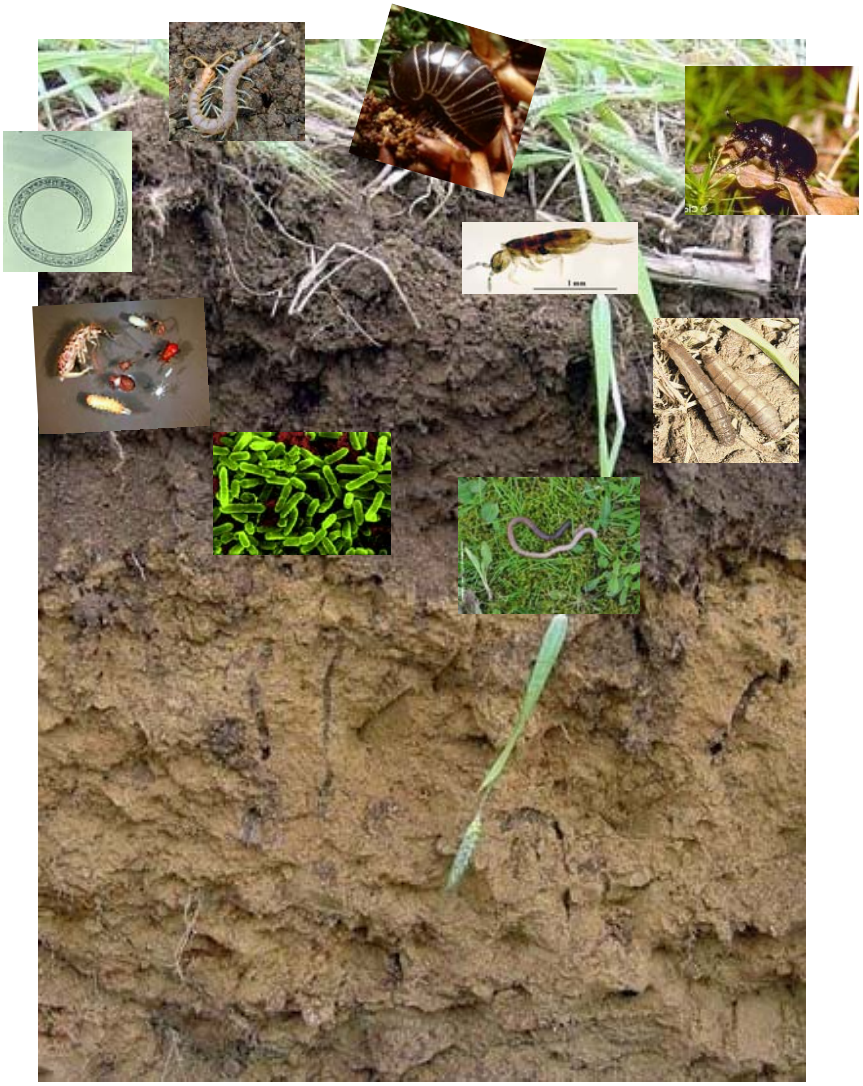


RMQS *BioDiv* Bretagne

Tome 6 - Mésofaune
Tome 7 - Lombriciens
Tome 9 - Humus Index

Coordinateur scientifique : Daniel CLUZEAU

Bellido A., Boulonne L., Cannavacciuolo M., Chaussod R., Cortet J., Fargette M., Giteau J-L., Guernion M., Jolivet C., Lavelle P., Foucaud-Lemercier B., Martin F., Mateille T., Mercier V., Péres G., Pernin C., Plantard O., Ponge J.F., Ranjard L., Rougé L., Ruiz N., Tico S., Velasquez H., Villenave C., Walter C.

