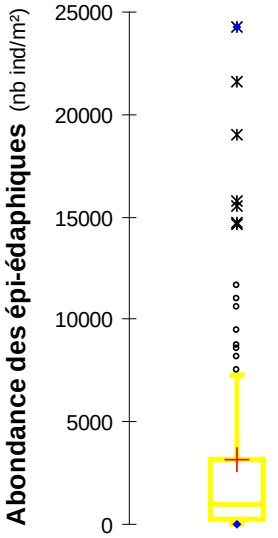

Indice de structure
100
90
80
70
60
50
40
30
20
10
0

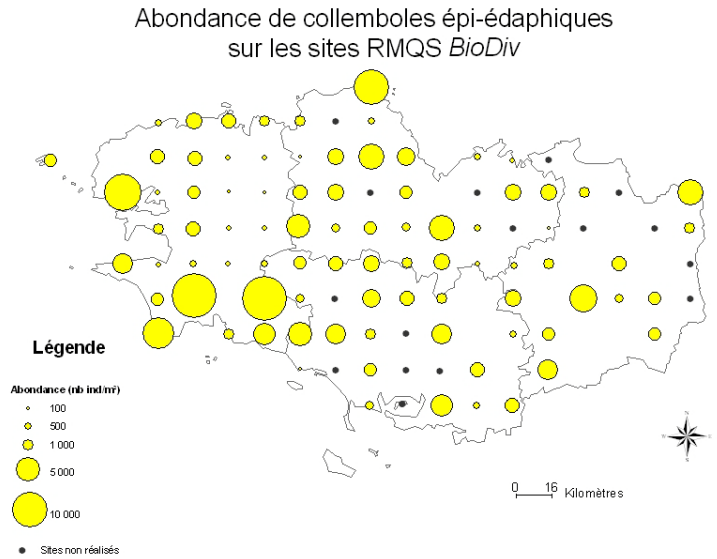

Indice de structure
sur les sites RMQS *BioDiv*
Légende
Indice de structure (IS)
1er quartile : 9,5 - 42,5
2ème quartile : 42,5 - 64,1
3ème quartile : 64,1 - 76,4
4ème quartile : 76,4 - 94,2
Sites non réalisés
0 16 Kilomètres

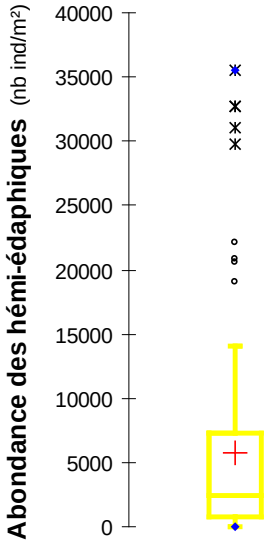

Indice de décomposition
100
90
80
70
60
50
40
30
20
10
0

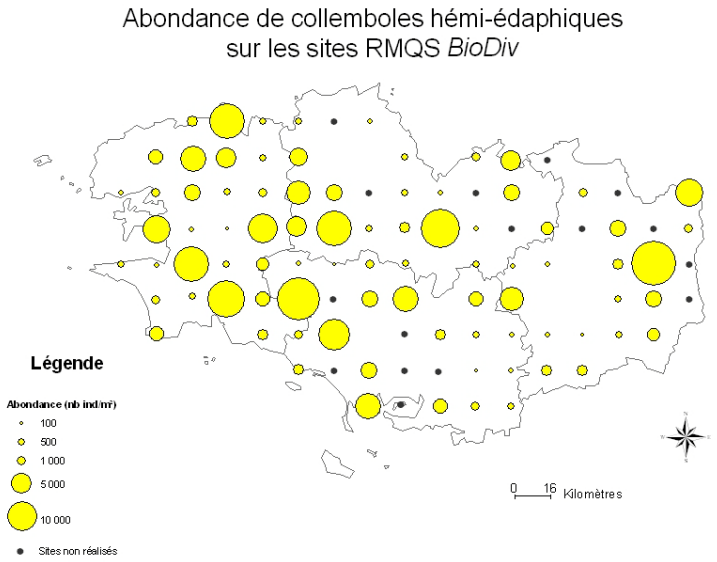

Indice de décomposition
sur les sites RMQS *BioDiv*
Légende
Indice de décomposition (IC)
1er quartile : 30,7 - 86,5
2ème quartile : 86,5 - 92,3
3ème quartile : 92,3 - 96,4
4ème quartile : 96,4 - 100
Sites non réalisés
0 16 Kilomètres

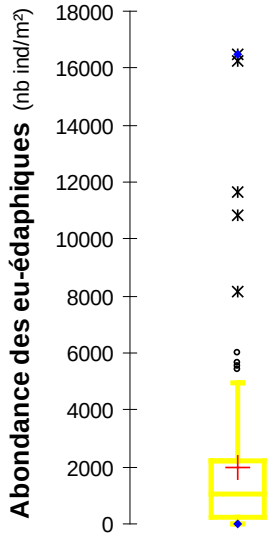
d) Abondance des types biologiques de collemboles

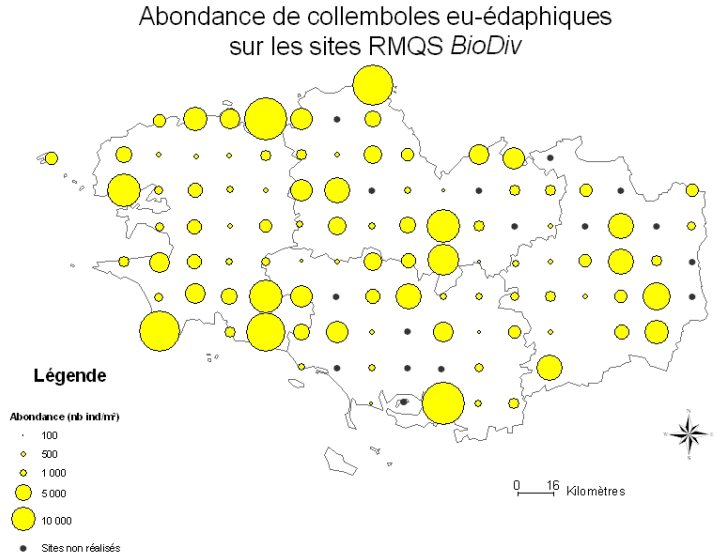




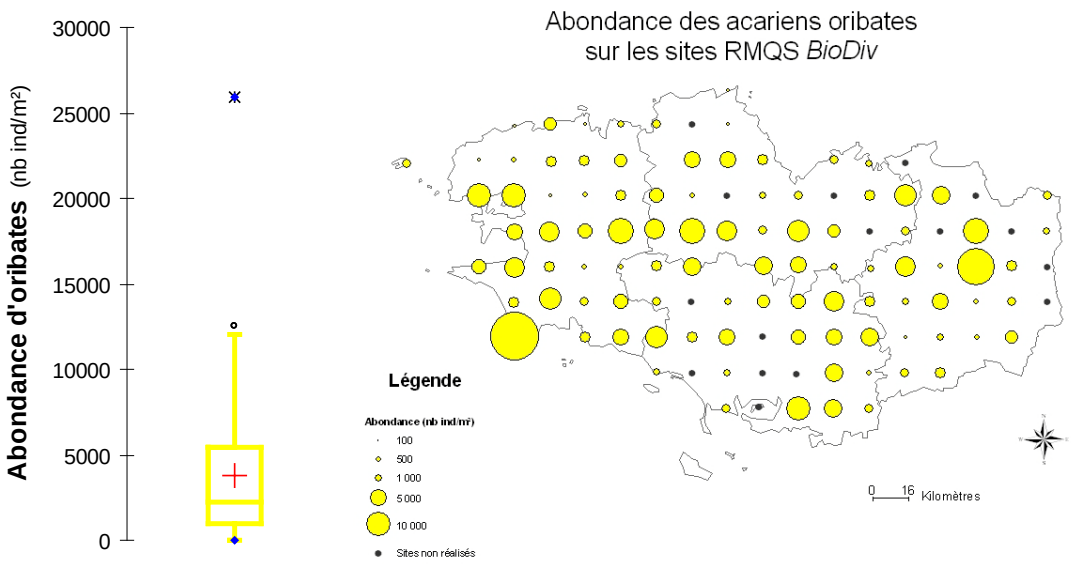


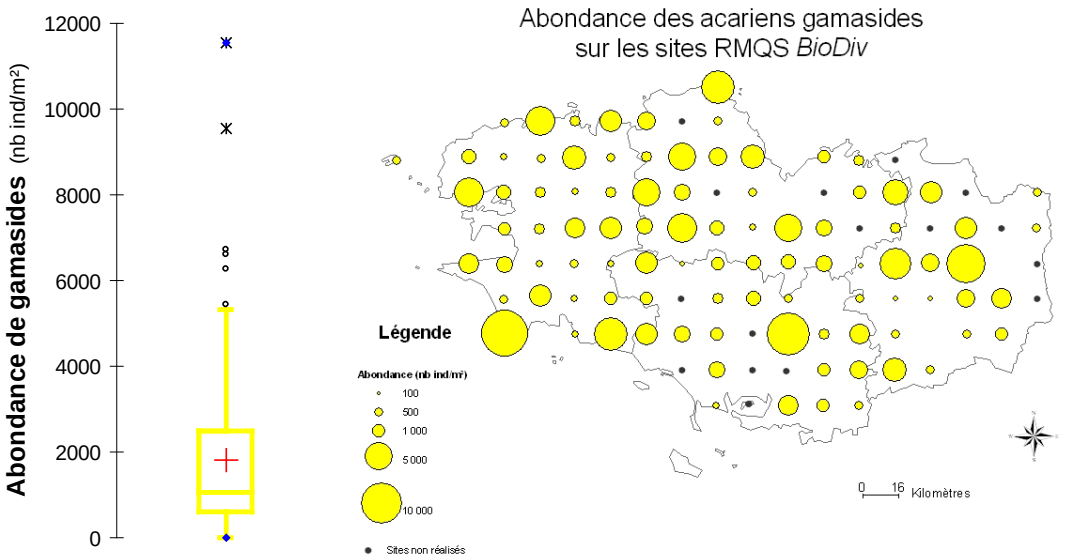


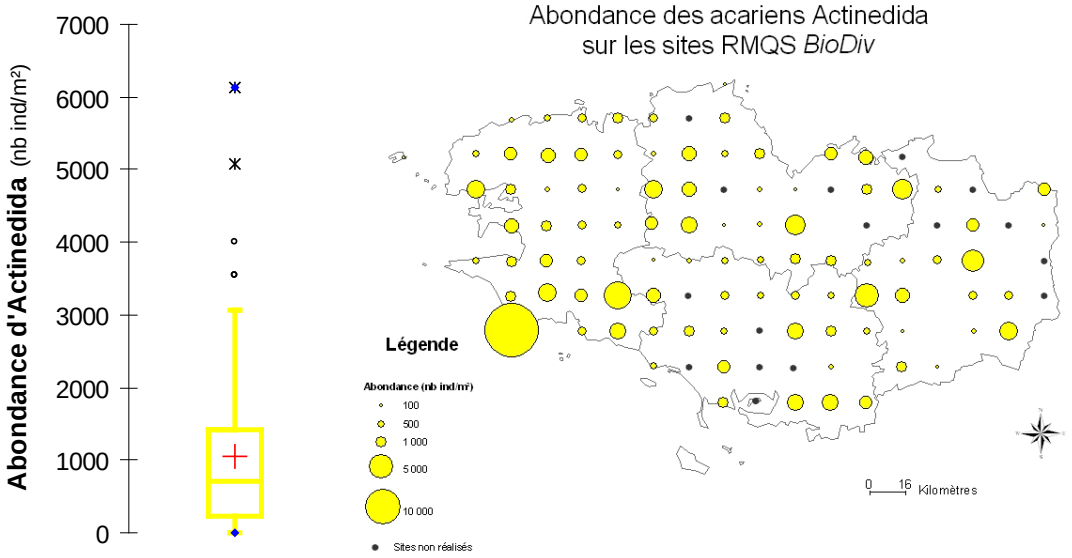




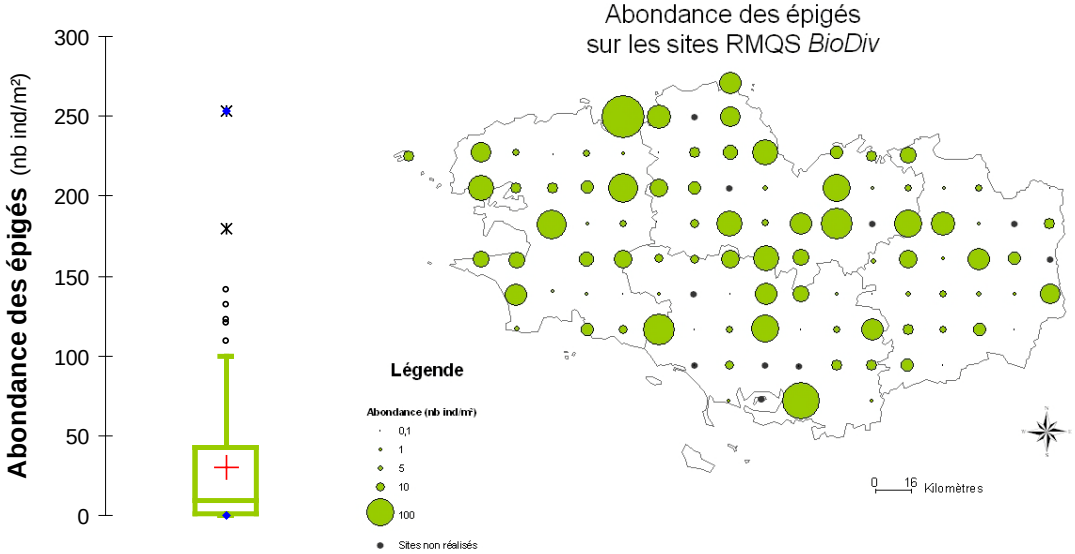
e) Abondance des sous-ordres d'acariens

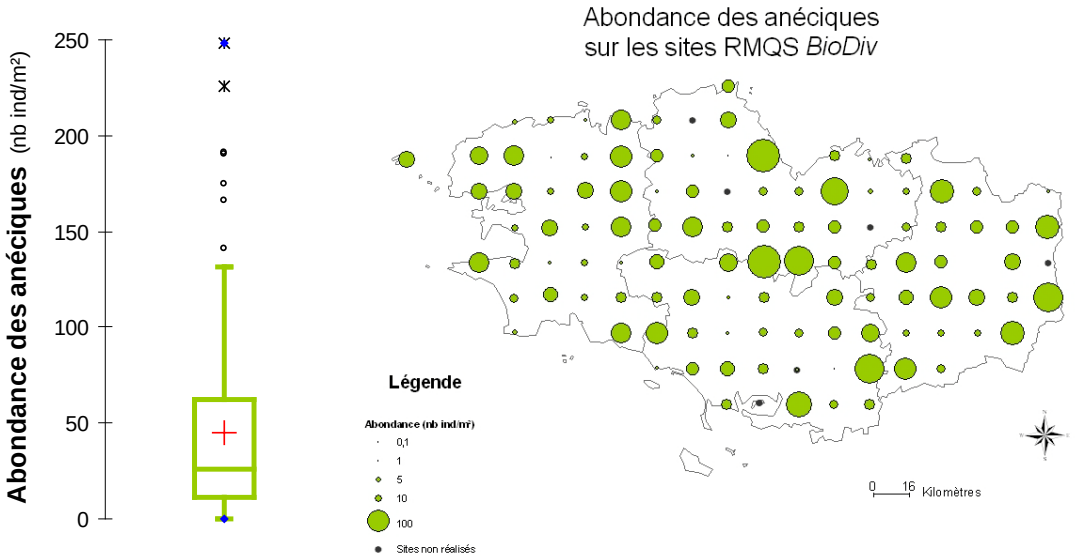


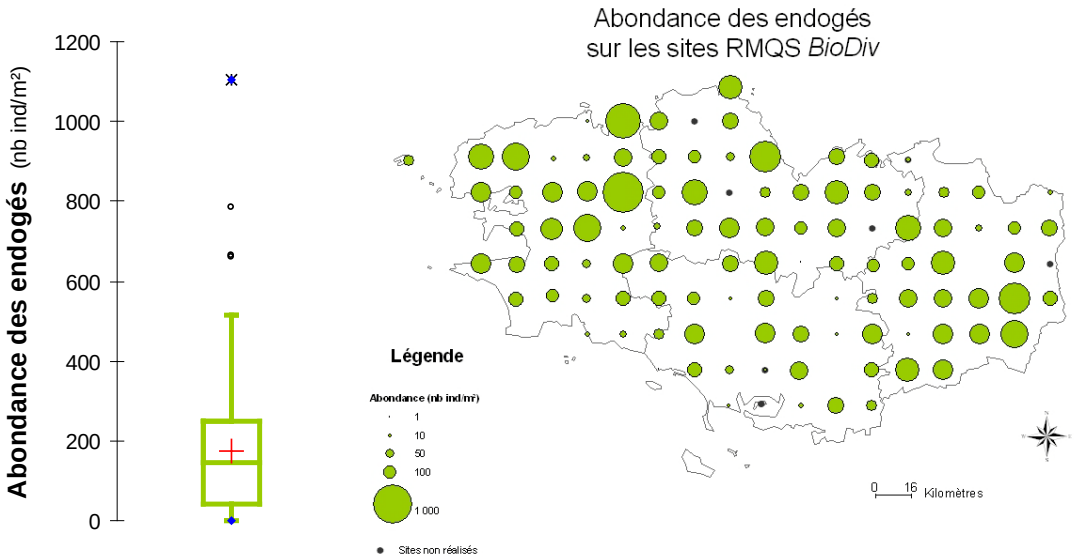




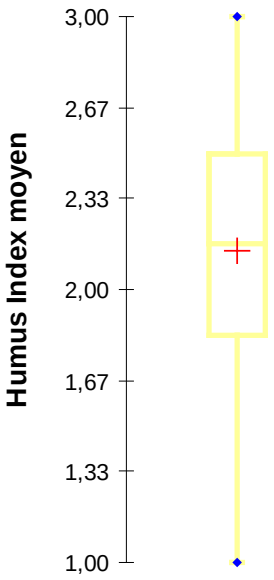
f) Abondance des catégories écologiques lombriciennes

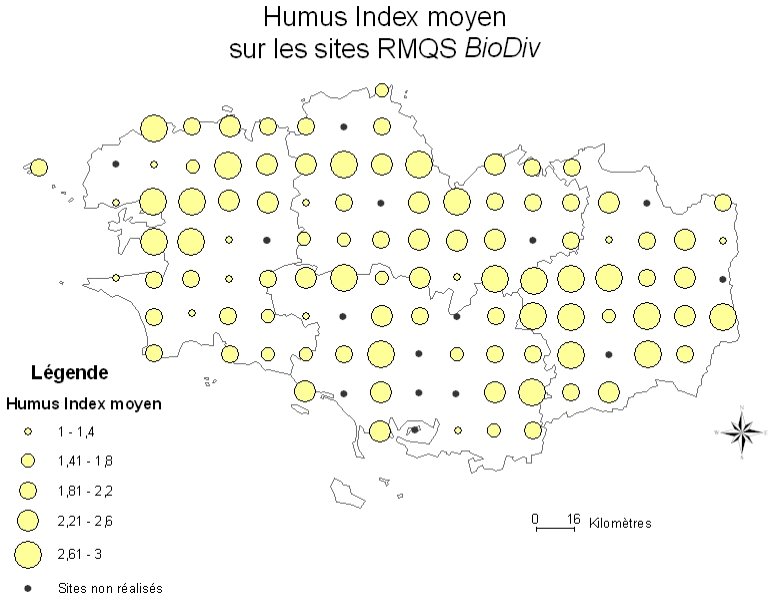


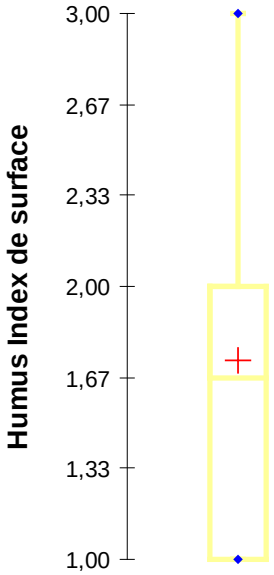


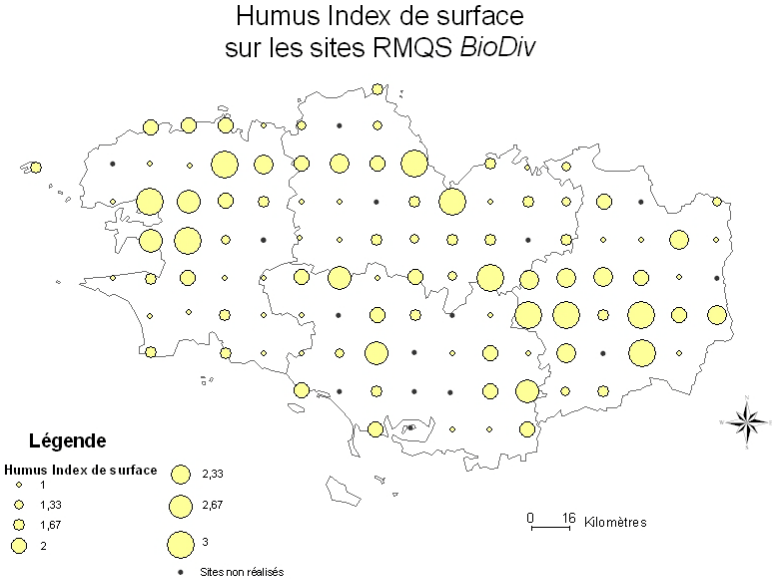


g) Humus Index moyen et de surface









3.2.3 Référentiels des paramètres de biodiversité

Les paramètres de biodiversité étudiés sont la richesse taxonomique, l'indice de diversité de Shannon et l'équitabilité. Ces paramètres sont calculés pour les nématodes, les nématodes phytoparasites, les collemboles et les lombriciens.