Vol 4 / 2009

RMQS *BioDiv* Bretagne

Tome 6 : Mésofaune

Février 2006 – Février 2009

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

ADEME
Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie

TOME 6 :

MESOFAUNE

Contributeurs au rapport & analyses de laboratoire

Jérôme Cortet, Céline Pernin, Muriel Guernion

Table des matières

INTRODUCTION 1

MATERIELS et METHODES 3

Méthodes de prélèvements et paramètres étudiés 3

Nombre d'échantillons traités 5

Démarche d'exploitation des données 5

1. Exploration des données 7

1.1 Abondance 7

1.1.1 Mésofaune totale 7
1.1.2 Acariens 9
1.1.3 Collemboles 11

1.2 Richesse taxonomique 12

1.2.1 Richesse globale 12
1.2.2 Fréquence des taxons 13

1.3 Diversité taxonomique et équitabilité 16

1.4 Caractérisation fonctionnelle des peuplements de collemboles 17

2. Approche spatiale 19

2.1 Structuration spatiale des paramètres de mésofaune 19

2.2 Structuration spatiale des taxons de collemboles 26

3. Mésofaune et variables explicatives 27

3.1 Paramètres de mésofaune en lien avec les variables explicatives 27

3.1.1 Mésofaune et paramètres physico-chimiques 27
3.1.2 Mésofaune et occupation des sols 30
3.1.3 Mésofaune et pratiques agricoles 37
3.1.4 Mésofaune et caractéristiques pédologiques 38
3.1.5 Mésofaune et année de prélèvement 42
3.1.6 Mésofaune et humidité des sols 43

3.2 Structure taxonomique des communautés de collemboles et variables explicatives 44

3.2.1 Structure des communautés de collemboles et paramètres physico-chimiques 44
3.2.2 Structure des communautés de collemboles et occupation des sols 46
3.2.3 Structure des communautés de collemboles et pratiques agricoles 48
3.2.4 Structure des communautés de collemboles et caractéristiques pédologiques 51
3.2.5 Structure des communautés de collemboles et année de prélèvement 53

SYNTHESE 55

INTRODUCTION

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 Mesure 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 son évolution (Jolivet, 2006). Actuellement, les mesures réalisées sont exclusivement physiques (ex : densité apparente) ou chimiques (ex : teneur en éléments traces). Ainsi, contrairement à d'autres réseaux européens de surveillance des sols, aucune mesure biologique n'est actuellement réalisée. Dès lors, le programme **RMQS *BioDiv*** a été accueilli très favorablement par le Haut Comité de Groupement du GIS Sol lors de sa présentation en juin 2005, d'une part car il constitue une expérience unique en France de mesure spatialisée de la diversité biologique des sols, et d'autre part car ses conclusions permettront d'orienter le choix des paramètres biologiques à mesurer ultérieurement sur le réseau.

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 :

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

- 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).

▪ **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)

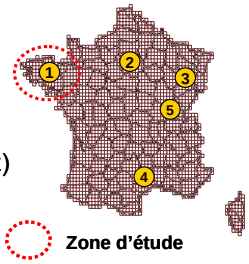


Figure 1 : Groupes biologiques étudiés et équipes partenaires associées du programme RMQS *BioDiv*

Ce tome présente les résultats de mésofaune. Il est constitué de trois parties. **La première partie** est consacrée à l'exploration des données de mésofaune. **La deuxième partie** présente les résultats d'approche spatiale à l'échelle régionale. Dans **la troisième partie,** une mise en relation des données de mésofaune avec les variables explicatives est réalisée.

MATERIELS et METHODES

Méthodes de prélèvements et paramètres étudiés

La participation de l'UMR 1120 ENSAIA-INPL/INRA, Laboratoire Sols et Environnement, de Nancy et de l'UMR CNRS 5176 de Brunoy dans le projet RMQS « Evaluation de critères de qualité biologique des sols à l'aide d'un échantillonnage systématique à l'échelle de la région Bretagne » a consisté d'une part à caractériser la structure et la diversité des communautés de microarthropodes en termes d'abondance, de richesse et de diversité spécifique et d'autre part à évaluer les effets de différents paramètres environnementaux sur ces communautés.

Les microarthropodes, qui appartiennent à la mésofaune du sol, sont essentiellement représentés par les collemboles (Hexapodes, Entognathes) et les acariens (Arachnides). Les microarthropodes du sol sont présents dans la plupart des sols connus, des climats désertiques jusqu'aux pôles. . Leur régime alimentaire est varié mais sont essentiellement saprophages et microphytophages ; les acariens Gamasida sont essentiellement prédateurs. La diversité des microarthropodes est très élevée puisque le nombre d'espèces de collemboles actuellement décrites est estimé à 7000 (Deharveng, 2004) et celui des acariens estimé à 40 000 (Gobat *et al.*, 1998). Toutefois cette diversité reste faible par rapport à la classe des Insectes, dont, par exemple, la seule famille des Coléoptère représente environ 350 000 espèces.

La structure des communautés de collemboles et d'acariens peut varier spatialement. Ces variations spatiales sont largement influencées par les teneurs en eau et en aliments disponibles. Ces facteurs sont eux-mêmes affectés par les pratiques agricoles ou forestières comme le labour, la fertilisation, les pesticides utilisés mais également par le type d'humus, l'acidité ou la texture du sol (Loranger *et al.*, 2001; Cortet *et al.*, 2002a). On estime ainsi que le nombre d'espèces de collemboles peut atteindre 60 à 80 en forêts tempérées alors que ce nombre est estimé à 15-30 en milieux agricoles (Petersen, 1982).

Les microarthropodes du sol, très sensibles aux modifications de leur environnement ont été utilisés à de nombreuses reprises en tant que bioindicateurs d'état (Cortet et Poinsot-Balaguer, 1998; Sadaka-Laulan et Ponge, 2000 entre autres) ou bioindicateurs d'usage (Ponge, 2000; Cortet *et al.*, 2002a par exemple).

Les échantillons de sol, 3 répétitions par site, ont été prélevés grâce à un carottier (Cf. rapport P&P). L'échantillonnage a été effectué en avril 2006 sur 27 sites et de février à avril 2007 sur 71 sites. Ces dates d'échantillonnage correspondent à des périodes présentant les conditions pédo-climatiques les plus favorables au développement et à l'activité des microarthropodes. En fonction des caractéristiques pédologiques de chacun des sites échantillonnés, les prélèvements ont été effectués sur 3 profondeurs : 0-5, 5-10 et 10-15 cm afin d'optimiser les chances de collecter des espèces de surfaces dites épiédaphiques ainsi que des espèces vivant plus en profondeur dites euédaphiques (Gisin, 1943).

L'extraction de la mésofaune a été effectuée par un extracteur à haut gradient de températures, de type MacFadyen. Le comptage des individus collectés a été effectué sous loupe binoculaire et l'identification des espèces de collemboles a été réalisée sous microscope, sur des caractères morphologiques. Les collemboles ont été déterminés au niveau spécifique quand cela était possible (Gisin, 1960; Bretfeld, 1999; Potapow, 2001; Thibaud *et al.*, 2004; Hopkin, 2007) et les acariens au niveau des sous-ordres : Oribatida, Actinedida, Acaridida et Gamasida (Krantz, 1978).

Les méthodes de prélèvement sont actuellement largement approuvées par la communauté scientifique. L'échantillonnage, l'extraction et l'identification des collemboles et acariens sont actuellement normalisés au niveau de l'Organisation Internationale de Standardisation (ISO 23611-2, 2004)

Les données recueillies au niveau de l'espèce (collemboles) ont été utilisées pour calculer la Richesse en espèces (R), ainsi que les indices de Diversité (H'x) et d'Equitabilité (E) établis par Shannon-Weaver (Scherrer, 1998). De plus, les taxons ont été regroupés selon leurs distributions verticales (Gisin, 1943). Trois types biologiques, épi-, hémi-, et eu-édaphiques, sont décrits chez les collemboles, basés sur des critères morphologiques, anatomiques et écologiques. Ce classement permet d'identifier, entre autres, les capacités de résilience d'un milieu, les espèces épiédaphiques recolonisant plus rapidement les milieux perturbés (Ponge *et al.*, 2006).