Prenant en compte l'ensemble des groupes biologiques, les paramètres de biodiversité ne sont pas tous appréhendés au même niveau taxonomique en lien avec la difficulté de détermination spécifique des différents groupes. Ainsi, la détermination, des collemboles et des lombriciens a été conduite jusqu'au niveau spécifique, de même dans la mesure possible en ce qui concerne les nématodes bien que le niveau générique soit mieux renseigné, alors que la détermination des acariens a été réalisée au niveau sous-ordre (Oribatida, Gamasida, Actinedida et Acaridida).

Le Tableau 1, récapitule les richesses à différents niveaux taxonomique de différents groupes biologiques recensés sur les sites RMQS *BioDiv*. Il apparaît ainsi que le programme RMQS *BioDiv* Bretagne a ainsi permis d'identifier la présence de 48 familles de nématodes sachant que 16 familles étant en moyenne retrouvées sur un site. Parmi eux, les nématodes phytoparasites sont représentés par 26 taxons (niveau genre) dont 5 identifiés par site en moyenne. Ainsi, 67 espèces de collemboles ont été inventoriées en Bretagne. Enfin, 23 espèces lombriciennes ont été identifiées sur les sites RMQS BioDiv, correspondant à 29 taxons (niveau infra-spécifique : espèces et variétés) avec 8 taxons présents en moyenne sur un site (Tableau 1).

Tableau 1 : Richesse taxonomique, par groupes biologiques, identifiée sur les sites RMQS *BioDiv*

	Sous Ordre	Famille	Genre	Espèces	Variétés
Nématodes	nr	***48***	86	210	nr
Nématodes phytoparasites	nr	14	***26***	39	nr
Collemboles	nr	14	33	***67***	nr
Acariens	4	nr	nr	nr	nr
Lombriciens	1	1	8	23	***29***

La valeur en gras italique correspond à l'unité taxonomique utilisée pour les cartes
Ce tableau présente une liste non exhaustive d'organismes ; nr : non renseigné

a) **Paramètres de diversité des taxons de nématodes** (N = 109)

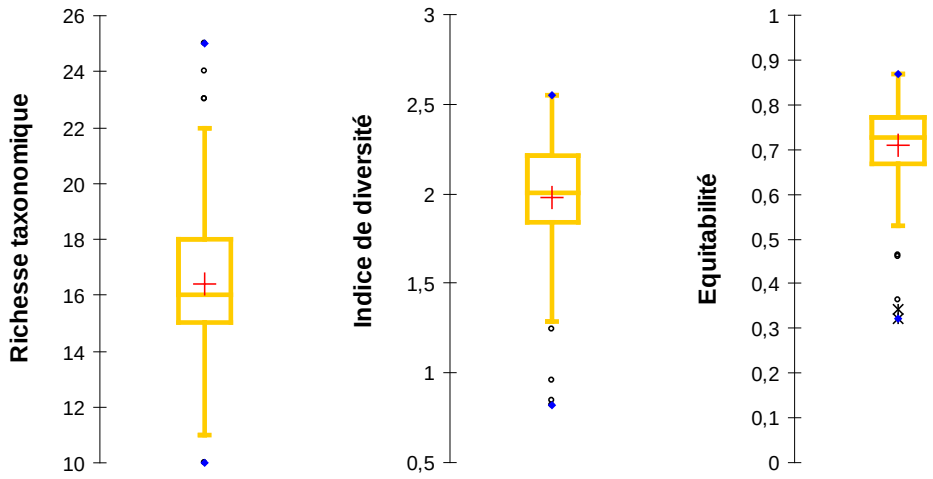
b) **Paramètres de diversité des taxons de nématodes phytoparasites** (N = 109)

c) **Paramètres de diversité des taxons de collemboles** (N = 98)

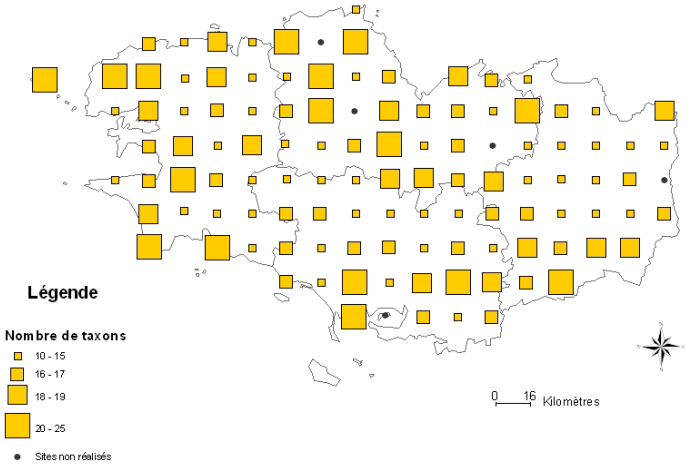
d) **Paramètres de diversité des taxons lombriciens** (N = 109)

Planche C : REFERENTIELS des PARAMETRES de DIVERSITE

a) Paramètres de diversité des taxons de nématodes (niveau famille)

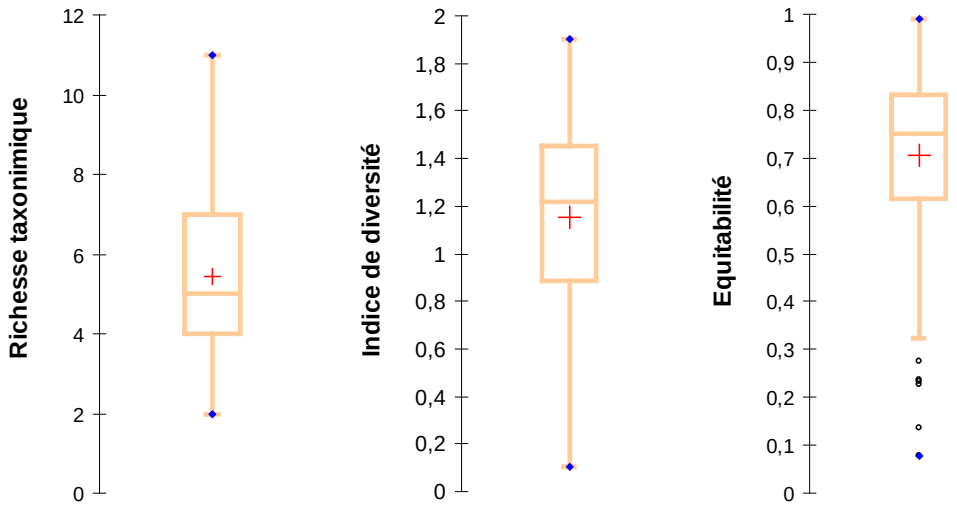


Richesse taxonomique des nématodes
sur les sites RMQS *BioDiv*

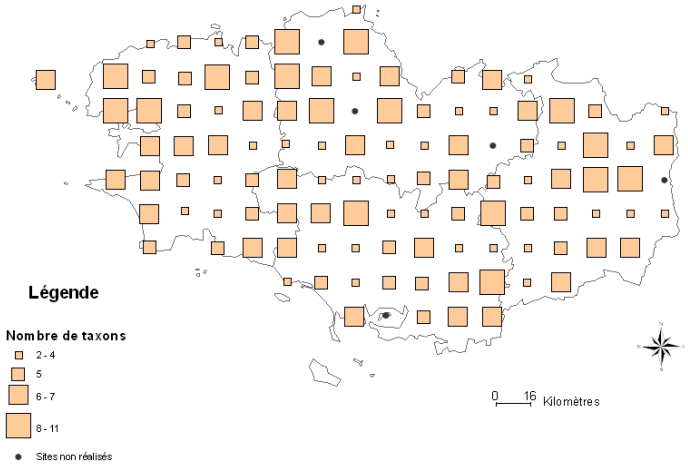


Indice de diversité des nématodes
sur les sites RMQS *BioDiv*

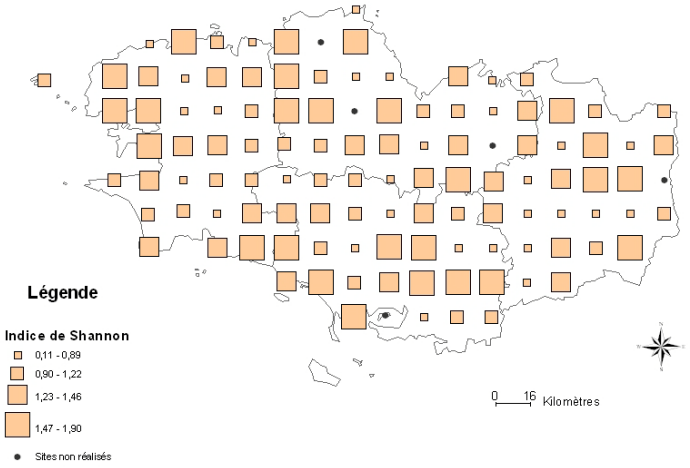
b) Paramètres de diversité des taxons de nématodes phytoparasites
(niveau genre)



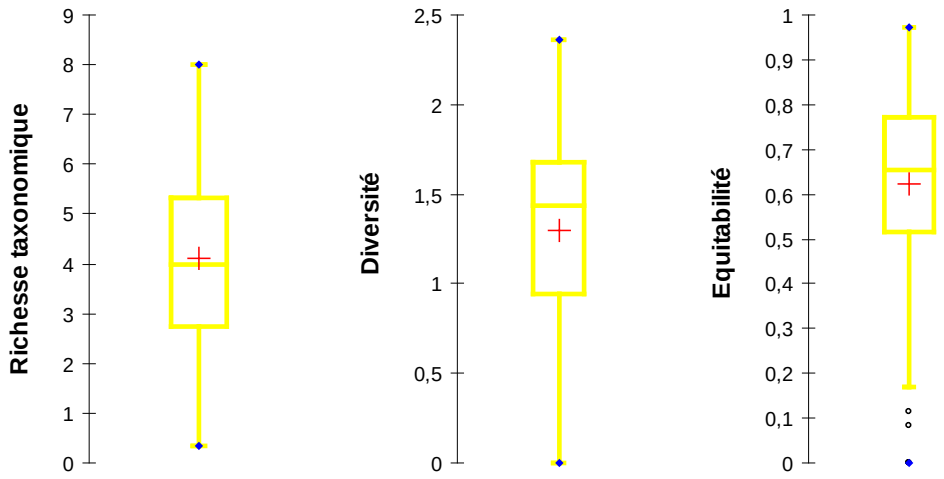
Richesse taxonomique des nématodes phytoparasites
sur les sites RMQS *BioDiv*



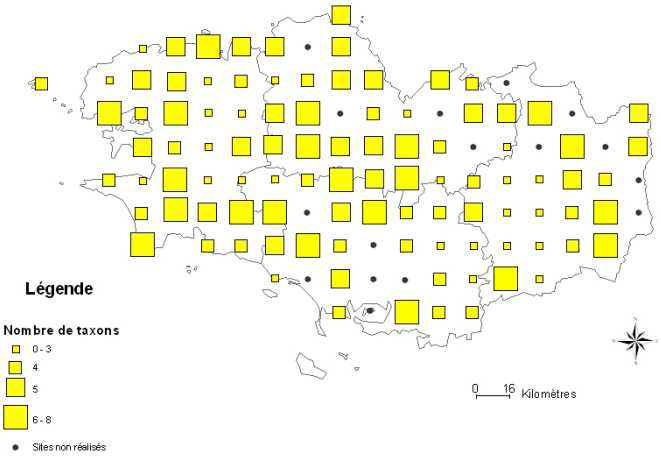
Indice de diversité des nématodes phytoparasites
sur les sites RMQS *BioDiv*



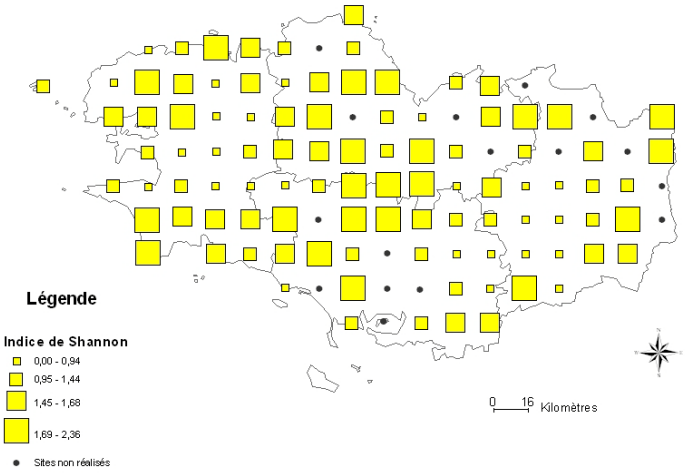
c) Paramètres de diversité des taxons de collemboles (niveau spécifique)



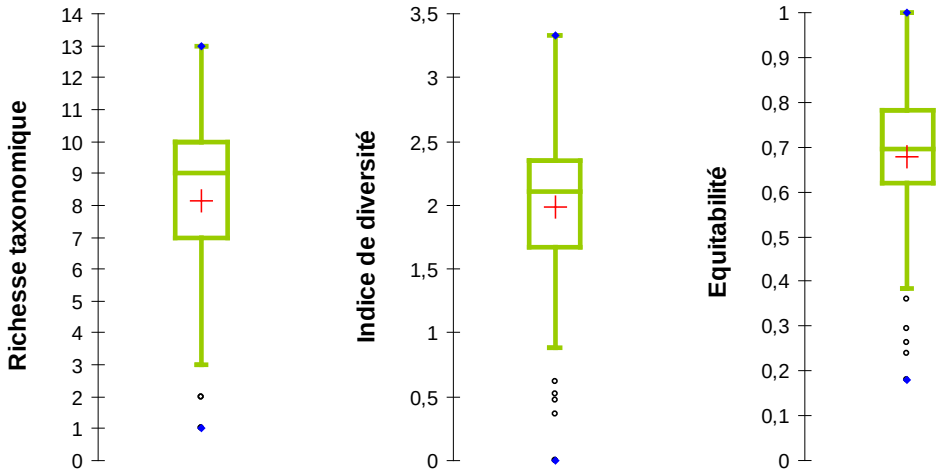
Richesse taxonomique des collemboles
sur les sites RMQS *BioDiv*



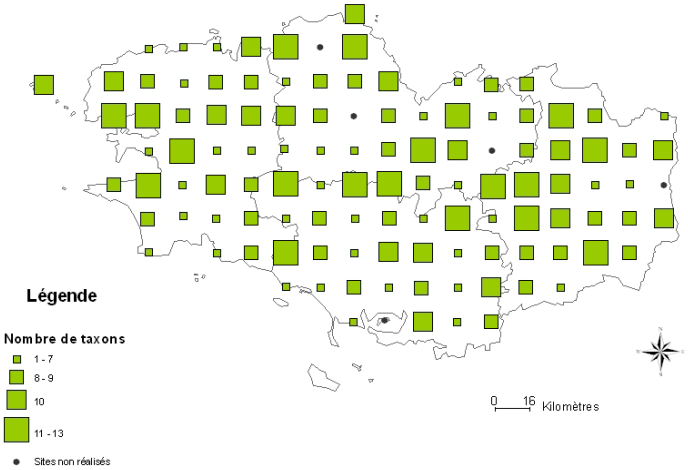
Indice de diversité des collemboles
sur les sites RMQS *BioDiv*



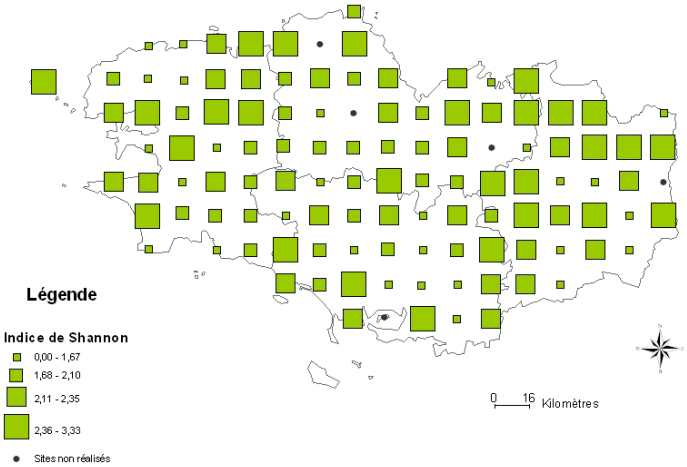
d) Paramètres de diversité des taxons lombriciens (niveau infra-spécifique)



Richesse taxonomique lombricienne
sur les sites RMQS *BioDiv*



Indice de diversité des lombriciens
sur les sites RMQS *BioDiv*



3.2.4 Synthèse des résultats entre paramètres biologiques et variables explicatives

Cette partie a pour but de faire le bilan des résultats biologiques aux regards des variables explicatives : occupation des sols, pratiques agricoles, paramètres pédologiques, année de prélèvement et humidité des sols (cf. Annexe IV). Deux types de tests non-paramétriques sont utilisés :

- coefficient de *corrélation de Spearman* pour des les variables explicatives quantitatives.
- tests de *Kruskal-Wallis et de Mann Whitney* pour des variables explicatives qualitatives.