Nombre d'échantillons traités

Pour des raisons d'ordre technique (problème de tarière) ou logistique (perte d'échantillons), le suivi de la structure des communautés mésofaunique a été réalisé sur 98 sites RMQS *BioDiv*[3].

Démarche d'exploitation des données

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.)
- Canoco (Version 4.5 © 1997-2002 Biometris)

a) Exploration des données : analyses descriptives

Les statistiques descriptives et les représentations graphiques sous forme de boîtes à moustaches et d'histogrammes, permettent de caractériser chaque paramètre descripteur de la mésofaune, comme l'abondance, la richesse et la diversité taxonomique. Ainsi, les valeurs moyenne, minimale, maximale et extrême[4] sont identifiées. Des transformations (box-cox[5]) peuvent être réalisées pour normaliser les données. Pour l'étude des structures taxonomiques (abondance des taxons), des analyses multivariées (Analyse en Composantes Principales : ACP) sont réalisées.

b) Approche spatiale

La représentation cartographique permet une visualisation à l'échelle régionale des valeurs de chaque paramètre. Pour caractériser la structure spatiale des paramètres,

---

[3] NB : Les sites manquants sont : 432, 490, 494, 551, 553, 661, 671, 720, 773, 775 et 776

[4] Les valeurs extrêmes sont des valeurs exactes, mais considérées statistiquement comme anormalement faibles ou élevées. Elles sont représentées, dans les boîtes à moustaches, par deux symboles "*" et "o". Les valeurs "o" sont comprises dans l'intervalle [Q1 - 3 (Q3 – Q1); Q1 – 1.5 (Q3 – Q1)] ou [Q3 + 1.5 (Q3 – Q1); Q3 + 3 (Q3 – Q1)]. Les valeurs "*" correspondent à l'intervalle] Q1 - 3 (Q3 – Q1); Q3 + 3 (Q3 – Q1) [.

[5] La transformation box-cox permet d'augmenter la normalité des données grâce à l'équation suivante :

$$F_\lambda(Y_t) = \begin{cases} (Y_t\lambda + 1)^{1/\lambda} & \lambda > 0 \\ \exp Y_t & \lambda = 0 \end{cases}$$

La valeur de Lambda peut être imposé ou optimisé avec le logiciel XLSTAT. L'optimisation est choisie car elle permet de maximiser la vraisemblance de l'échantillon, étant supposé qu'après transformation l'échantillon suit une loi normale.

le corrélogramme de l'indice de Moran (1948, 1950) 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 de collemboles a été testée par un test Join-Count (Dacey, 1968).

c) Relations avec les variables explicatives

Les liens avec les variables explicatives (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, sont étudiés. Des tests de corrélation de Spearman (alpha = 0,05) sont réalisés lorsque les variables explicatives sont quantitatives (ex : paramètres physico-chimiques). Lorsque les variables explicatives sont qualitatives, des tests non paramétriques de Kruskal-Wallis et Mann-Whitney sont effectués.

Les variables explicatives sont représentées sur le plan factoriel des observations (sites) de l'ACP afin de visualiser les groupes et leurs centres de gravité, regroupés par classe d'une variable catégorique (package ade4 ; fonction : s.class).

.

1. Exploration des données

1.1 Abondance

1.1.1 Mésofaune totale

La mésofaune regroupe l'ensemble des acariens, collemboles et autres microarthropodes présents dans les sols.

Les sols des sites RMQS *BioDiv* Bretagne présentent, en moyenne, une abondance en mésofaune allant de 1061 à 64143 individus par mètre carré. Ces valeurs présentent une forte hétérogénéité (coefficient de variation de 0,8) (Figure 2a).

Le site dunaire (site n°713) qui présente une abondance très élevée de 130500 ind/m² a été écarté des analyses exploratoires des données. Les valeurs au delà de 51000 ind/m² sont considérées statistiquement comme extrêmes par rapport à notre jeu de données. Ce type de valeurs est observé sur 5 sites : n°547, 828, 611, 480 et 659 (Figure 2b).