Une soixantaine de paramètres biologiques ont été étudiés par le RMQS *BioDiv* :

- 7 pour la microbiologie
- 23 pour la nématofaune du sol
- 4 pour les nématodes phytoparasites
- 12 pour la mésofaune
- 11 pour les lombriciens
- 1 pour la macrofaune totale
- 2 pour l'Humus Index

L'ensemble des résultats de mise en relation des paramètres biologiques avec les variables explicatives est présenté sous forme d'un tableau synthétique (Tableau 2) ; le lecteur est invité à se référer aux tomes associés aux différents groupes biologiques pour un détail de ces résultats.

Une grande majorité des paramètres biologiques apparaît significativement influencée par l'occupation des sols, et ce quel que soit le groupe biologique. Ce résultat a d'ailleurs été précédemment illustré en ce qui concerne les paramètres globaux par le diagramme étoile (Figure 7). Quel que soit le groupe biologique, il existe aussi un ou plusieurs paramètres biologiques liés à des variables de pratiques agricoles et pédologiques. Cependant, ce nombre de paramètres discriminant les pratiques agricoles ou les conditions pédologiques, varie de manière importante selon le groupe biologique. Concernant les paramètres de diversité, seules la

Tableau 2 : Synthèse des mises en relation des paramètres biologiques avec les variables explicatives

■ significatif
□ non significatif

		Occupation du sol - 1er niveau	Occupation du sol - 2eme niveau	PA_Type de fertilisation (109)	PA_Amendement pailleux (109)	PA_Travail du sol (109)	PA_Traitement phytosannitaire (109)	PA_Type de fertilisation (99)	PA_Amendement pailleux (99)	PA_Travail du sol (99)	PA_Traitement phytosannitaire (99)	PEDO_Géologie	PEDO_Hydromorphie	PEDO_Profil de sol	PEDO_Profondeur	Variabilité inter-annuelle	Humidité des sols
MIC	ADNr 16 S	■	■	□	■	□	□	□	■	□	□	□	□	□	□	■	□
MIC	narG	■	■	□	■	□	□	□	■	■	□	□	■	□	□	■	□
MIC	narG/16S	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	■	■	□	■	□
MIC	pcaH	■	■	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	■	□
MIC	pcaH/16S	□	□	□	□	□	□	□	■	□	□	■	□	□	□	□	□
MIC	MOV	■	■	■	■	■	■	■	□	■	■	□	□	□	□	□	■
MIC	MOV%Ct	■	■	■	■	■	■	□	□	■	■	□	■	□	□	□	□
NEM	Densité des nématodes du sol	■	■	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	■	*
NEM	Densité des nématodes libres	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
NEM	Densité des nématodes phyto	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
NEM	Densité des phytoparasites	■	■	□	□	□	□	■	□	□	□	□	□	□	□	□	*
NEM	Densité des phytophages	■	■	□	□	□	□	■	□	□	□	□	□	■	□	■	*
NEM	Densité des bactérivores	□	□	□	■	□	□	■	□	□	□	□	□	□	■	□	*
NEM	Densité des fongivores	■	□	□	□	■	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	*
NEM	Densité des omnivores	■	■	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	■	*
NEM	Densité des carnivores	■	■	□	□	□	■	□	□	□	■	□	□	■	□	■	*
NEM	Indice de maturité	■	■	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	*
NEM	Indice de maturité (sans phyto)	■	■	■	□	■	■	□	□	□	□	□	□	□	□	■	*
NEM	PPI	■	■	□	□	□	■	□	□	□	□	□	□	□	□	■	*
NEM	MINO	□	■	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	■	*
NEM	BaMI	■	■	■	■	■	■	□	□	□	□	□	□	□	□	■	*
NEM	FuMI	■	■	■	■	■	■	□	□	□	■	□	■	□	□	□	*
NEM	OmMI	■	■	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	*
NEM	Indice d'enrichissement	■	■	■	□	□	□	□	□	□	■	□	□	□	□	■	*
NEM	Indice de structure	■	■	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	■	*
NEM	Indice de composition	■	■	■	■	■	■	■	□	□	□	□	□	□	■	□	*
NEM	Nématodes chanel ratio	■	■	■	■	□	■	□	■	□	□	□	■	□	■	□	*
NEM	Richesse taxonomique	□	□	□	□	□	□	□	□	■	□	□	□	□	□	□	*
NEM	Indice de diversité	□	□	□	□	■	□	□	□	■	□	□	□	□	□	□	*
NEM	Equitabilité	□	□	□	□	■	□	□	□	■	□	□	□	□	□	□	*
NPP	Densité totale	■	■	■	□	□	□	■	□	□	□	□	□	□	□	□	□
NPP	Richesse taxonomique	□	□	□	□	□	□	■	□	□	□	□	□	□	■	■	□
NPP	Indice de diversité	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	■	■	■	□
NPP	Equitabilité	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	■	□	□	□
MESO	Abondance totale de mésofaune	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	■
MESO	Abondance de collemboles	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	■
MESO	AB collemboles épi	■	■	■	■	■	□	■	□	□	□	□	□	□	□	□	■
MESO	AB collemboles hémi	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	■	□	□	□	■
MESO	AB collemboles eu	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	■	□
MESO	Abondance d'acariens	■	■	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□
MESO	AB acariens gamasides	■	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□
MESO	AB acariens oribates	■	■	■	□	□	□	□	□	□	□	■	□	□	□	□	□
MESO	AB acariens actinedide	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□
MESO	Richesse taxonomique	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	■	□	□	□	■
MESO	Indice de diversité	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□
MESO	Equitabilité	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□
VDT	Abondance totale	■	■	■	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□
VDT	Biomasse totale	■	■	■	□	□	□	□	□	■	□	□	□	□	□	□	□
VDT	Abondance des épigés	■	■	□	□	□	□	□	□	□	■	□	□	□	□	■	■
VDT	Abondance des anéciques	■	■	■	■	□	□	□	□	■	□	□	□	□	□	□	□
VDT	Abondance des endogés	■	■	■	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□
VDT	Biomasse des épigés	■	■	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	■	■
VDT	Biomasse des anéciques	■	■	■	■	□	□	□	■	■	■	□	□	□	□	□	□
VDT	Biomasse des endogés	■	■	■	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□
VDT	Richesse taxonomique	■	■	□	□	□	□	■	■	■	■	□	□	□	□	□	□
VDT	Indice de diversité	■	■	□	□	□	□	■	■	■	■	□	□	□	□	□	□
VDT	Equitabilité	□	□	□	□	□	□	□	■	□	■	□	□	□	□	□	□
MAC	Macrofaune totale	■	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
HUM	Humus index moyen	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	■	□	□	□	□
HUM	Humus index de surface	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□

* analyse non effectuée ; Les variables de pratiques agricoles sont dans un premiers temps utilisées sur l'ensemble des sites (PA 109) et dans un second temps uniquement sur les sites agricoles (PA 99)

richesse taxonomique et la diversité lombricienne présentent des résultats significatifs avec les différentes occupations de sol.

Observant l'ensemble des paramètres biologiques au regard des différents contextes étudiés, à savoir l'occupation des sols, les pratiques agricoles, les paramètres pédologiques, ou encore les variabilités inter-annuelles, il ressort de notre étude que la biomasse microbienne (MOV), bien que n'étant pas du tout influencée par la pédologie, est le paramètre biologique permettant de discriminer le plus grand nombre de contextes.

3.3 Lien entre les groupes biologiques étudiés

3.3.1 Lien entre paramètres biologiques globaux

La recherche de liens entre les paramètres biologiques globaux est appréhendée par des tests de corrélation de Spearman. Parmi les 109 sites, 89 contiennent les données des paramètres globaux pour l'ensemble des groupes biologiques.

Tableau 3 : Matrice de corrélation de Spearman entre paramètres biologiques globaux (N = 89 sites)

Variables	MIC_ MOV	MIC_ 16S	NEM_ abondance	NPP_ abondance	COL_ abondance	AC_ abondance	VDT_ abondance	MAC_ abondance
MIC_MOV	**1**							
MIC_16S	0,118	**1**						
NEM_abondance	**0,354**	-0,103	**1**					
NPP_abondance	0,080	0,002	**0,655**	**1**				
COL_abondance	-0,137	0,017	-0,058	0,023	**1**			
AC_abondance	0,203	0,032	**0,255**	0,128	**0,395**	**1**		
VDT_abondance	0,025	**0,291**	0,174	**0,307**	0,037	-0,040	**1**	
MAC_abondance	**0,348**	0,199	**0,291**	**0,246**	-0,089	0,061	**0,573**	**1**

Les valeurs en gras bleu sont significativement différentes de 0 à un niveau de signification alpha=0,05

La biomasse microbienne (MOV) présente des corrélations significatives avec les abondances de nématodes et de macrofaune totale. La biomasse bactérienne (ADNr 16S) est quant-à-elle corrélée avec l'abondance lombricienne. La nématofaune totale du sol est lié à l'abondance des acariens et de la macrofaune totale. Les nématodes phytoparasites présentent des corrélations significatives avec les lombriciens et la macrofaune totale (Tableau 1).

3.3.2 Lien entre structure taxonomique des communautés

Les liens entre structure taxonomique des communautés de nématodes, de collemboles et de lombriciens sont appréhendés par des analyses de co-inertie (Dolédec & Chessel, 1994).

Les co-inerties sont réalisées à partir des ACP sur les abondances[8] des différents groupes biologiques sur 85 sites RMQS *BioDiv* :

- 48 familles de nématodes (NEM)
- 13 genres de nématodes phytoparasites (NPP)
- 47 espèces de collemboles (COL)
- 13 taxons (certains taxons étant regroupés) lombriciens (VDT)

Tableau 4 : Résultats des co-inerties entre structure des communautés de différents groupes biologiques

	NEM	NPP	COL	VDT
NEM				
NPP	**0,40 ; s**			
COL	**0,87 ; s**	**0,50 ; s**		
VDT	**0,24 ; s**	0,18 ; ns	0,22 ; ns	

L'intitulé des lignes et des colonnes symbolise les différents groupes biologiques : NEM : nématodes, NPP : nématodes phytoparasites, COL : collemboles, VDT : lombriciens.
Dans ce tableau, le coefficient RV et la significativité à la p-value de 0,001 sont renseignés (s pour significatif et ns pour non significatif).

La structure des 48 familles de nématodes présente des résultats significatifs avec les structures de communautés de tous les groupes biologiques auxquels elle a été confrontée. Ainsi, des co-structures existent entre les nématodes et les collemboles, les nématodes et les lombriciens et enfin les nématodes phytoparasites et les collemboles.

Seule la co-structure la plus importante (RV = 0,87) est illustrée dans ce document. Il s'agit de celle existant entre les nématodes et les collemboles. (Figure 8). 33 % de l'inertie est extraite sur le plan factoriel 1-2, avec respectivement 20 % pour l'axe 1 et 13 % pour l'axe 2.

- Chez les nématodes ce sont les taxons Tylenchidae, Nygolaimidae et Aporcelaimidae qui contribuent fortement à l'***axe 1*** alors que chez les collemboles on retrouve les espèces *Proisotoma minima* et *Lepidocyrtus lanuginosus*.

- Sur l'axe 2, les familles Heteroderidae, Belondiridae de nématodes et les espèces *Sphaeridia pumilis* et *Heteromorus major* de collemboles contribuent fortement à la construction de cet axe. Ces taxons sont liés aux sites prairiaux. A l'opposé, la famille de nématodes Mononchidae est lié aux sites cultivés.

[8] Transformation log(x+1) à base 10 des abondances

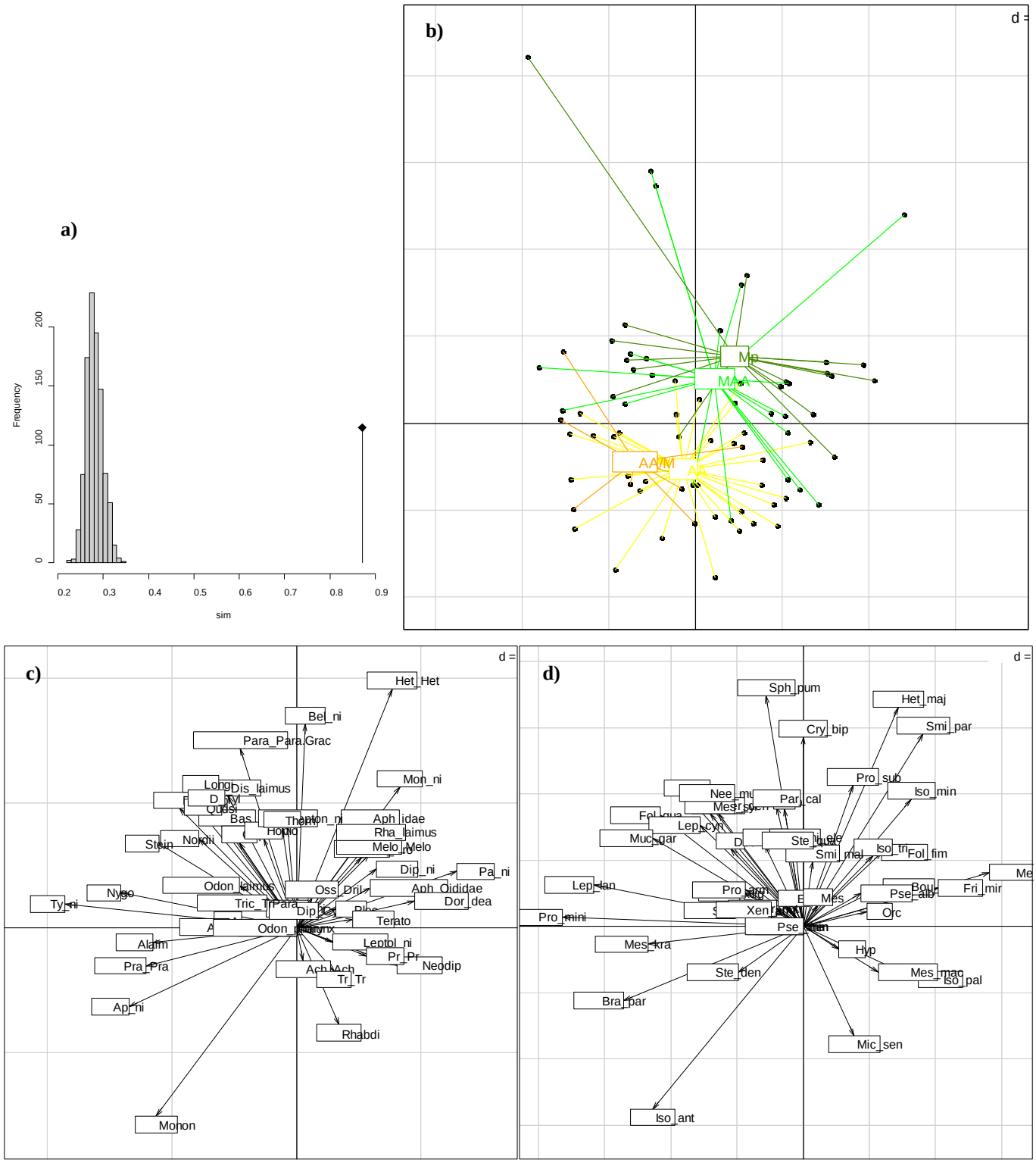


Figure 8 : Co-inertie entre structure des communautés de nématodes et de collemboles

a) Test de Monte Carlo et coefficient RV
b) Plan factoriel des sites illustré en fonction de l'occupation des sols
(**AA** : Grande culture (N = 37) ; **AA/M** : Culture dans rotation grande culture-prairie (N = 10) ;
M/AA : Prairie dans rotation grande culture-prairie (N = 20) ; **Mp** : Prairie permanente (N = 18))
c) Plan factoriel des 48 familles de nématodes
d) Plan factoriel des 47 espèces de collemboles

Chapitre 4 : Discussion et transfert de résultats vers les décideurs

Ce chapitre permet de répondre aux diverses attentes de l'ADEME. Il est consacré à des discussions sur des aspects techniques et méthodologiques qui constituent des pistes pour de futures études sur la composante biologique des sols. Ce chapitre est construit sous forme de questions-réponses.

- **Confirmer des méthodes de caractérisation de communautés du sol afin de contribuer à une définition ou une modification de normes ou à l'adaptation des règles de biomonitoring des sols à l'échelle européenne.**

Le cahier des méthodes (Tome 2) recense l'ensemble des protocoles & procédures mises en œuvre dans le cadre du programme RMQS *BioDiv*. Ce document fait référence à un certains nombre de normes (ISO 10381-6:2007, ISO 11063, ISO 14.239 :1997, ISO 14.240-2 :1997, ISO 23611-1:2006, ISO 23611-2:2006, ISO 23611-4:2007, ISO 23611-5) qui ont parfois été adaptées au cadre du RMQS *BioDiv*.

Pour la **microflore et la microfaune**, la méthode d'échantillonnage se base sur la norme ISO 10381-6: 1993. Après prélèvement, les 32 échantillons sont tamisés (6 mm) pour extraire les racines et les cailloux, permettant d'obtenir un échantillon composite homogène.

Pour la **mésofaune**, la méthode se base sur la norme ISO 23611-2:2006 avec l'adaptation suivante : le prélèvement est effectué sur 3 profondeurs (une seule pour la norme ISO) ce qui rend compte de la forte variabilité spatiale verticale observée en système cultivé. Cette étude a permis de confirmer que la prise en compte des 5 premiers cm de sols était suffisante pour le biomonitoring.

Pour les **lombriciens**, la méthode se base sur la norme ISO 23611-1:2006 avec les adaptations suivantes, liées au contexte agronomique de la région (60% en zone cultivée) : *i)* le prélèvement formol est réalisé avant le tri manuel, *ii)* le prélèvement formol est appliqué sur 1m² (au lieu de 1/4 m² selon la norme), ce qui permet de mieux rendre compte de l'hétérogénéité spatiale surtout en système cultivé, *iii)* le tri manuel est de fait limité à une surface de 1/16 m² (au lieu de 1/4 m²).

Pour la **macrofaune totale**, la méthode se base sur la méthode TSBF "Tropical Soil Biology and Fertility" adaptée aux systèmes tempérés décrite dans l'annexe C de la norme ISO 23611-1: 2006, avec les adaptations suivantes au contexte d'étude: *i)* le prélèvement formol est réalisé avant le tri manuel (à l'inverse de la norme ISO annexe C); *ii)* 6 répétitions sont réalisées (8 à 10 dans la norme ISO). Cette méthode adaptée est en cours de standardisation (prochaine ISO 23611-5).

▪ Coût / bénéfices de l'inventaire de la biodiversité

- Coût temporel : Temps consacré à l'acquisition de l'information

	au terrain	au laboratoire	à l'acquisition dans la base de données	Bilan
Microbiologie	+	++	+	++++
Nematofaune du sol	+	+++	++	++++++
Nematodes phytoparasites	+	++	++	+++++
Collemboles et acariens	+	+++	+	+++++
Lombriciens	+++	+	++	++++++
Macrofaune du sol	+++	++++	nc	+++++++?
Humus Index	+	++	+	++++

- Nombres de paramètres disponibles en sortie

	Paramètres globaux	Paramètres fonctionnels	Paramètres taxonomique	Bilan
Microbiologie	Biomasse microbienne globale (fumig.) Biomasse bactérienne (ADNr 16S)	Activités fonctionnelles (narG, pcaH et ratios)	B-ARISA	**7 paramètres**
Nematofaune du sol	Densité totale	Groupes trophiques Guildes fonctionnelles Indices nématologiques	Richesse, diversité Abondance et structure taxonomiques	**20 paramètres** **1 structure taxonomique**
Nematodes phytoparasites	Densité totale	-	Richesse, diversité Abondance et structure taxonomiques	**4 paramètres** **1 structure taxonomique**
Collemboles et acariens	Abondance de collemboles Abondance d'acariens	Types écologiques	Richesse, diversité Abondance et structure taxonomiques	**12 paramètres** **1 structure taxonomique**
Lombriciens	Abondance, biomasse	Catégories écologiques	Richesse, diversité Abondance, biomasse et structure taxonomiques	**11 paramètres** **1 structure taxonomique**
Macrofaune du sol	Abondance totale	?	?	**? paramètres**
Humus Index	-	Humus Index moyen Humus Index de surface	-	**2 paramètres**
				≈ 60 paramètres **4 structures taxonomiques**

- **Identifier et proposer certains critères aux acteurs de terrain** (qui élaborent des outils d'aide à la gestion agronomique et assurent la formation des agriculteurs, principaux utilisateurs des sols).