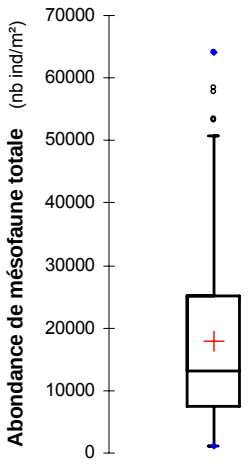
Les données brutes de mésofaune totale ne suivent pas une distribution normale. Une transformation box-cox (lambda = 0,01) des données permet de respecter la condition de normalité.

Sur les sites RMQS *BioDiv*, la communauté mésofaunique est dominée par les collemboles (56,7%). Les acariens représentent 39,8% des peuplements et les autres microarthropodes 3,5% (Figure 3). Ces valeurs sont comparables à celles observées dans une étude réalisée en 2008 pour l'Andra, visant à suivre la biodiversité de la faune des sols de la zone d'observation de l'Observatoire de l'Environnement du site de Meuse/Haute-Marne (zone OPE-Andra). Ainsi, les communautés échantillonnées sur les 8 sites de cette étude sont composées, en moyenne, par 62,6% de collemboles et 26,8% d'acariens (Maillant *et al.*, 2009).

a)

Statistique	AB_mésofaune totale
Nb. d'observations	97
Moyenne	17864,07
Ecart-type (n-1)	14368,88
Minimum	1061,20
1er Quartile	7428,37
Médiane	13205,99
3ème Quartile	25114,96
Maximum	64143,38
Amplitude	63082,18
Coefficient de variation	0,800

b)



c)

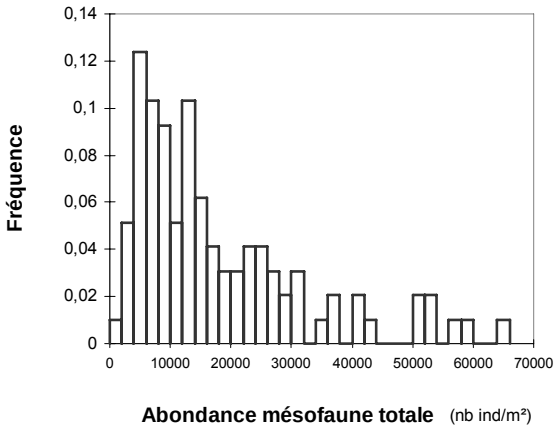


Figure 2 : Statistiques descriptives (a), boîte à moustaches (b) et histogramme (c) de l'abondance totale de la mésofaune sur 97 sites RMQS *BioDiv*

Données exprimées en nombre d'individus par mètre carré
(+ : la moyenne ; barre du milieu : la médiane ; ° et * : les valeurs extrêmes ; ● : valeur minimale et maximale)

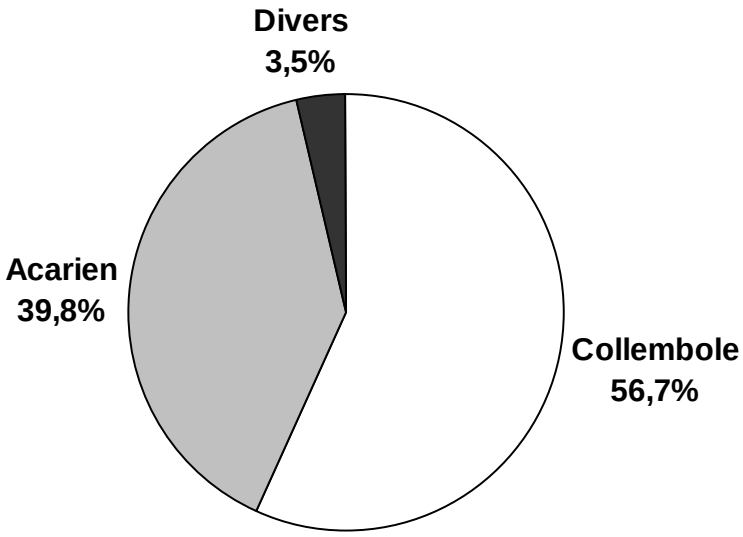


Figure 3 : Abondance relative des différents groupes mésofaunique sur les sites RMQS *BioDiv*
N = 97

1.1.2 Acariens

1.1.2.1 Acariens totaux

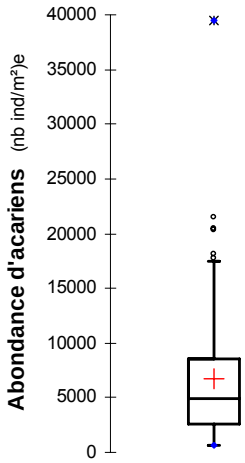
L'abondance moyenne en acariens retrouvés sur les sites RMQS *BioDiv* varie de 707 (site n° 725) à 39500 ind/m² (site n°611) et présente donc une hétérogénéité élevée (coefficient de variation de 0,88) (Figure 4a).
Le site dunaire (site n°713) est écarté des analyses car il présente une abondance en acariens de 83598 ind/m². A partir d'une abondance de 17500 ind/m², les valeurs sont considérées statistiquement comme extrêmes pour notre jeu de données. Dans ce cas, il s'agit de 6 sites : n°611, 721, 544, 480, 552 et 547 qui présentent la particularité d'être des sites de prairie, à l'exception du site n°611 qui est un site forestier (Figure 4b).

Les données brutes d'abondance d'acariens ne suivent pas une distribution normale. Une transformation box-cox (lambda = 0,01) des données permet de respecter la condition de normalité.

a)

Statistique	AB_acarien totale
Nb. d'observations	97
Moyenne	6754,94
Ecart-type (n-1)	6026,36
Minimum	707,46
1er Quartile	2594,03
Médiane	4952,25
3ème Quartile	8607,48
Maximum	39500,06
Amplitude	38792,60
Coefficient de variation	0,888

b)



c)

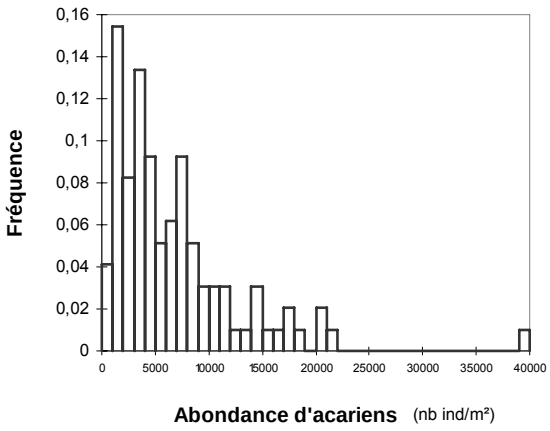


Figure 4 : Statistiques descriptives (a), boîtes à moustaches (b) et histogramme (c) de l'abondance des acariens totaux sur 97 sites RMQS *BioDiv*

Données exprimées en nombre d'individus par mètre carré
(+ : la moyenne ; barre du milieu : la médiane ; ° et * : les valeurs extrêmes ; ● : valeur minimale et maximale)

1.1.2.2 Sous-ordres d'Acariens

La détermination des acariens a été conduite jusqu'au niveau du sous-ordre. Ainsi, 4 groupes sont identifiés sur les sites RMQS *BioDiv* : **Oribatida, Gamasida, Actinedida et Acaridida**.

Les Oribatida représentent 55,1% des acariens collectés sur les sites RMQS *BioDiv.* Comme l'avaient déjà observé Bachelier (1978) et Petersen (1982), entre autres, les Oribatida constituent, dans notre étude et plus généralement, le principal composant des populations d'acariens. Les Gamasida, qui sont majoritairement des prédateurs, représentent 25,7% des acariens collectés. Ce pourcentage est en accord avec les données compilées par Petersen (1982). Viennent ensuite les Actinedida (16,9%). Les données disponibles sur ce taxon sont très hétérogènes. Cependant, les valeurs observées dans notre étude sont faibles avec une abondance moyenne de 3114 ind/m². Enfin, viennent les Acaridida avec une très faible proportion (2%) et une densité moyenne inférieure à 500 ind/m². Nos observations sont comparables à celles faites dans les rares études prenant ce sous-ordre en considération et qui ont été compilées par Petersen (1982) (Figure 5b). De plus, ces proportions sont comparables à celles observées dans l'étude réalisée sur la zone OPE-Andra décrite plus haut (Cf.1.1.1), dans laquelle les Oribatida représentent 59,6% des acariens, les Gamasida 21,2% et les Actinedida 19,2% (Maillant *et al.*, 2009).