- Nématofaune

L'ensemble des travaux conduits dans le cadre de ce programme RMQS et du programme ICONES nous conduit à proposer un set de paramètres nématofauniques pour caractériser le fonctionnement biologique du sol qui pourraient être transférables aux acteurs de terrain.
(1) Le premier paramètre que nous retenons est la densité de nématodes, ce paramètre est à mettre en relation avec les conditions générales de vie des nématodes : qualité de l'habitat (texture ; structure), niveau de ressources organiques disponibles dans le sol : peu de ressources, peu de nématodes. Toutefois, il est indispensable de décomposer cette donnée en nématodes phytophages et nématodes non-phytophages (bactérivores, fongivores, omnivores et prédateurs), car les premiers interagissent essentiellement avec racines présentes dans le sol alors que les derniers sont des acteurs dans le fonctionnement du sol. La densité de nématodes décomposeurs secondaires peut servir d'indicateur de la quantité de matière organique « disponible » pour la micro et la mésofaune.
(2) L'abondance et la composition de la nématofaune phytoparasite est également importante car elle permet de mesurer le risque phytopatogène lié à ces organismes.
(3) Les indices de maturité (général, MI ou appliqué aux bactérivores, BaMi et aux fongivores, FuMI) permettent de discriminer des situations perturbées et exploités intensivement de situations plus naturelles, moins dégradées. Ces indices sont bien complétés par les indices d'enrichissement (EI) et de structure (SI) qui renseignent sur la complexité de la micro-chaîne trophique ainsi que sur la disponibilité des nutriments. Les informations fournies par les indices sont qualitatives et doivent être couplées aux densités qui donnent une estimation plus quantitative de l'intensité des processus biologiques ayant lieu dans le sol.

La nématofaune totale et les nématodes phytoparasites demandent un niveau de formation élevé. Toutefois, les méthodes d'échantillonnage sont très faciles à réaliser

sur le terrain et peuvent être effectuées par l'agriculteur ou le gestionnaire, qui pourra ensuite envoyer ses échantillons à un laboratoire compétent dans le domaine pour les analyses et interprétations.

- Mésofaune

Pour la **mésofaune**, l'outil demande un niveau de formation élevé. Toutefois, les méthodes d'échantillonnage sont très faciles à réaliser sur le terrain et peuvent être effectuées par l'agriculteur ou le gestionnaire, qui pourra ensuite envoyer ses échantillons à un laboratoire compétent dans le domaine pour les analyses et interprétations.

- Lombriciens

L'accessibilité à l'information, pour un utilisateur lambda, va dépendre du niveau taxonomique attendu. Ainsi, l'accès à des critères globaux tels que l'abondance (ind/m²) et la biomasse (g/m²) lombriciennes moyennes est très aisé et rapide : la méthode d'échantillonnage est facile au terrain et permet immédiatement de renseigner le praticien sur le nombre et le poids total des organismes prélevés. La pesée nécessite une simple balance de cuisine, la précision étant de l'ordre du gramme car sur le terrain, le souhait est d'avoir une valeur approximative pouvant ensuite être positionnée sur des gammes de valeurs (baselines).
L'accès au niveau de la catégorie écologique peut être relativement aisé, notamment en ce qui concerne les individus adultes, en croisant le critère de couleur et de taille. Le praticien pourra ainsi quantifier le nombre d'individus appartenant à chaque catégorie, positionnant dans un second temps les individus juvéniles par ressemblance avec les individus adultes ; il sera cependant dans certains cas, contraint d'avoir un groupe d' « indéterminés ».
L'accès au niveau spécifique bien que plus complexe, peut aussi être relativement aisé, notamment sur des individus adultes, **dès lors que le praticien ne s'intéresse pas au nom de l'espèce mais surtout au nombre d'espèces présentes**. Une simple détermination basée sur la notion de morphotypes pourra ainsi renseigner de la richesse spécifique d'un milieu. La détermination spécifique des individus juvéniles pourra par contre être plus complexe et devra dans des contextes (forte richesse

Tableau 5 : Synthèse des informations renseignées par les paramètres biologiques et leur niveau d'utilisation

				Capacité des paramètres à rendre compte d'une perturbation			Possibilité d'utilisation des paramètres par différents publics		
Groupes fonctionnels	**Groupes biologiques**	**Paramètres**		**Occupation des sols**	**Pratiques agricoles**	**Perte de biodiversité spécifique**	**Agriculteurs**	**Conseillers agricoles**	**Scientifiques**
Microflora		Biomasse microbienne	total	+++	+++				+++
		Biomasse bactérienne	total	++	+				+++
		Activité	fonctionnel	++	+				+++
		Structure génétique	taxonomique			++			+++
Microfauna	*Nématofaune totale*	Abondance	total	+					+++
			fonctionnel	++	+				+++
			taxonomique	+		++			+++
		Indice nématologiques		++	+				+++
		Diversité				+			+++
	Nématodes phytoparasites	Abondance	total	++	+				+++
			taxonomique	+		++			+++
		Diversité				+			+++
Mesofauna	*Acariens*	Abondance	total	+++					+++
			sous groupe	++					+++
	Collemboles	Abondance	total						+++
			fonctionnel	++	++				+++
			taxonomique	+		++			+++
		Diversité				+			+++
Macrofauna	*Lombriciens*	Abondance et/ou biomasse	total	+++			++	++	+++
			fonctionnel	+++	+++		+	++	+++
			taxonomique	+		++			+++
		Diversité		++	+++	+			+++

spécifique) s'appuyer sur l'aide d'experts. *In fine*, la détermination spécifique permettant d'attribuer un nom à chaque morphotype devra être faite par un expert, qui pourra déterminer des échantillons qui lui auront été expédiés, confirmant ainsi le diagnostic de terrain (nombre de morphotypes).

Comment utiliser ces critères obtenus de manière plus ou moins aisée ?

La discrimination de l'**occupation des sols** est possible quel que soit le critère lombricien utilisé : critères globaux (abondance, biomasse), catégorie écologique ou taxon.

La discrimination des **pratiques agricoles** est aussi possible, cependant seuls les critères de diversité (richesse spécifique, indice de diversité) ont vraiment permis de discriminer l'ensemble des pratiques étudiées, les valeurs de biomasse des anéciques permettant quant-à-elle de discriminer ¾ des pratiques.

Les **paramètres pédologiques** n'ont par contre pas été discriminés entre eux, et seules l'abondance et la biomasse des épigés ont pu mettre en évidence un effet humidité du sol et variabilité interannuelle.

En positionnant les valeurs obtenues sur le terrain sur une gamme de valeurs (baselines), le praticien pourra juger d'un premier niveau d'état biologique de son sol.

- **Établir une DNAthèque permettant de conserver un matériel biologique comportant le support génétique des communautés microbiennes et faunistiques présentes aux différents points de prélèvement**

L'extraction de l'ADN du sol et la caractérisation de la structure génétique des communautés telluriques microbiennes est mis en œuvre par l'équipe dijonnaise.

Concernant la génétique des communautés faunistiques, l'ADN mitochondrial codant pour le gène CO1 a été extrait pour 5 taxons lombriciens (LC, LRR, LT, LFR et LCE) prélevés sur des sites RMQS *BioDiv* (Briard, 2009). De plus, un projet de thèse à été déposé par l'équipe rennaise dont l'intitulé porte sur les relations entre diversité phylogénétique et diversité des traits fonctionnels chez les Lumbricidae européens. Des analyses génétiques ont également été mises en œuvre sur les nématodes phytoparasites et nématodes à kystes.

Pour chaque site RMQS *BioDiv,* un échantillon de 500g de sol à été conservé dans une pédothèque. Ce sol pourrait éventuellement être utilisé pour compléter la DNAthèque.

- **L'utilisation de la diversité fonctionnelle est-elle suffisante pour discriminer les effets des filtres environnementaux ou est-il nécessaire d'utiliser la diversité spécifique ?**

Concernant la **nématofaune**, l'analyse basée sur l'abondance des nématodes au niveau des familles est le niveau le plus intéressant pour le diagnostic de l'état du sol. L'analyse au niveau spécifique est importante en termes d'inventaire de biodiversité mais non nécessaire dans les études sur le fonctionnement du sol.

Concernant la mésofaune, et plus particulièrement les **collemboles**, il apparait qu'une discrimination des espèces en 3 groupes fonctionnels (épi-, hémi- et eu-édaphiques) semble très pertinente pour caractériser les usages et les pratiques des sols. La détermination au niveau spécifique ne semble pas indispensable, même s'il peut parfois être nécessaire d'identifier les espèces pour les classer en groupes fonctionnels.

Concernant les **lombriciens**, il apparaît qu'une information au niveau global (abondance et biomasse) soit déjà d'une certaine qualité d'information en permettant la discrimination de l'occupation des sols. Cependant, si le niveau fonctionnelle, *via* la biomasse des anéciques, a permis de discriminer certaines pratiques entre-elles, il n'en demeure pas moins que le niveau taxonomique a permis d'élargir la gamme de filtres environnementaux discriminés en intégrant le type de fertilisation. La richesse taxonomique semble donc être le niveau le plus adéquat dans la discrimination d'un large panel de filtres environnementaux.

- **En partant d'une stratification réalisée en fonction des types de sol d'usage et de pratiques, peut-on comparer *a posteriori* un réseau maillé et un réseau stratifié ?**

Il est difficile de répondre à cette question car dans le cas du RMQS *BioDiv* seul le réseau maillé est utilisé (en lien avec le maillage systématique du RMQS Classique).
Pour répondre à cette question, il faudrait pouvoir utiliser d'autres données sur des sites inventoriés en Bretagne. Ainsi, le recensement dans une base de données de l'ensemble des paramètres biologiques des sols, mesurés dans la région, pourrait permettre la comparaison souhaitée entre réseau maillé et stratifié. Concernant la **mésofaune**, une autre étude réalisée en Meuse (Maillant *et al.*, 2009), à partir d'un échantillonnage stratifié, semble indiquer de profondes similitudes en termes de résultats par rapport aux résultats issus du RMQS *BioDiv*.

- **Quel serait le réseau (systématique ou stratifié) le plus pertinent pour l'étude des paramètres biologiques à l'échelle régionale ?**

Le programme RMQS *BioDiv* n'avait pas pour objectif de répondre à cette question étant donné que le maillage systématique nous était imposé par le choix de s'appuyer sur un réseau déjà existant et organisé (RMQS Classique).
Un réseau systématique présente l'avantage d'ouverture à de nouvelles questions. L'échantillonnage systématique peut servir de base à identifier des premières valeurs seuils qui pourront être affinées par un travail complémentaire sur un échantillonnage stratifié Ainsi, en fonction des résultats par groupes biologiques, certaines relations peuvent apparaître entre occupation du sol et un groupe biologique donné, amenant à tester la pertinence de ce groupe par l'application d'un échantillonnage stratifié. (exemple : étude de systèmes prairiaux dans différents contextes climatiques sur l'ensemble du territoire français).
Le réseau **stratifié** est intéressant pour répondre sur le court terme et le systématique pour le moyen terme. La question reste : comment mettre en place un réseau qui nécessite un nombre minimum de suivi.

Partie III : Valorisation

Cette troisième partie expose les valorisations, en termes de communication et vulgarisation, qui ont été mises en place grâce au programme RMQS *BioDiv*. Les différents outils de transfert de connaissance sont adaptés à différents **publics cibles**, autrement dit, la communauté scientifique, les acteurs de développement et les agriculteurs. Cette troisième partie est constituée d'un seul chapitre sur la communication et le transfert des connaissances.

Chapitre 5 : Communication - Transfert

Ce chapitre présente les diverses actions et outils de communications qui ont été réalisés au cours du programme RMQS *BioDiv*. Le transfert de connaissances a été dirigé à la fois vers la communauté scientifique nationale et internationale. Au niveau régional, l'intégration au programme « Sols de Bretagne » a permis de compléter le volet de surveillance de la qualité des sols (suivi physico-chimique pris en compte par le RMQS « classique ») par un suivi des composantes biologiques des sols. Le monde agricole a également été la cible de conférences sur la biodiversité des sols ainsi que les acteurs de l'environnement en Bretagne.

5.1 Transfert vers la communauté scientifique

Le transfert vers la communauté scientifique a été accompli à différentes échelles : niveau national, européen et international.

Le transfert vers la communauté scientifique **internationale** a été réalisé *via* notre participation à des ***colloques***. Il s'agit de colloques i) sur les sciences du sol (EUROSOIL - Vienne) et ii) sur la biodiversité, la conservation et la gestion durable des organismes du sol (ICZS - Brésil). Ils se sont déroulés du 25 au 29 aout 2008.

http://www.ecsss.net http://soilzoology.preservaambiental.com

Lors de ces colloques, différents outils de transfert de connaissances ont été proposés : 4 posters et 2 présentations orales ont été présentés. Les thématiques « Protocoles et procédures », « Base de données » et « Traitement des données » et « Résultats » du programme RMQS *BioDiv* ont été illustrées par le biais de supports posters (Figure 6). Une maquette commune à l'ensemble des posters a été établie afin d'assurer une meilleure visibilité et reconnaissance. Les premiers résultats obtenus ont été exposés au cours d'une présentation orale au colloque EUROSOIL alors que ce sont les traitements de données qui ont été présentés au colloque ICZS.

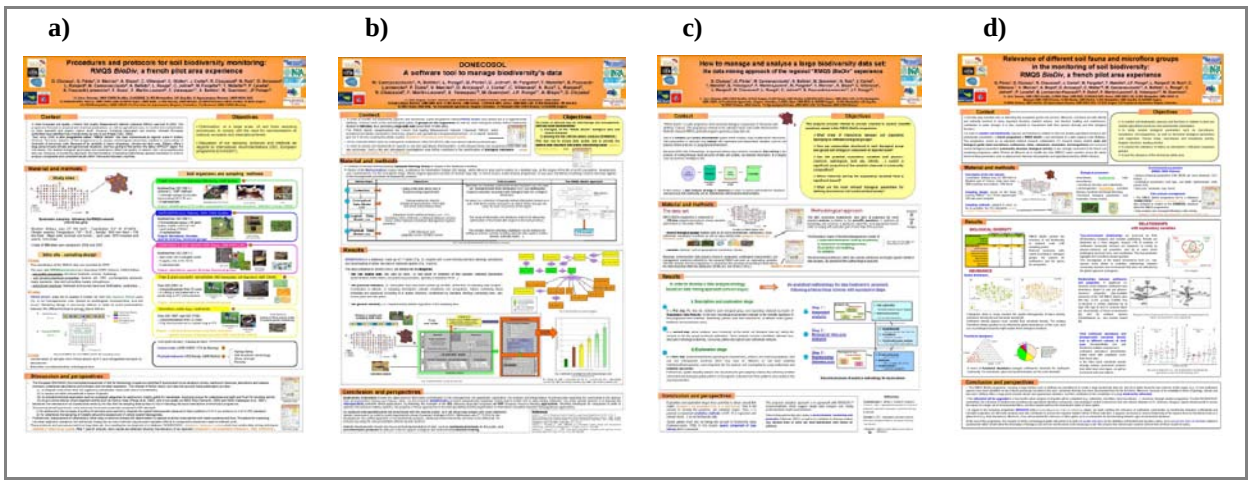


Figure 9 : Posters destinés à la communauté scientifique internationale

a) Protocoles et procédures, b) Base de données,

c) Traitements de données et d) Premiers résultats du programme RMQS *BioDiv*.

Le bilan de cette prestation est très satisfaisant, car deux posters « Protocoles et Procédures » et « Traitement de données » ont été sélectionnés sur la base de critères scientifiques et de qualités esthétiques. Ils ont, de cette façon, été exposés plusieurs jours parmi les 40 posters pré-finalistes durant tout le colloque EUROSOIL. De nombreux retours positifs sur les travaux réalisés ont également été recueillis suite aux présentations orales.

Le transfert vers la communauté scientifique **internationale** a également été réalisé via notre participation à un ***workshop*** sur les aspects statistiques de programmes de suivi de la qualité des sols à l'échelle régionale (cf. programme Workshop on Statistical Aspects of National-Scale Soil Monitoring en Annexe III.4). Ce workshop s'est déroulé les 11 et 12 décembre au centre de recherche de Rothamsted (England).

Le programme de recherche **européen** ENVASSO (http://www.envasso.com) a retenu le RMQS *BioDiv* comme zone pilote afin de participer à l'élaboration d'outils biologiques pour qualifier l'état de la diversité des sols en Europe. Cela nous a permis d'organiser un séminaire en France en mai 2007 (cf. photos ci-dessous).

Le transfert vers la communauté scientifique a également été réalisé au niveau **national** avec la participation et la présentation d'un exposé au Séminaire IGCS des 6 et 7 décembre 2007, dont le programme est présenté en Annexe III.1 et la réalisation d'un article pour la revue Etude et Gestion des Sols (Cluzeau et *al.*, in press).

5.2 Transfert vers les professionnels

Le transfert vers les professionnels et notamment ceux du monde agricole, s'inscrit plus particulièrement dans un cadre régional. En effet, le programme RMQS *BioDiv* est intégré dans un programme plus large : « Sol de Bretagne ». Ce dernier a permis la concrétisation de conférences vers les professionnels du monde agricole et les acteurs de l'environnement régionaux. Par ailleurs, des plaquettes d'information synthétique de présentation du programme RMQS *BioDiv* ont été réalisées. Enfin, une démarche de restitution des résultats de ce programme aux propriétaires et exploitants des sites RMQS a été mise en œuvre.

Communications via le programme « Sol de Bretagne »

Le programme RMQS *BioDiv* est intégré dans le volet surveillance du programme « Sols de Bretagne »[9]. Ce dernier est une déclinaison de deux programmes nationaux, le Réseau de mesures de la qualité des sols (RMQS), présenté dans le **volet surveillance**, et le programme Inventaire, gestion et conservation des sols (IGCS), présenté dans le **volet cartographie**. L'unité INFOSOL de l'INRA d'Orléans est chargée d'assurer la coordination nationale de ces deux programmes, mais leur mise en place se fait à un niveau plus local, la région. Le programme « Sols de Bretagne » est ainsi chargé d'adapter ces programmes au contexte breton tout en respectant le cadre national.

[9] http://www.sols-de-bretagne.fr

Dans le cadre du programme « Sols de Bretagne », des communications ont été réalisées.

Premièrement, il s'agit d'une conférence au Salon international des productions animales (SPACE) qui s'est déroulé le 11 septembre 2008 (cf. Annexe III.2). La valorisation du programme RMQS *BioDiv* passe également par un transfert vers les professionnels du monde agricole.

Deuxièmement, lors de la conférence annuelle du réseau des partenaires du GIP Bretagne Environnement, un exposé a été présenté dans le troisième atelier « Observation des sols ». Cette présentation sur le « volet suivi de la qualité biologique des sols en Bretagne » a été réalisée le 4 décembre 2008 devant divers acteurs de l'environnement (associations, collectivités, universitaires …) en Bretagne (cf. Annexe III.3).