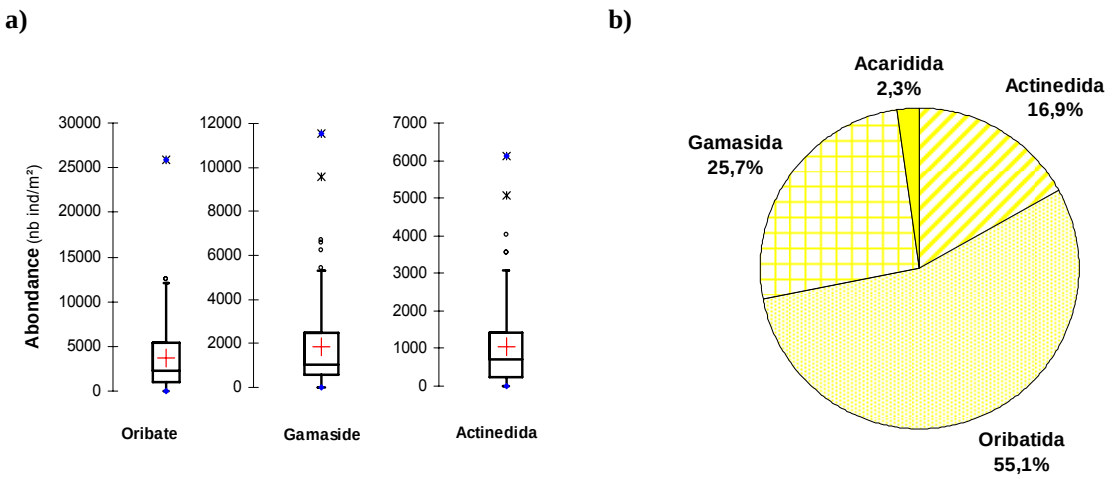


Figure 5 : Abondance absolue (a) et relative (b) des sous-ordres d'acarien
N = 97
Données d'abondance exprimées en nombre d'individus par mètre carré
(+ : la moyenne ; barre du milieu : la médiane ; ° et * : les valeurs extrêmes ; ● : valeur minimale et maximale)

1.1.3 Collemboles

Les sites RMQS *BioDiv* présentent une abondance moyenne en collemboles qui varie de 118 ind/m² (site n°725) à 45042 ind/m² (site n°547). L'hétérogénéité élevée des valeurs (coefficient de variation de 1,02) peut s'expliquer par l'hétérogénéité des sites échantillonnés, à savoir des prairies, des cultures ou encore des sites forestiers (Figure 6a).

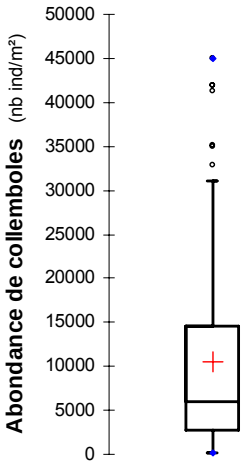
Le site dunaire (site n°713), écarté des analyses, présente une abondance en collemboles de 43509 ind/m². Au-delà de 32000 ind/m², les abondances sont considérées statistiquement comme extrêmes pour notre jeu de données. Les 7 sites présentant ce cas de figure sont les sites n°547, 828, 312, 659, 716, 365 et 480 qui ont la particularité d'être des prairies et d'avoir été, à l'exception des sites n°659 et 480, échantillonnés en 2006 (Figure 6b). A noter que ces extrêmes ne le sont que d'un point de vue statistique car les densités de collemboles peuvent atteindre plus de 100000 ind/m², dans les forêts tempérées (Petersen, 1982; Coleman et Crossley, 1996).