Plaquette d'information sur le programme RMQS *BioDiv*

Pour communiquer de manière synthétique sur le programme RMQS *BioDiv*, des plaquettes d'information ont été réalisées.

Une première version a été diffusée auprès des agriculteurs propriétaires et/ou exploitants des sites RMQS afin de leur expliquer les objectifs, les moyens mis en œuvre et les finalités du programme RMQS *BioDiv*.

Par la suite, une seconde version plus générale a été réalisée pour un plus large public : du scientifique au grand public. Cette plaquette expose le contexte, les objectifs, les groupes biologiques étudiés, les équipes associées, les groupes de travail et les échelles d'investigation (Figure 10). Son format est un A4 recto-verso plié en trois. Cette plaquette existe également en version anglophone et est disponible sur simple demande.

Figure 10 : Plaquette d'information du programme RMQS *BioDiv*

Restitution aux propriétaires et exploitants des sites RMQS

L'échantillonnage systématique du programme RMQS *BioDiv* est calé sur les sites du « Réseau de Mesures de la Qualité des Sols ». Dans le cadre de ce réseau de monitoring, la pérennisation des sites d'étude est essentielle. C'est pourquoi, une restitution des principaux résultats biologiques obtenus pour chaque site RMQS *BioDiv* est envisagée. Ces informations seront transmises, en version papier, aux propriétaires et exploitants des sites RMQS.

Ce travail sera mené conjointement avec l'unité InfoSol d'Orléans et les partenaires des Chambres d'Agriculture de Bretagne. Ces derniers, ayant choisi les sites et réalisé l'échantillonnage RMQS « Classique », sont les premiers interlocuteurs avec les propriétaires et exploitants des sites RMQS. L'élaboration d'un « modèle type » est en cours de réalisation. En ce qui concerne la partie résultats biologiques, les résultats obtenus pour le site seront détaillés ainsi que les moyennes observées dans des contextes similaires (pratiques agricoles, caractéristiques pédologiques, …).

PERSPECTIVES et CONCLUSION

Le RMQS *BioDiv* est un programme audacieux qui répond à des besoins primordiaux de connaissances scientifiques sur la biodiversité des sols et de construction d'outils de bio-indication. En effet, la composante biologique des sols étant extrêmement complexe, une longue phase d'inventaire est nécessaire pour pouvoir évaluer de manière pertinente l'état de cette biodiversité et de son évolution notamment en termes de quantité de perte de biodiversité. Cette phase de recherche et d'acquisition des connaissances constitue un pas en avant vers l'identification d'indicateurs pertinents. Il reste à noter, tout de même, que les programmes de « bio-monitoring » dans ce domaine sont coûteux en temps, en argent et en moyens humains.

Les collaborations avec différentes équipes de recherche nationales et européennes constituent donc un atout indéniable de ce programme. En effet, l'association d'équipes partenaires de toute la France a permis d'étudier un grand nombre d'organismes vivants du sol. De plus, l'utilisation des données d'un réseau de mesures existant (RMQS « classique » géré par l'unité InfoSol d'Orléans) a permis d'étudier un grand nombre de paramètres et donc de manière quasi-exhaustive les différentes variables explicatives potentielles de la composante biologique des sols. Cette collaboration nationale a été faisable grâce à la réalisation de conventions établies entre les divers organismes.

Par ailleurs, à l'échelle européenne, le programme RMQS *BioDiv* intégré au projet ENVASSO a participé i) à la co-construction d'une harmonisation des protocoles, des données et de leur gestion, ii) à la proposition d'indicateurs et iii) à la recherche de valeurs seuils et limites qui pourront rendre compte de l'état biologique du sol (fonctionnement/dysfonctionnement).

Conclusions et perspectives sur les démarches engagées

Ce programme a permis la mise en œuvre de diverses démarches méthodologiques. Le groupe de travail **« Protocoles et procédures »** a réalisé un cahier des méthodes qui recense l'ensemble des protocoles et procédures utilisés dans le cadre du RMQS *BioDiv*. Ce document constitue un véritable outil de transferts pour de futurs programmes de monitoring de la biodiversité des sols.
Concernant le groupe de travail **« Gestion et traitement de données »** de nombreuses réflexions ont été engagées en lien avec le nombre important de données acquises au cours de ce programme. Un outil de gestion et d'organisation des informations collectées (base de données) est en cours de développement. Aussi, l'organisation d'un séminaire sur les analyses de données est envisagé afin de répondre aux diverses questions que pose ce jeu de données complexe associant du biologique et de l'agro-pédoclimatique, qui nécessite des approches moins communes que celle réalisées classiquement en écologie du sol.

Conclusions et perspectives sur les résultats

Paradoxalement et bien que leurs rôles soient reconnus, les organismes du sol, leurs relations et les fonctions qu'ils exercent, sont parmi les moins bien connus (ADEME, 2004). Le premier résultat de ce programme est d'avoir augmenté notre connaissance sur la composante biologique des sols grâce à cet inventaire réalisé sur les sols bretons. Ainsi, des valeurs de références sont maintenant disponibles pour de nombreux paramètres biologiques (≈ 60). Grâce au programme RMQS *BioDiv,* l'identification "non exhaustive" de 300 espèces de faune du sol (dont 210 espèces de nématodes, 67 de collemboles et 23 lombriciennes) a été recueillie.

De précédentes études sur la composante biologique des sols en Bretagne existent, mais elles restent très locales, et ne concernent qu'un nombre limité d'organismes du sol et en aucun cas ne couvrent l'ensemble des organismes étudiés dans le cadre du RMQS *BioDiv*. De manière générale, les valeurs obtenues pour les paramètres biologiques dans le cadre du programme RMQS *BioDiv* Bretagne sont en accord avec la littérature en contexte breton (*Lombriciens* : Binet, 1993 ; Cluzeau, 1987 ;

Cannavacciuolo, 1998 ; Pérès, 2003. *Microbiologie* : Walter, 2002 ; Lopez-Gutiérrez, 2004) et la complètent judicieusement, lorsqu'elle existe.

Les résultats du programme RMQS *BioDiv* sont présentés au sein des différents tomes « par groupes biologiques ». Ils concernent l'exploration, la structuration spatiale et la mise en lien avec les variables explicatives des données biologiques acquises. Comme cela a été montré au cours du document, des résultats significatifs sont mis en évidence entre les paramètres biologiques et les variables explicatives. Malgré cela, la démarche de traitement des données n'est pas achevée. En effet, la mise en place d'une approche multifactorielle, la hiérarchisation des variables pertinentes, l'élargissement des variables explicatives, l'étude des traits de vie biologiques et la poursuite des analyses spatiales constituent les pistes à approfondir sur le court et moyen terme.

En effet, dans le cadre de ces rapports, seuls des traitements variable par variable ont été utilisés. Cette étape pourtant nécessaire doit impérativement être complétée par une **approche multifactorielle**. Cette dernière se comprend particulièrement pour les variables de pratiques agricoles qui sont fortement liées à l'occupation des sols. De plus, après l'identification des variables qui jouent un rôle prépondérant sur la faune du sol, il est important de **hiérarchiser** leur importance (régression PLS, GAM, …)

De plus, un travail non négligeable est à considérer au niveau des **variables explicatives**. En effet, ce jeu de données doit être complété, notamment en ce qui concerne les pratiques agricoles, les données climatologiques, … Actuellement seules quatre variables de pratiques agricoles (fertilisation, amendement et fertilisation organique, travail du sol et traitements phytosanitaires) sont disponibles, or de nombreuses autres sont nécessaires pour mieux comprendre et expliquer la composante biologique des sols. Pour cela, un travail en concertation avec les Chambres d'Agriculture de Bretagne et l'INRA InfoSol d'Orléans est en cours.

Aussi, **l'étude des traits de vie** des espèces semble une piste intéressante pour compléter l'approche fonctionnelle de la diversité des sols. La méthode RLQ (Chessel *et al.,* 1993) est alors envisagée.

Par ailleurs, en ce qui **structuration spatiale, aucun** paramètre biologiques étudiés (abondance, biomasse, diversité, …) ne présentent de structuration spatiale à l'échelle de la Bretagne. Cependant, il est probable que les structures ne soient pas détectables à l'échelle de cette région. Quelques taxons présentent néanmoins des distributions spatiales particulières (ex : *Lumbricus terrestris*). Sur ce sujet, les perspectives envisagées pour l'approfondissement de l'approche spatiale concernent entre autres la modélisation de la qualité d'habitat (Hirzel, 2002).

Conclusions et perspectives sur la valorisation et le transfert de connaissance

Le transfert des connaissances acquises est un point essentiel du programme RMQS *BioDiv*. Il a été effectué par le biais de publications et diverses communications. Concernant les actions de communication - vulgarisation, différents publics sont ciblés : scientifiques, acteurs de développement, professionnels du monde agricole, acteurs de l'environnement, etc., l'objectif étant d'étendre les communications au grand public et aux scolaires.

Un certain nombre de valorisations n'ont pu être finalisées au cours de ces trois années de programme. Une dynamique de création de nouvelles valorisations est en cours par le biais de rédaction d'articles scientifiques et création de nouveaux outils de vulgarisation.

Publications scientifiques

La valorisation du programme RMQS *BioDiv* va être complétée par des articles scientifiques destinés à la communauté scientifique internationale. Ces articles s'articulent suivant l'organisation même du programme à savoir :

- Protocoles et Procédures
- Base de données (concept, architecture)
- Résultats par groupes biologiques
- Résultats synthétiques

Ces articles sont en cours de rédaction ; Afin d'en faciliter la rédaction, chacun d'eux est géré par un coordinateur. Il est à noter qu'un premier article (Cluzeau *et al.*)

rendant compte du programme dans sa globalité (procédures et protocoles ; quelques résultats) a été soumis à la revue française EGS en mai 2009.

Outils de vulgarisation

De nouveaux outils de vulgarisation s'inscrivant dans la durée sont en cours de réalisation :

- Les **Cahiers Naturalistes de Bretagne** vont être rédigés à destination du grand public. Ce document va décrire la biologie, l'écologie et les rôles des principales espèces ou taxons rencontrées dans les sols bretons.
- Les principales informations à retenir sur la biodiversité des sols seront synthétisées sous la forme de **fiches-articles.** Elles seront mises en ligne sur le site internet de Bretagne-Environnement. Une réflexion sur la forme de ces fiches-articles sera conduite au cours de cette année.
- Un **guide technique** à destination des acteurs de développement
- Les **supports visuels** pour l'enseignement primaire et secondaire de la région vont être réalisés (fiches d'activités pour différents niveaux, une clé de détermination simplifiée pour reconnaître la faune du sol, des posters A0 de « vulgarisation » de la faune du sol).

Table des illustrations

Figure 1 : Groupes biologiques étudiés et équipes partenaires associées du programme RMQS BioDiv..... 3
Figure 2 : Carte de réalisation des sites RMQS BioDiv Bretagne..... 7
Figure 3 : Positionnement de la zone d'échantillonnage RMQS BioDiv 8
Figure 4 : La zone RMQS BioDiv : position des espaces de prélèvements des différents taxons..... 9
Figure 5 : Schéma conceptuel du traitement des données RMQS BioDiv..... 19
Figure 6 : Proposition de classes d'abondance lombricienne pouvant servir de références..... 35
Figure 7 : Diagramme étoile comparant les valeurs des paramètres biologiques globaux en fonction de l'occupation des sols 48
Figure 8 : Co-inertie entre structure des communautés de nématodes et de collemboles 70
Figure 9 : Posters destinés à la communauté scientifique internationale 82
Figure 10 : Plaquette d'information du programme RMQS BioDiv..... 86

Tableau 1 : Richesse taxonomique, par groupes biologiques, identifiée sur les sites RMQS BioDiv 59
Tableau 2 : Synthèse des mises en relation des paramètres biologiques avec les variables explicatives 66
Tableau 3 : Matrice de corrélation de Spearman entre paramètres biologiques globaux (N = 89 sites)..... 68
Tableau 4 : Résultats des co-inerties entre structure des communautés de différents groupes biologiques..... 69
Tableau 5 : Synthèse des informations renseignées par les paramètres biologiques et leur niveau d'utilisation .. 75

Bibliographie

ADEME, 2004 - Développement de bioindicateurs permettant de caractériser l'état du sol et son fonctionnement biologique. Appel à projets "Bioindicateurs".

Anderson J.P.E., and Ingram J.S.I., 1993 - Tropical Soil Biology and Fertility. A Handbook Of Methods. CAB International. Oxon, UK, 44-6.

Andrassy I., 1984 - Klasse Nematoda (Ordnungen Monhysterida, Desmoscolecida, Araeolaimida, Chromadorida, Rhabditida). Akademie-Verlag, Berlin.

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

Bongers T., 1994 - De nematofen van Nederland. K.N.NV., Utrecht.

Bouché M.B., 1972 - Lombriciens de France. Ecologie et systématique. INRA, Paris.

Briard C., 2009 – Caractérisation taxonomique des espèces lombriciennes du genre *Lumbricus* (Oligochaeta: Lumbricidae) - confrontation des phylogénies moléculaire et morphologique. Rapport de Master 2, Université de Rennes 1. 30p

Cannavacciuolo M., 1998 - Biodiversité et structure spatiale de la faune lombricienne dans une prairie temporaire de l'ouest de la France. *Thèse de doctorat*, Université de Rennes 1. 152p

Chaussod R., Houot S., Guiraud G. and Hétier J.M., 1988 - Size and turnover of the microbial biomass in agricultural soils: laboratory and field measurements. ***In :*** Nitrogen efficiency in agricultural soils and the efficient use of fertilzer nitrogen, Jenkinson & Smith, Eds., Elsevier Applied Science (London), pp 312-326.

Chessel D., Mercier P., 1993 - Couplage de triplets statistiques et liaisons espècesenvironnement. In : Biométrie et Environment. Lebreton, J.D. & Asselain, B. (Eds.) Masson, Paris. 15-44.

Cluzeau D., Trehen P., 1987 - Approche descriptive du système lande en Bretagne centrale dans les inter-relations Sol-Végétation-Faune édaphique après apports massifs de déchets ménagers broyés. Rev. Ecol. Biol. Sol, 24 (4) : 649-664.

Cluzeau D., 1992 - Structure et Dynamique des Peuplements Lombriciens dans des systèmes tempérés anthropisés. *Thèse de Doctorat*, Université de Rennes 1 (mention Très Honorable avec félicitations du Jury).

Cluzeau D., Cannavacciulo M., Péres 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, p 25-35

Cluzeau D., Pérès G., Decaens T., Bureau F., Grandin V., & Giteau J.L., 2003 - Caractérisation macrobiologique des sols agricoles tempérés : évaluation des lombriciens et de leurs activités. *COMIFER-GEMAS,* p145-155.

Cluzeau D., Pérès G., Guernion M., Chaussod R., Cortet J., Fargette M., Martin-Laurent F., Mateille T., Pernin C., Ponge J-F., Ruiz-Camacho N., Villenave C., Rougé L., Mercier V., Bellido A., Cannavacciuolo M., Arrouays D., Boulonne L., Jolivet C., Lavelle P., Velasquez E., Plantard O., Walter C., Foucaud-Lemercier B., Tico S., Giteau J-L., Bispo A., 2009 - Intégration de la biodiversité des sols dans les réseaux de surveillance de la qualité des sols : exemple du programme-pilote à l'échelle régionale, le RMQS *BioDiv*. *Etude et Gestion des sols,* AFES. Sous presse.

Dolédec S., Chessel D., 1994 - Co-inertia analysis: an alternative method for studying species-environment relationships. *Freshwater Biology*. 31: 277-294.

ISO 14.240-2 :1997 - Qualité du sol Détermination de la biomasse microbienne du sol. Partie 2 : Méthode par fumigation-extraction.

ISO 23611-1 :2006 - Qualité du sol -- Prélèvement des invertébrés du sol -- Partie 1: Tri manuel et extraction au formol des vers de terre

ISO 23611-2 :2006 - Qualité du sol -- Prélèvement des invertébrés du sol -- Partie 2: Prélèvement et extraction des micro-arthropodes (Collembola et Acarina)

ISO 23611-4 :2007 - Qualité du sol -- Prélèvement des invertébrés du sol -- Partie 4: Prélèvement, extraction et identification des nématodes du sol

ISO CD/11063. Qualité des sols – Méthode pour extraire directement l'ADN d'échantillons de sol

ISO/CD 23611-5 - Qualité du sol -- Prélèvement des invertébrés du sol -- Partie 5: Prélèvement et extraction des macro-invertébrés du sol

ISO/DIS 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.

Jairajpuri M.S., Ahmad W., 1992 - Dorylaimida Free-living, predaceous and plant-parasitic nematodes. Drill, E.J.

Jolivet C., Boulonne L., Ratié C., 2006 - Manuel du Réseau de Mesures de la qualité des Sols. Edition 2006, Unité Infosol, INRA Orléans, France, 190p.

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

Lopez-Gutiérrez J.-C., Henry S., Hallet S., Martin-Laurent F., Catroux G., Philippot L., 2004 - Quantification of a novel group of nitrate-reducing bacteria in the environment by real-time PCR. *J. Microbiology Methods,* 57:399-407.

Maillant S., Cortet J., Masfaraud J.-F., Nahmani J., Pernin C., 2009 - Etude de la biodiversité de la faune du sol de la ZO OPE. Rapport final. Andra. pp. 53.

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

Merny G., Luc M., 1969 - Les techniques d'évaluation des populations dans le sol. *In*: Lamotte, M., Boulière, F. (Eds), *Problèmes d'écologie: l'échantillonnage des peuplements animaux dans les milieux terrestres*. Masson, Paris, pp. 257-292.

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. 253p.

Piron D., 2008 – Distribution de la drilosphère lombricienne et caractérisation bio-physique des faciès de bioturbation sous gradient de désintensification du travail mécanique des sols. *Thèse de doctorat*, Université de Rennes 1. 123p.

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: 1996-2001.

Ranjard L.; Lejon D.P.H.; Mougel C.; Schehrer L.; Merdinoglu D.; Chaussod R., 2003 - Sampling strategy in molecular microbial ecology: influence of soil sample size on DNA fingerprinting analysis of fungal and bacterial communities. *Environmental microbiology*, 5 (11): 1111-1120.

Siddiqi M.R., 2000 - Tylenchida Parasites of plants and insects. CABI.

Seinhorst J.W. 1962 - Modifications of the elutriation method for extracting nematodes from soil. *Nematologica*, 8 : 117-128.

Walter C., Chaussod R., Cluzeau D., Curmi P., Hallaire V., 2002 - Caractérisation, déterminisme et surveillance de la qualité des sols en milieu limoneux acide. Rapport final. Programme de recherche GESSOL. Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable. INRA – ENSA Rennes, INRA Dijon, CNRS.

Liens utiles

Programme ENVASSO

http://www.envasso.com/packages.htm

GIS Sol

http://www.gissol.fr/index.php

Programme RMQS

http://www.gissol.fr/programme/rmqs/rmqs.php

Programme Sol de Bretagne

http://www.sols-de-bretagne.fr/

Bretagne environnement

http://www.bretagne-environnement.org/

Table des annexes

Annexe I : Calendrier des réunions de travail et forums associés

Annexe II : Structure de la base : DonEcoSol

Annexe III : Valorisation

III.1 - Séminaire IGCS (Aix en Provence – 6 et 7 décembre 2007)

III.2 - Conférence « Sols agricole et développement durable » (Rennes – 11 septembre 2008)

III.3 - Conférence du réseau des partenaires du GIP Bretagne environnement (Rennes – 4 décembre 2008)

III.4.-.Workshop on Statistical Aspects of National Scale Soil Monitoring (Rothamsted – 11 et 12 décembre 2008)

Annexe IV : Les variables explicatives

IV.1 - Paramètres physico-chimiques

IV.2 - Paramètres « occupation du sol »

IV.3 - Paramètres pratiques agricoles

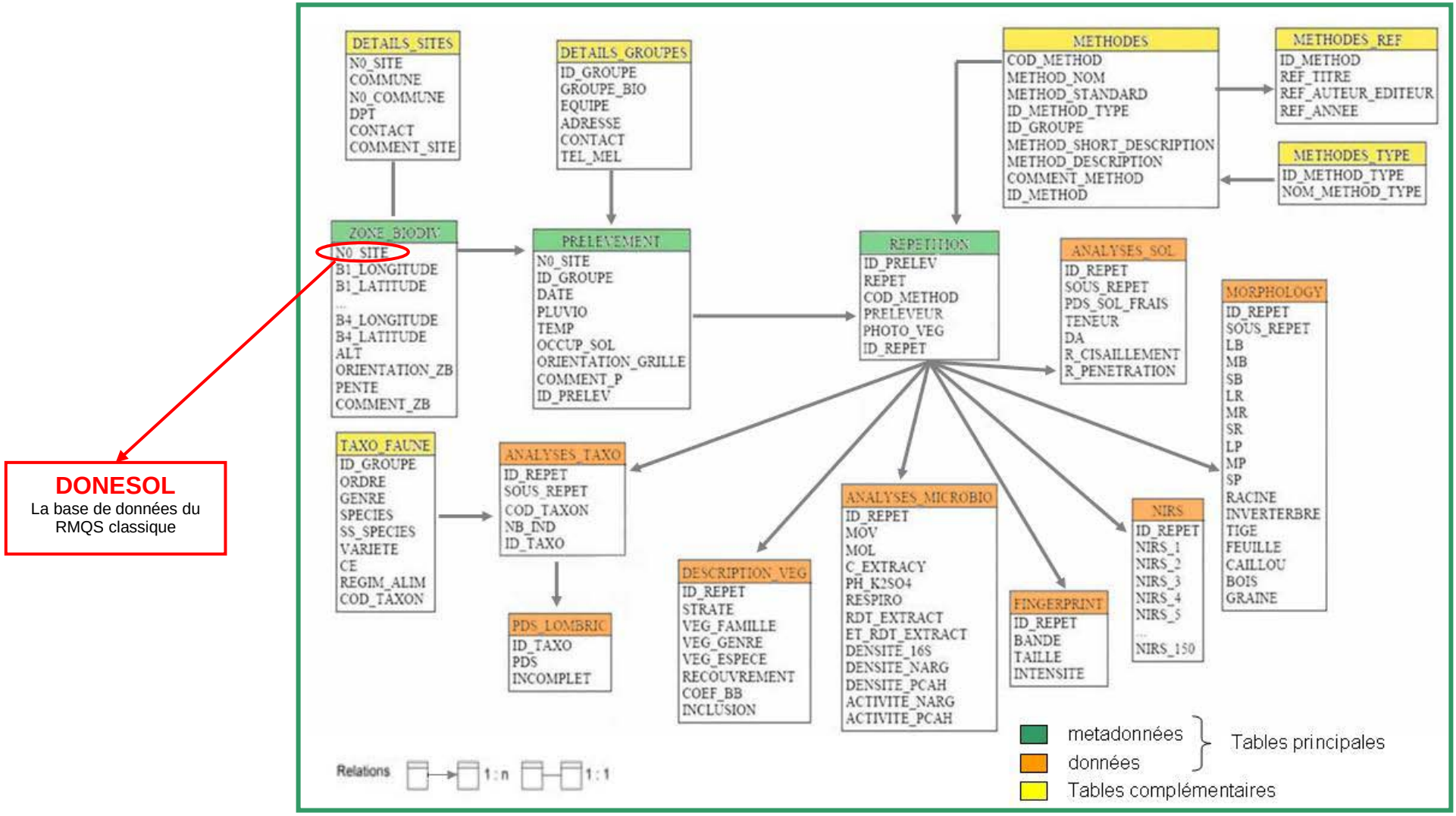
IV.4 - Paramètres pédologiques

Annexe I : Calendrier des réunions de travail et forums associés

Type de réunion	Précision	Lieu et date
Réunion scientifique	Finalisation du programme	Paris – 29 septembre 2005
Réunion « Sols de Bretagne »	Début de programme	Rennes – 12 octobre 2005
Réunion générale	Préparation campagne 2006	Rennes – 1 décembre 2005
Réunion scientifique	Etat d'avancement des équipes partenaires	Paris – 4 octobre 2006
Réunion « Sols de Bretagne »	Conseil scientifique	Rennes – 20 octobre 2006
Réunion générale	Restitution Année 1 et organisation Année 2 Discussions scientifiques thématiques	Paimpont – 11 et 12 janvier 2007
Réunion « Sols de Bretagne »	RIEB et base de données	Rennes - 25 avril 2007
ENVASSO	Organisation d'un séminaire ENVASSO	Paimpont – 2 au 4 mai 2007
Transfert	Journée AFES	Bretagne – 11 mai 2007
Réunion avec les partenaires des Chambres d'Agriculture de Bretagne	Concertation sur l'exploitation des enquêtes parcellaires	Kerguéhennec – 31 mai 2007
ADEME – Bio1	Etat d'avancement des projets	Angers – 3 et 4 juillet 2007
Réunion scientifique	Proposition de traitement de données	Paris – 17 septembre 2007
ENVASSO	Participation au colloque final ENVASSO	Bordeaux – 21 au 23 novembre 2007
Réunion avec les partenaires des Chambres d'Agriculture de Bretagne	Traitement des enquêtes agricoles	Rennes – 9 janvier 2008
Réunion générale	Bilan d'avancement des équipes partenaires	Dijon – 14 au 16 janvier 2008
ADEME – Bio1	Présentation des 1er résultats du RMQS *BioDiv* et préparation du programme ADEME - Bio2	Angers -1 au 3 avril 2008
Réunion scientifique	Stratégie de communication	Angers – 3 au 4 avril 2008
Réunion « Nématodes »	Traitement des données nématodes	Montpellier – 13 au 15 mai 2008
Réunion « Microbiologie »	Traitement des données microbiologie	Dijon – 16 mai 2008
Réunion générale	Bilan d'acquisition des données Présentation des 1er résultats Organisation pour rédaction des rapports	Paimpont – 19 au 21 janvier 2009
Réunion « Nématodes »	Etat d'avancement des rapports	Montpellier – 25 au 26 mars 2009
Réunion avec les partenaires des Chambres d'Agriculture de Bretagne et l'unité INRA Infosol d'Orléans	Discussion sur les variables explicatives issues des enquêtes agricoles	Rennes – 26 juin 2009

Les réunions téléphoniques ne sont pas recensées

Annexe II : Architecture (schéma logique) de la base DonEcoSol



DONECOSOL

Annexe III : Valorisation

III.1 - Séminaire IGCS (Aix en Provence – 6 et 7 décembre 2007)

Programme prévisionnel du Séminaire IGCS
Aix en Provence, 6 et 7 décembre 2007

Organisme d'accueil : Société du Canal de Provence

Jeudi 6 décembre 2007

8h30-9h30 Accueil – café

9h30-10h00 – Introduction du séminaire

Mr le Directeur de la Société du Canal de Provence
Mr le XXXX du Conseil Régional
Mr le Directeur Régional de l'Agriculture et de la Forêt

10h00 - Première séance : Avancement des programmes nationaux et exemple régional

Programmes nationaux, Président de séance : *Jean-Claude Lacassin*

10h00-10h25. Le programme Inventaire Gestion et Conservation des Sols. *Nathalie Schnebelen et al.*

10h25-10h50. Le programme Réseau de mesures de la Qualité des Sols. *Claudy Jolivet et al.*

10h50-11h15. Le programme Bases de Données d'Analyses de Terre. *Blandine Lemercier et al.*

11h15-11h40 <Discussion>

Le programme en région PACA. Présidente de séance : *Marie-Laurence Madinier*

11h40-12h10 Le programme IGCS en région Provence-Alpes-Côte d'Azur. *Jean-Claude Lacassin*

12h10-12h30 Remise officielle du label de qualité au Département du Var. *Marie-Laurence Madinier*

12h30-13h15 Vin d'honneur. Point presse.

13h15-14h15. Repas, posters

14h15-15h45. Quatre ateliers en parallèle

Atelier 1. Les applications de la cartographie numérique pour la pré-délimitation des pédopaysages. Le point sur les tests en Région. Animateur, *Dominique Arrouays*, Rapporteur, *Christian Walter*

Atelier 2. Retours d'expérience sur l'organisation de journées régionales et des actions de sensibilisation ? Animateur, *Jean-Luc Fort*, rapporteur, *XXXX (à définir)*

Atelier 3. Le décret Zones Humides, place d'IGCS ? Animatrice, *Nathalie Schnebelen*, Rapporteur, *Aurélie Tisserand*

Atelier 4. Les sols et l'aménagement du territoire. Animateur, *Jean Claude Lacassin*, Rapporteur, *Delphine Vitali*

15h45-16h30 Pause, posters

16h30. Deuxième séance : exemples de programmes et d'applications régionales. Présidente de séance : *Joëlle Sauter*

16h30-16h45 Quelques applications originales des bases de données sur les sols dans l'Indre. *Joël Moulin*

16h45-17h00 Applications du programme RMQS à la biodiversité dans les sols en Bretagne. *Daniel Cluzeau et al.*

17h00-17h15 Cinq minutes pour convaincre (3 exposés)

Le guide sur la délimitation des aleas d'érosion (Olivier Cerdan et al.)

Le guide « bassins versants » (Jean-Luc Fort et al.)

Le programme IGCS dans la Somme (François Groell et al.)

Exemples de programmes et d'applications régionales (suite)

17h15-17h35 L'avancement des programmes et la spécificité des sols hors de la métropole. *Michel Brossard et al.*

17h35-17h50 Une application générique pour la détermination des contraintes à l'épandage. *Manuel Martin et al.*

17h50-18h20. Discussion générale

18h20-18h30. Conclusions de la première journée. *Didier Rat*

****

Vendredi 7 décembre 2005

9h00. Troisième séance : Restitution des ateliers. Président de séance : *Jean - Marie Vinatier*

9h00-9h30 Restitution de l'atelier 1. *Christian Walter*

9h30-10h00 Restitution de l'atelier 2. *XXXX (à définir)*

10h00-10h30 Restitution de l'atelier 3. *Aurélie Tisserand*

10h30-11h00 Restitution de l'atelier 4. *Delphine Vitali*

11h00-11h45 Pause, posters

11h45-12h00. Cinq minutes pour convaincre

Le déroulement du projet Biosol-RMQS France. (Jean Pierre Renaud et al.)

Comparaison de méthodes de détermination du Phosphore assimilable à partir des données de la BDAT. (Christian Schvartz et al.)

J'ai tout saisi dans DoneSol. (Anne Richer de Forges)

12h00. Quatrième séance : les bases de données et leurs interfaces d'utilisation. Présidente de séance : *Christine Le Bas*

12h00-12h20 En route vers Donesol 3. *Benoît Toutain*

12h20-12h40 Le projet Websol. *Jean-Marie Vinatier*

12h40-13h15 Discussion générale

13h15-14h15 Repas

14h15-16h00. Cinquième séance : Une ouverture européenne. Président de séance : Didier Rat

14h15-14h35. Le point sur la stratégie européenne de protection des sols. *Luca Montanarella*

14h35-14h55. Le règlement LIFE+. *Un représentant du MEDAD ou de la DG Env (à définir)*

14h55-15h45. Discussion générale

15h45-16h00. Conclusion générale et clôture du séminaire. *Pierre Stengel*

III.2 - Conférence « Sols agricole et développement durable » (Rennes – 11 septembre 2008)

SITMAFGR
Agroéquipement - Environnement - Ruralité

FORUM DE L'AGRICULTURE RAISONNÉE RESPECTUEUSE DE L'ENVIRONNEMENT
FARRE

A l'occasion du SPACE, la SITMAFGR et FARRE organisent une conférence sur le thème de

Sols agricoles et développement durable

Sous la présidence de Mme Christiane Lambert, vice-présidente de la FNSEA*

- Introduction : **Jean-Paul De Wispelaere**, président de la SITMAFGR*
- La directive européenne sur les sols : quel impact pour l'agriculture française ?
  par **Didier Rat**, ministère de l'Agriculture et de la Pêche - DGPAAT*
- De nouveaux outils de connaissance et de surveillance des sols à l'échelle régionale
  par **Christian Walter** - Inra* Rennes
- Etat des lieux des pratiques de techniques culturales sans labour en Bretagne
  par **Djilali Heddadj** - Chambre d'agriculture du Morbihan
- Fertilité des sols : pratiques adaptées
  par **Jean-Jacques Chitrit**
- Vers des bio-indicateurs de la qualité des sols
  par **Daniel Cluzeau** - Université Rennes 1
- Qualité d'épandage des fertilisants organiques
  par **Marc Rousselet** - Cemagref* Clermont-Ferrand et **Pierre Havard** - Chambre d'agriculture d'Ille-et-Vilaine
- Connaissance des sols et préservation de la ressource en eau
  par **Jean-Luc Fort** - Chambre régionale d'agriculture Poitou-Charentes (pour le groupe national « Projets » du Programme Inventaire Gestion et Conservation des Sols)
- Conclusion : **Bernard Guidez**, président de Farre*

* SITMAFGR : association Agroéquipement - Environnement - Ruralité
FNSEA : Fédération nationale des syndicats d'exploitants agricoles
DGPAAT : Direction générale des politiques agricole, agroalimentaire et des territoires du ministère de l'Agriculture et de la Pêche
Inra : Institut national de recherche agronomique
Cemagref : Institut de recherche pour l'ingénierie de l'agriculture et de l'environnement
Farre : Forum de l'agriculture raisonnée respectueuse de l'environnement

TOTAL

Jeudi 11 septembre 2008
de 9h00 à 12h30
SPACE de RENNES
salle C, Espace Europe

SPACE 2008

Groupama
Donnons à la vie toutes ses chances.

SITMAFGR - Société des Ingénieurs et Techniciens du Machinisme Agricole et Association Française du Génie Rural
19 rue Jacques Bingen - 75017 Paris - Tél : 01 42 12 85 90 - Fax : 01 40 54 95 60 - www.sitmafgr.com

III.3.-.Conférence du réseau des partenaires du GIP Bretagne environnement (Rennes – 4 décembre 2008)

bretagne-environnement.org
RESEAU D'INFORMATION

Conférence du réseau des partenaires du GIP Bretagne environnement

Des retours d'expériences sur l'observation du patrimoine naturel, sur l'observation des sols et sur l'information du public
à Rennes – Espace Anne de Bretagne, rue Martenot - Conseil général d'Ille-et-Vilaine
le 4 décembre 2008 à partir de 14h

Accueil des participants : 13h30 – 14h

Ouverture (14h–14h30)

Discours introductif Etat – Région (20 min) :
Participants à préciser
Présentation de la nouvelle plateforme Internet et des grands projets 2009 : Ronan Lucas (Directeur du GIP Bretagne environnement 10 min)

Atelier 1 (14h35-17h00)
L'observation du patrimoine naturel

L'objectif de cet atelier est d'expliquer les outils, les moyens, les contraintes et les difficultés liées à l'observation du patrimoine naturel à différentes échelles de territoire et avec différents outils.

Animation/introduction	François Siorat (GIPBE)	*10' (14h35 à 14h45)*
Approche nationale	Romain Julliard (MNHN)	*20'+5' (de 14h45 à 15h10)*
Vigie Nature		
Approche régionale	Sylvie Magnanon (CBNB)	*20'+5' (de 15h10 à 15h35)*
Des outils au service des observateurs		
Approche départementale	Gérard Garnier (CG29)	*20'+5' (de 15h35 à 16h00)*
Guide méthodologique d'inventaire des zones humides		
Approche départementale	Jérémy Allain (VivArmorNature)	*20'+5' (de 16h00 à 16h25)*
Sciences participatives et observations sur le long terme		
Approche régionale	François Siorat (GIPBE)	*15' (de 16h25 à 16h40)*
Observatoire du patrimoine naturel en Bretagne : objectifs, missions, fonctionnement, axes majeurs d'actions		
Parole à la salle		*Jusqu'à 17 h 00*

Atelier 2 (14h35-17h00)
L'information du public

L'objectif de cet atelier est d'expliquer les outils, les moyens, les contraintes, les difficultés, etc. liés à l'information du public à différentes échelles de territoire et avec différents outils.

Animation/introduction	Ronan Lucas (GIPBE)	*10' (14h35 à 14h45)*
Approche nationale	Prim.net (Meeddat)	*20'+5' (de 14h45 à 15h10)*
Présentation du site Prim.net (Les risques dans ma commune), des statistiques de consultation et des demandes des internautes – Résultat de l'enquête en ligne actuellement : qui utilise ce site ? pourquoi ? La cible visée (commune) est-elle réellement atteinte ?		
Approche régionale	Gilles Huet (Eau et rivières)	*20'+5' (de 15h10 à 15h35)*
Présentation de l'évolution sur 30 ans de la demande d'information des citoyens, impact d'Internet dans le partage de l'information		
Approche départementale	Pascale Géraud (CG35)	*20'+5' (de 15h35 à 16h00)*
Présentation de « Illeco », outil multimédia d'éducation à l'environnement pour les collégiens diffusé en 2006 dans les collèges d'Ille et vilaine : quelle utilisation de l'outil ? Quelles évolutions prévues ? quels retours par les professeurs ?		
Approche locale	M. Mellec (Association CŒUR)	*20'+5' (de 16h00 à 16h25)*
Consultation des usagers pour la rédaction d'un livre blanc sur l'avenir de l'estuaire de la Rance : « Quels paysages veut-on pour la Rance de Dinan à St-Malo ? », conséquences des évolutions des dernières décennies sur toutes les composantes du paysage : 127 personnes, 13 groupes, 23 communes = 694 idées ; 64 élèves de lycées = 134 idées .... Au-delà du sujet traité, c'est surtout la démarche qui sera présentée dans cet atelier.		
Approche régionale	(GIPBE)	*15' (de 16h25 à 16h40)*
Présentation et diffusion du rapport d'analyse des demandes d'information des internautes sur la plateforme web de Bretagne environnement sur la période 2007-2008		
Parole à la salle		*Jusqu'à 17 h 00*

Atelier 3 (14h35-17h00)
L'observation des sols

L'objectif de cet atelier est de présenter l'état d'avancement du programme régional multipartenaires « Sols de Bretagne » lancé en 2005, de montrer l'importance du croisement des compétences (paysages, géologie, biologie, pédologie, etc.) ainsi que les liens entre les programmes/actions européens / nationaux / régionaux / locaux.

Animation/introduction	Christian Walter (Agrocampus)	*10' (14h35 à 14h45)*
Approche nationale	Blandine Lemercier (Agrocampus)	*20'+5' (de 14h45 à 15h10)*
Présentation du programme Gis Sols : résumé des objectifs, positionnement national par rapport aux autres pays de l'UE en terme de connaissance, état d'avancement national, résultats et conséquences en terme d'actions		
Approche régionale	Anne-Laure Lebris (Agrocampus)	*20'+5' (de 15h10 à 15h35)*
Présentation du programme Sols de Bretagne - volet IGCS : Bilan initial des connaissances des sols bretons, démarche et moyens mis en œuvre, état d'avancement, premiers résultats (carte des pédopaysages bretons?), perspectives		
Approche régionale	D. Cluzeau (Agrocampus)	*20'+5' (de 15h35 à 16h00)*
Le suivi de la qualité des sols - Volet RMQS BioDiversité		
Approche départementale		*20'+5' (de 16h00 à 16h25)*
A définir		
Approche locale	L. Berthier	*15' (de 16h25 à 16h40)*
Applications/utilisations des données Sol pour l'amélioration de l'estimation de l'indice de sécheresse (utilisé par les Chambres d'Agriculture) et la définition de zones sensibles à l'érosion		
Parole à la salle		*Jusqu'à 17 h 00*

Clôture de la conférence (17h05-17h30)

- Retour en session plénière avec restitution : 5 minutes par atelier (17h05-17h20)
- Discours de clôture (Président du GIP) : 10 minutes (17h20-17h30)

III.4.-.Workshop on Statistical Aspects of National Scale Soil Monitoring (Rothamsted – 11 et 12 décembre 2008)

Workshop on Statistical Aspects of National Scale Soil Monitoring

Thursday 11th – Friday 12th December 2008
Rothamsted Conference Centre

Thursday 11th December

9:00	Coffee
Session1	Chair: Murray Lark
9:15	Introduction & Welcome **Murray Lark**
9:30	Keynote Talk on design of monitoring networks **Dick Brus**
10:20	Options for a UK Soil Monitoring Network to assess status and change in soil indicators **Helaina Black**, P Booth, P Bellamy, D Elston, B Emmett, Z Frogbrook, C Jordan, M Lark, B Marchant, J Potts
10:45	Sampling and analytical plus subsampling variance components for five soil indicators observed at regional scale. **B. G. Rawlins**, A.J. Scheib, R.M. Lark, T.R. Lister
11:10	Soil Monitoring in Australia **Pat Bellamy**
11:35	Coffee
11:55	Breakout Session 1: Design of National Scale Monitoring Networks Conveners: Andreas Papritz and Gerard Heuvelink
13:00	Buffet Lunch
Session 2:	Chair: Ron Corstanje
14:00	Soil monitoring in the Countryside Survey **Andy Scott**
14:25	Some Statistical Aspects of National-Scale Soil Monitoring in Slovakia **Jozef Kobza**
14:50	Keynote Talk on communications between statisticans and policy makers **Peter Loveland**
15:30	Coffee
15:50	Breakout Session 2 Communications between statisticians and policy makers Conveners Helaina Black and Pat Bellamy
17:00	End of session
19:00	Workshop dinner, Lewis Hall Restaurant

Friday 12th December

08:30	Tea/coffee available
Session 3	Chair: Ben Marchant
09:00	How to manage and analyse a large biodiversity data set: the case of the regional "RMQS BioDiv" experience ? **Guenola Peres**
09:25	Catchment-scale soil hydrology monitoring in Panama: Estimating the spatial mean temporal trend of soil saturated hydraulic conductivity **Beate Zimmermann**, Sibylle Hassler
09:50	Soil organic matter and microbial respiration monitoring in the Hungarian Soil Information and Monitoring System Erika Michéli, Gyula Árvay, Gabriella Sz. Kele, Judit Berényi-Üveges, **Anita Gál**, István Waltner
10:15	Keynote talk on analysis of national scale soil monitoring schemes **Dominique Arrouays**
11:05	Coffee
Session 4	Chair: Zoë Frogbrook
11:30	Statistical upscaling of terrestrial greenhouse gas emissions **G.B.M. Heuvelink**, W. De Vries, T. Hoogland, J. Kros and G.J. Reinds
11:55	Correcting temporal instabilities of chemical measurements in long-term forest soil monitoring **A. Papritz**, U. Gasser
12:20	Estimation of the variance of spatial means from grid-based monitoring schemes **Jackie Potts**
12:45	Buffet Lunch
Session 5	Chair: Murray Lark
13:30	Predicting mean groundwater levels in space and time for nature reserves in the Netherlands **T. Hoogland**, G.B.M. Heuvelink and M. Knotters
13:55	Soil moisture patterns: Hierarchical controls, coupling spatial and temporal dimensions, and implications for optimal monitoring design **Henry Lin**
14:20	Estimation of measurement uncertainty arising from analysis and sampling, for more effective use of soil monitoring data. **Michael H Ramsey**
14:45	Breakout Session 3 Analysis of National Scale Soil Monitoring Schemes Conveners Richard Webster and Barry Rawlins
16:00	Close of workshop

Annexe IV : Variables explicatives

Pour expliquer les données biologiques du programme RMQS *BioDiv*, les résultats du RMQS « classique » ont été utilisés. Il s'agit de paramètres physico-chimiques, de données pédologiques et d'information sur les pratiques agricoles qui sont renseignés dans la base de données DONESOL gérée par l'unité InfoSol d'Orléans.

IV.1 - Paramètres physico-chimiques

Les analyses physico-chimiques sont effectuées sur l'échantillon composite de sol prélevé sur la zone RMQS de 20x20 m. Les variables physico-chimiques concernent 37 paramètres d'analyses chimiques, d'éléments échangeables, d'éléments traces extractibles et totaux sur l'horizon 0-30 cm.

Modalité	Explication	Unités
	Analyses chimiques	
CARBONE	carbone	g/kg
AZOTE_TOT	azote total	g/kg
PH_EAU	ph de l'eau	
CEC	cec	cmol+/kg
P_ASS	P_ass : phosphore Olsen	g/kg
	éléments échangeables	
CA_ECH	calcium échangeable	cmol+/kg
MG_ECH	magnésium " " "	cmol+/kg
K_ECH	potassium " " "	cmol+/kg
NA_ECH	sodium " " "	cmol+/kg
AL_ECH	aluminium " " "	cmol+/kg
MN_ECH	manganèse	cmol+/kg
FE_ECH	fer ech	
FE_LIB	fer libre	g/100g
	éléments traces extractibles	
B_EXT	bore soluble	mg/kg
CD_EXT	cadmium extractible	mg/kg
CR_EXT	chrome " " "	mg/kg
CU_EXT	cuivre " " "	mg/kg
NI_EXT	nickel " " "	mg/kg
PB_EXT	plomb " " "	mg/kg
ZN_EXT	zinc " " "	mg/kg
	éléments traces totaux	
AL_TOT	aluminium total	g/100g
CA_TOT	calcium " " "	g/100g
FE_TOT	fer " " "	g/100g
K_TOT	potassium " " "	g/100g
MG_TOT	magnésium " " "	g/100g
NA_TOT	sodium " " "	g/100g
CD_TOT	cadmium " " "	mg/kg
CO_TOT	cobalt " " "	mg/kg

CR_TOT	chrome " " "	mg/kg
CU_TOT	cuivre " " "	mg/kg
MN_TOT	manganèse " " "	mg/kg
MO_TOT	molybdène " " "	mg/kg
NI_TOT	nickel " " "	mg/kg
PB_TOT	plomb " " "	mg/kg
TL_TOT	thallium " " "	mg/kg
ZN_TOT	zinc " " "	mg/kg
	variable calculée	
C/N	Carbone/Azote total	

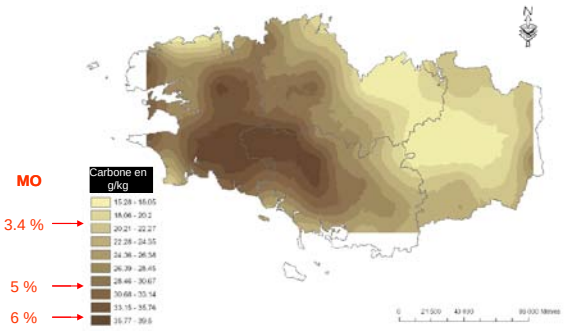
NB : Le site 656 présente des valeurs très extrêmes en CO, CR et NI total qui sont liées au substrat géologique : la « serpentine ».

Quelques paramètres physico-chimiques présentent une structuration spatiale dont notamment le carbone, le sodium, le thalium et le potassium.

Absence de structure spatiale	Structuration sur faibles et moyennes distances (20-40 km)	Structuration sur fortes distances (60 km)
Fer échangeable, Aluminium échangeable, Aluminium total, Zinc	**Limons, Argiles, Sables** **Fer total, Cuivre, Chrome** **Calcium échangeable, Sodium, Potassium** **C/N, pH, CEC**	**Carbone, Thallium, Cobalt, Azote**

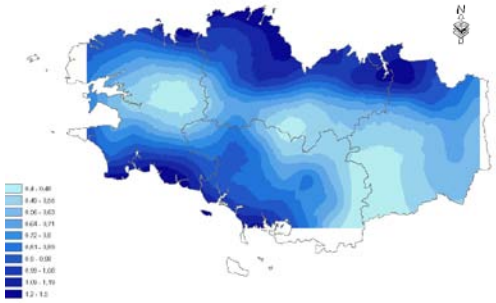
CARBONE

Carte de prévision du carbone obtenue par krigeage exponentiel

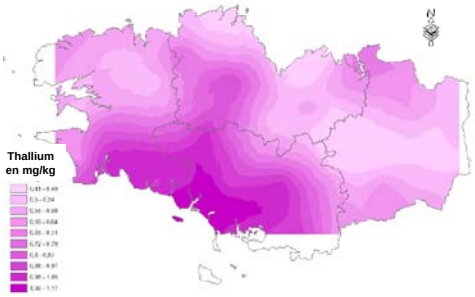


SODIUM

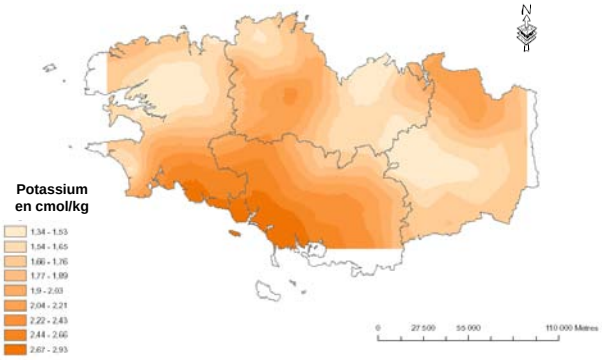
Carte de prévision du sodium obtenue par krigeage sphérique



THALLIUM



POTASSIUM



IV.2 - Occupation du sol

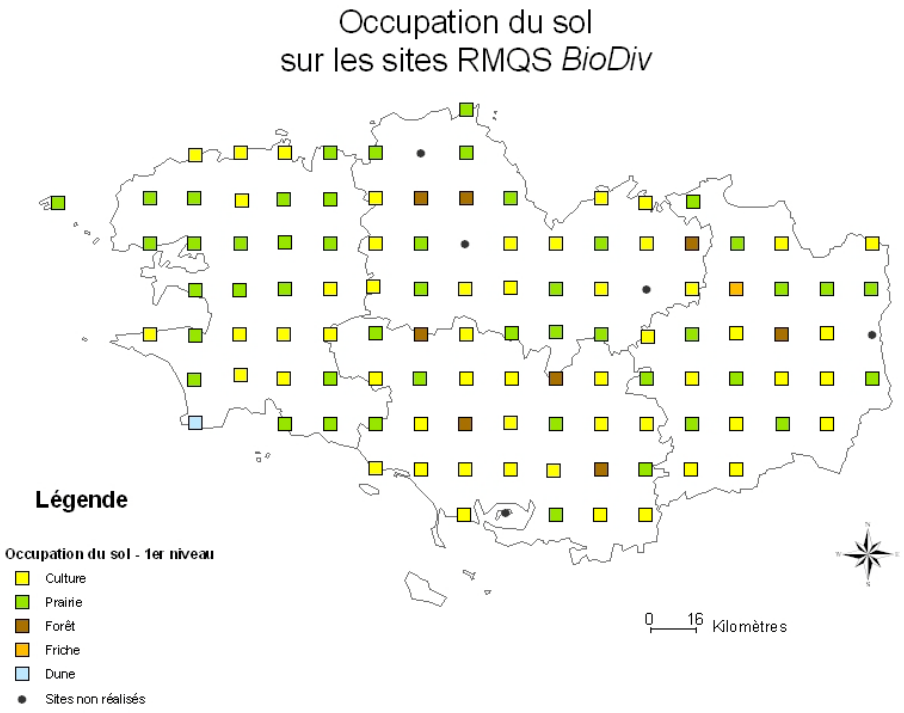
Les sites RMQS *BioDiv* ont été classés dans un premier niveau de partition (4 classes) selon l'occupation du sol (culture, prairie, forêt, autres) à laquelle ils appartiennent. Dans un second niveau de partition (6 classes), la classification de l'occupation du sol a été affinée en se basant, dans la mesure du possible, sur la codification FAO[10]. Pour les systèmes cultivés, une distinction est établie entre les systèmes toujours en grandes cultures (AA) et les systèmes en grandes cultures incluant des prairies dans la rotation (AA/M). Pour les systèmes prairiaux, les prairies temporaires (M/AA) sont dissociées des prairies permanentes (Mp).

Les paramètres d'occupation du sol (1ier et 2ième niveau) ne présentent pas de structuration spatiale à l'échelle régionale

[10] ftp://ftp.fao.org/docrep/fao/009/a0541e/a0541e00.pdf

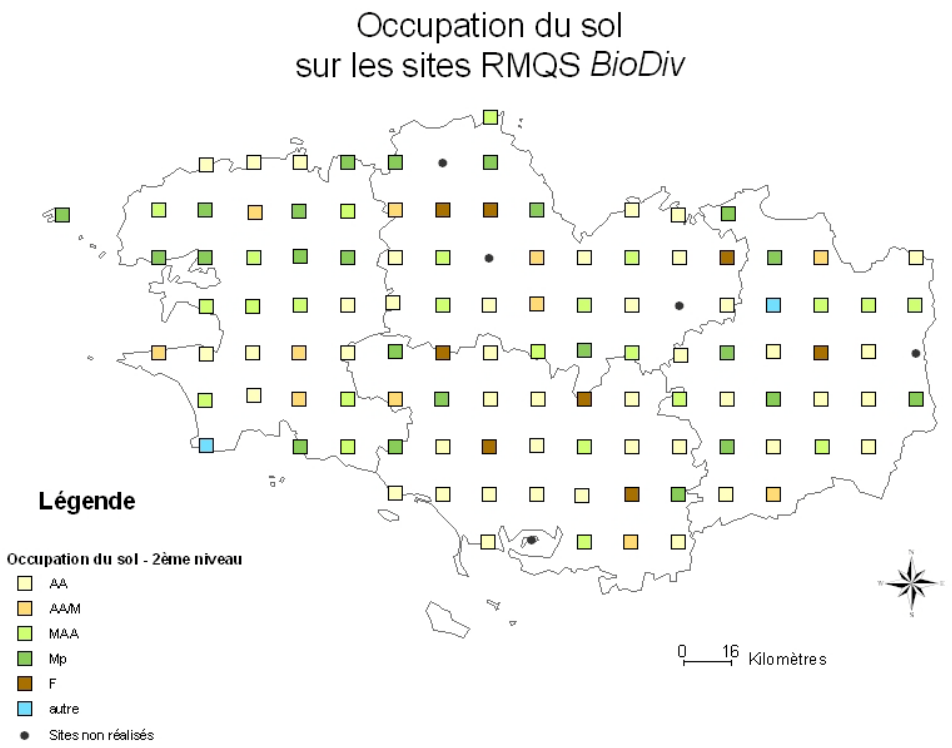
- **Occupation du sol** – 1ier niveau (4 modalités) :

Modalité	Explication	Nb site
C	Culture	52
P	Prairie	47
F	Forêt	8
autres	Dune (713) et Friche (551)	2



- **Occupation du sol** – 2ème niveau (6 modalités) :

Modalité	Explication	Nb site
F	Forêt	8
AA	Grande culture	42
Mp	Prairie permanente	23
AA/M	Culture dans rotation « grande culture -prairie»	11
M/AA	Prairie dans rotation « grande culture - prairie»	23
autres	Dune (713) et Friche (551)	2



IV.3 - Pratiques agricoles

Les pratiques agricoles sont renseignées grâce aux enquêtes agricoles réalisées pour chaque site RMQS. Les enquêtes agricoles fournissent de nombreux renseignements sur la parcelle et l'exploitation :

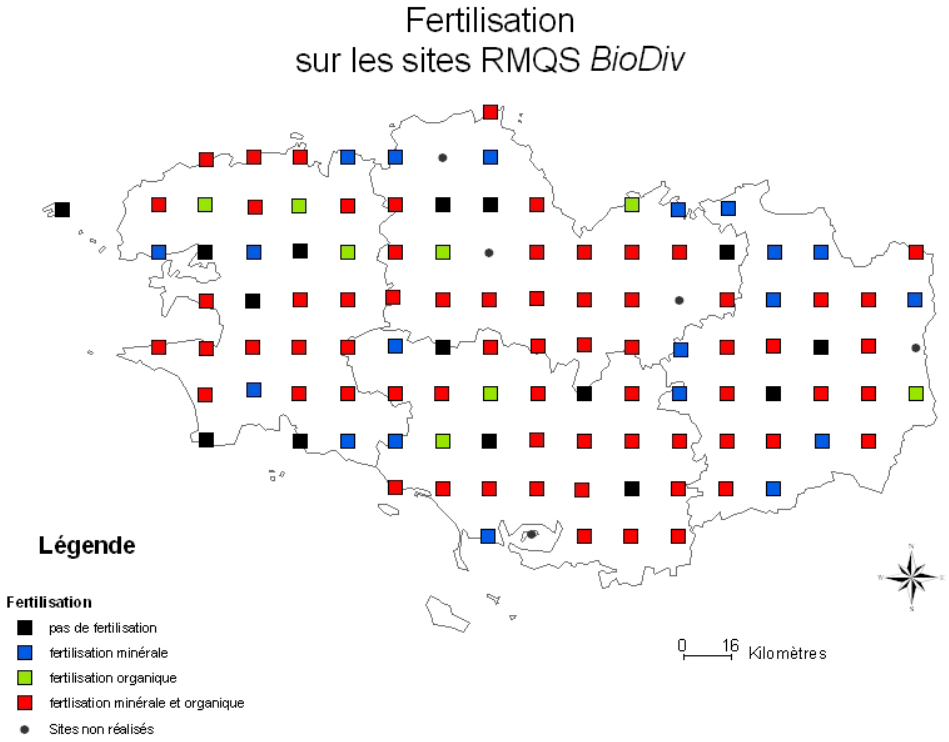
- Occupation du sol
- Système de gestion
- Fertilisation
- Pâturage
- Travail du sol
- Gestion phytosanitaire
- Couverture du sol

Le jeu de données d'enquêtes agricoles présente une forte hétérogénéité (liée aux différents questionnaires et différents enquêteurs). Ce jeu de données est donc particulièrement complexe et demande un certain nombre de vérifications. C'est pourquoi, dans le cadre des rapports RMSQ *BioDiv,* seules 4 variables de pratiques agricoles, dont l'information a pu être vérifiée, ont été utilisées. Il s'agit du type de fertilisation, de l'amendement et fertilisation organique du type de travail du sol et la présence ou non de traitements phytosanitaires.

Les variables de pratiques agricoles ne présentent pas de structuration spatiale à l'échelle régionale.

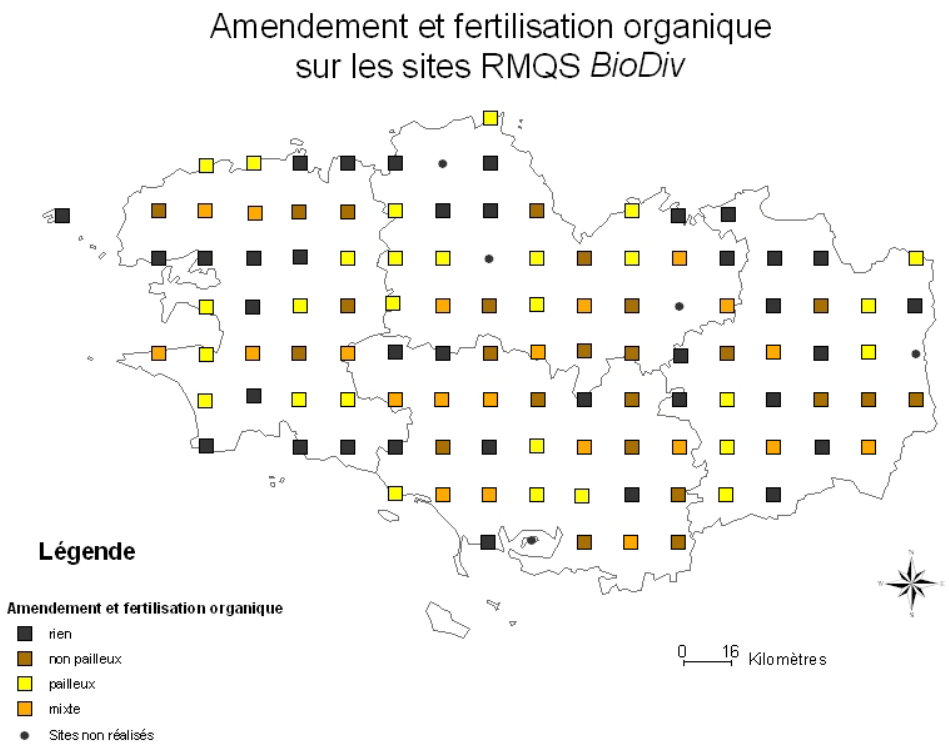
- **Fertilisation du sol** (4 modalités) :

Modalité/Explication	Nb site
Pas de fertilisation	16
Minérale	19
Organique	7
Organique et minéral	67



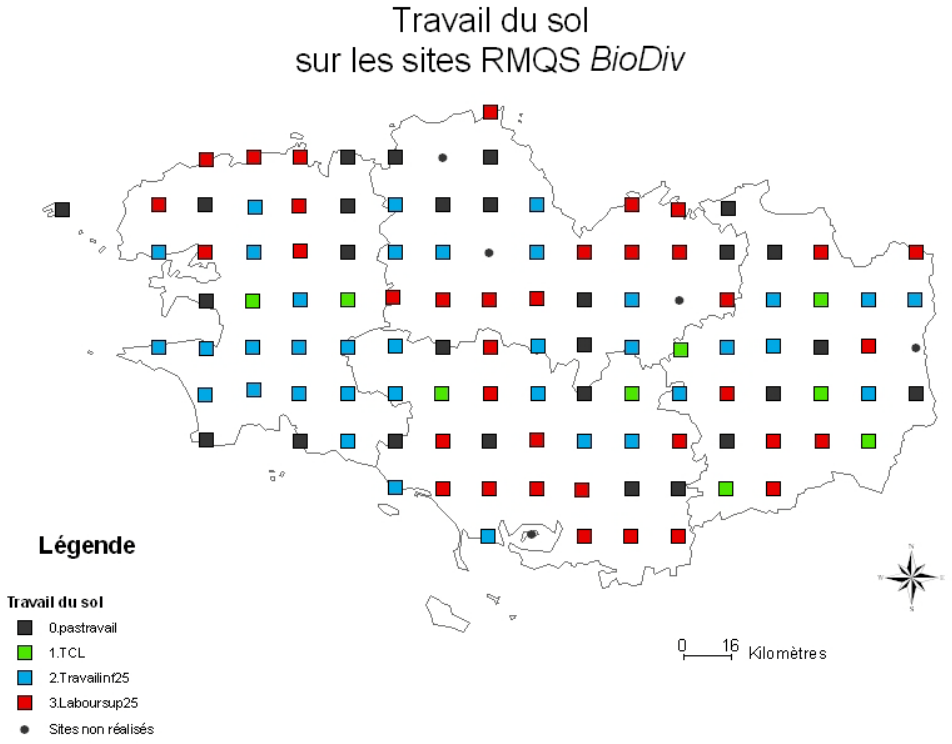
- **Amendement et fertilisation organique dans la fertilisation** (4 modalités) :

Modalité/Explication	Nb site
Rien (pas de fertilisation + minéral)	35
Non pailleux (lisier, fientes et purin)	27
Pailleux (fumier)	34
Mixte (fumier + lisier)	13



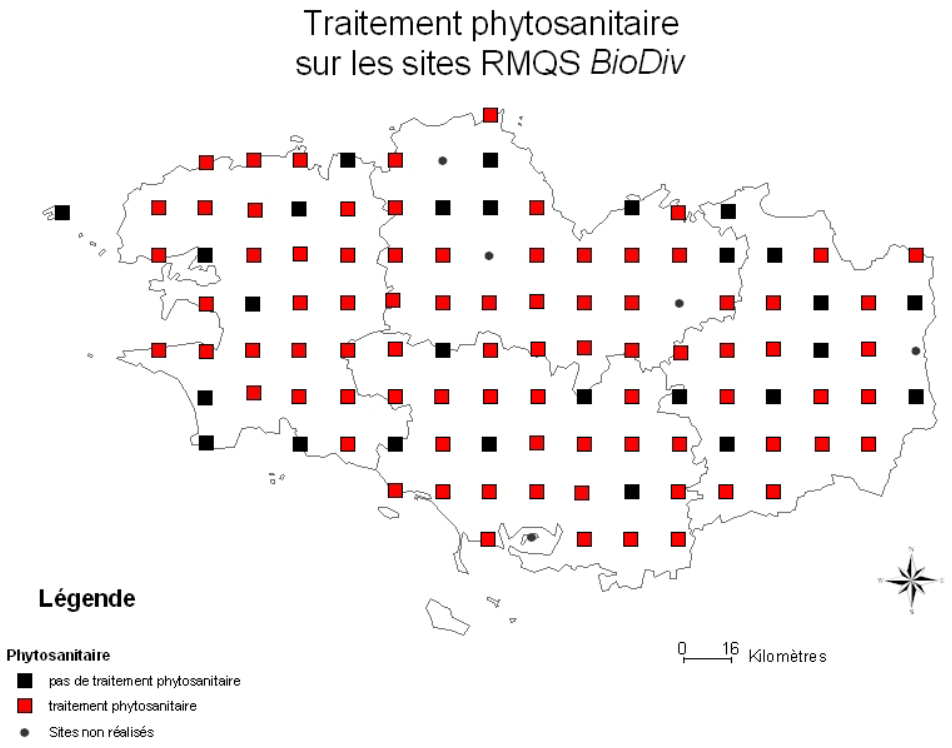
- **Travail du sol** (4 modalités) :

Modalité	Explication	Nb site
0	pas de travail	27
1	technique sans labour	9
2	travail inférieur à 25 cm	36
3	labour sup ou égal à 25	37



- **Traitements phytosanitaires** (2 modalités) :

Modalité	Explication	Nb site
0	pas de traitement phytosanitaire	27
1	traitement phytosanitaire	82



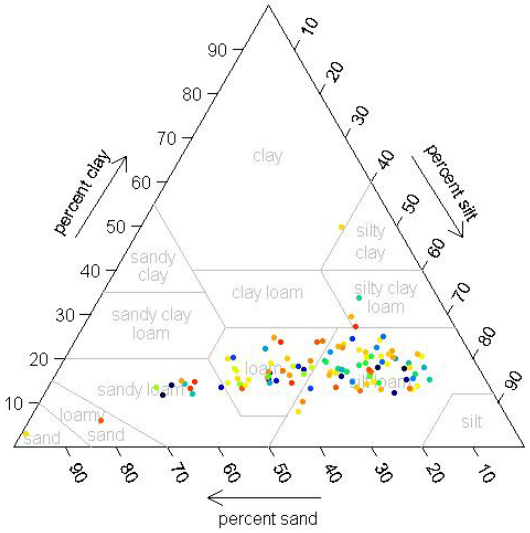
IV.4 – Paramètres pédologiques

Les informations pédologiques sont renseignées par la Fiche STIPA et synthétisé par le code tarière. Les données de texture sont également renseignées.

Les données de **texture** sont intégrées au jeu de données pédologiques. Il y a deux variables calculées (limons_tot et sables_tot) qui sont utilisée lorsque le nombre de variables doit être diminué.

- **Texture** :

Modalité
ARGILES
Limons fins
Limons grossiers
LIMONS_tot
Sables fins
Sables grossiers
SABLES_tot



Positionnement des sites RMQS
dans le triangle des textures (Triangle USDA)

Le **code tarière** (Rivière et *al.,* 1992) est code synthétique pour décrire les sols du Massif Armoricain. Il est renseigné par 4 critères :

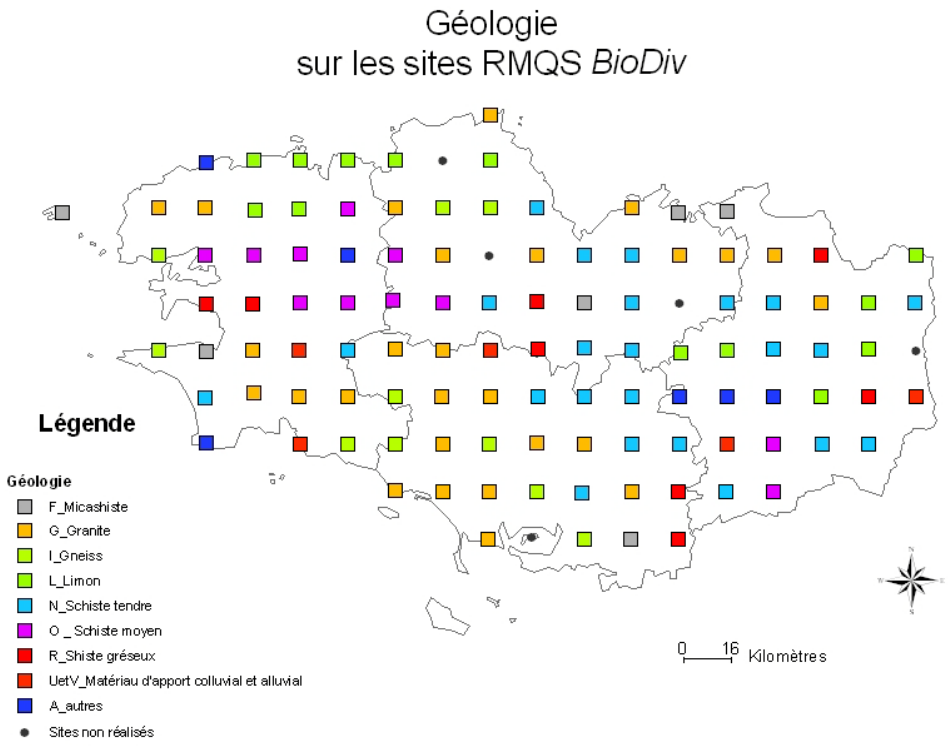
- **substrat géologique**
- **hydromorphie**
- **profil de sol**
- **profondeur**

Rivière J.M., Dupont C., Tico S., 1992 - Méthode tarière. Massif Armoricain – caractérisation des sols. Chambres d'Agriculture de Bretagne.

- **Substrat géologique** :

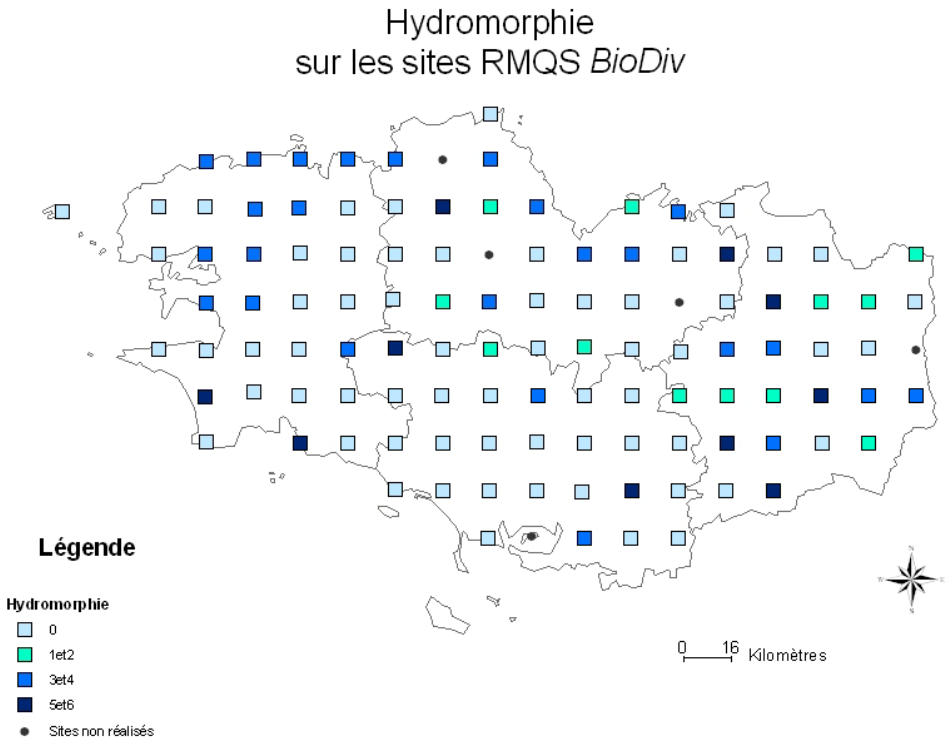
Modalité	Explication	Nb site
g_F	Micashiste	6
g_G	Granite	24
g_I	Gneiss	10
g_L	Limon	13
g_N	Schiste tendre	21
g_O	Schiste moyen	11
g_R	Schiste gréseux	8
g_U et V	Matériau d'apport colluvial et alluvial	5
autres	Sable (N = 2) ; Terrasse caillouteuse (N = 1) ; Grès dur (N = 2) ; Eboulis de pente (N = 1) ;	6

NB : Il y a parfois deux substrats géologiques possibles, ici seule la première possibilité (géol A) est présenté



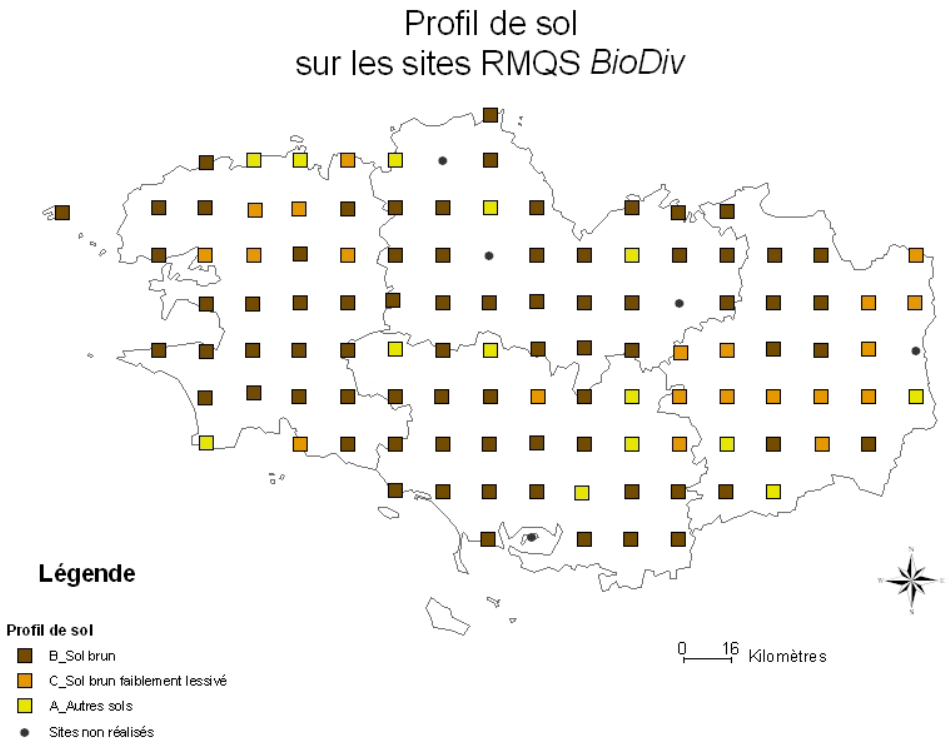
- **Hydromorphie** :

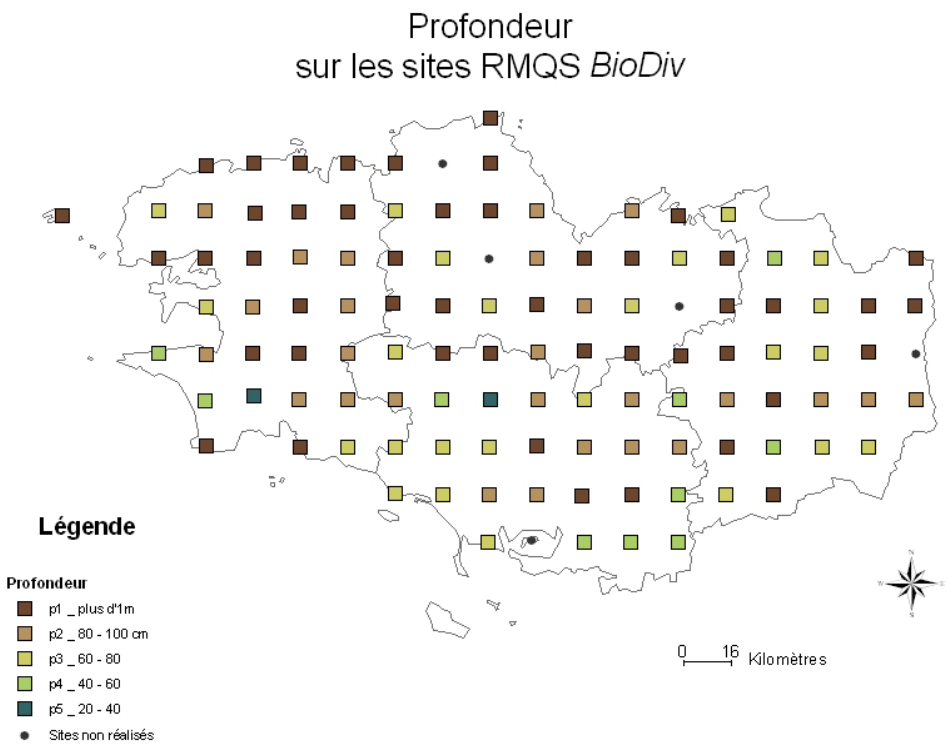
Modalité	Explication	Nb site
h_0	absence, couleur homogène sans tache	59
h_1 et h_2	taches d'oxydo reduction à une prof sup à 80 cm	12
h_3 et h_4	taches d'oxydo reduction à une prof entre 40 et 80 cm	25
h_5 et h_6	taches d'oxydo reduction dès la surface	8



- **Profil** :

Modalité	Explication	Nb site
s_B	Sol brun	69
s_C	Sol brun faiblement lessivé	21
s_A	Autres sols	
	(Sol lessivé faiblement dégradé (D), Sol dégradé, blanchi limoneux sous le labour (E), Sol lessivé (L), Sol minéral, brut, très superficiel (N), Sol d'apport colluvial (U), Sol d'apport alluvial et colluvial (V))	14



- **Profondeur** :

Modalité	Explication	Nb site
p_1	plus d'1 m	44
p_2	80 - 100 cm	26
p_3	60 - 80	22
p_4	40 - 60	10
p_5	20 - 40	2