Les données brutes d'abondance de collemboles ne suivent pas une distribution normale. Une transformation box-cox (lambda = 0,01) des données permet de respecter la condition de normalité.

a)

Statistique	AB_collembole totale
Nb. d'observations	97
Moyenne	10469,73
Ecart-type (n-1)	10736,68
Minimum	117,91
1er Quartile	2829,85
Médiane	6013,44
3ème Quartile	14503,01
Maximum	45041,86
Amplitude	44923,95
Coefficient de variation	1,020

b)



c)

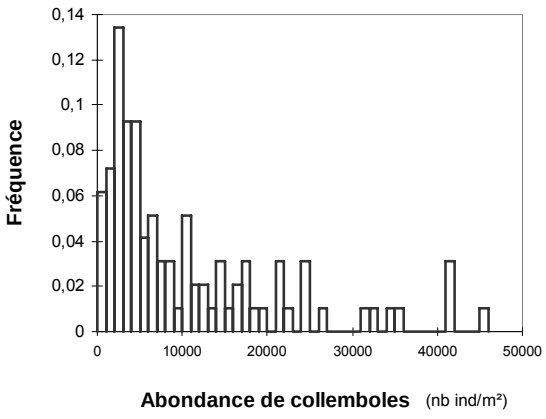


Figure 6 : Statistiques descriptives (a), boîtes à moustaches (b) et histogramme (c) de l'abondance des collemboles sur 97 sites RMQS *BioDiv*

Données exprimées en nombre d'individus par mètre carré
(+ : la moyenne ; barre du milieu : la médiane ; ° et * : les valeurs extrêmes ; ● : valeur minimale et maximale)

1.2 Richesse taxonomique

1.2.1 Richesse globale

La détermination des collemboles a été conduite jusqu'au niveau spécifique quand cela était possible. Ainsi, 67 espèces ont été identifiées sur les sites RMQS *BioDiv*. Cependant, en raison de certains doutes sur l'identification de quelques spécimens, des regroupements taxonomiques ont été effectués (Annexe I. Liste exhaustive des espèces de collemboles identifiées dans la région Bretagne). Les analyses de données ont ainsi été réalisées sur 57 taxons (Tableau 1).

Tableau 1 : Liste des taxons de collemboles identifiés, classés par famille, sur les sites RMQS *BioDiv*

FAMILLE	GENRE	ESPECE	COD_TAXON	Categ Eco
Isotomidae	*Isotomurus*	*gp. palustris*	**Isu_pal**	**EPI**
	Isotomurus	*antennalis*	**Isu_ant**	**EPI**
	Isotoma	sp.	**Isa_x**	**EPI**
	Isotomiella	*minor*	**Iso_min**	**EU**
	Isotomodes	*trisetosus*	**Iso_tri**	**EU**
	Isotomodes	*productus*	**Iso_pro**	**EU**
	Cryptopygus	*bipunctatus*	**Cr_bip**	**HEMI**
	Cryptopygus	*thermophilus*	**Cr_the**	**HEMI**
	Mucrosomia	*garretti*	**Mu_gar**	**HEMI**
	Desoria	sp.	**Des_x**	**EPI**
	Parisotoma	*notabilis*	**Pa_not**	**HEMI**
	Proisotoma	*admaritima*	**Pro_adm**	**HEMI**
	Proisotoma	*minuta*	**Pro_mit**	**HEMI**
	Proisotoma	*minima*	**Pro_mim**	**HEMI**
	Folsomia	*candida*	**Fo_can**	**EU**
	Folsomia	*fimetaria*	**Fo_fim**	**EU**
	Folsomia	*quadrioculata*	**Fo_qua**	**HEMI**
	Folsomia	*setosa*	**Fo_set**	**HEMI**
	Folsomia	*sexoculata*	**Fo_sex**	**HEMI**
Entomobryidae	*Orchesella*	sp.	**Or_x**	**EPI**
	Entomobrya	sp.	**En_x**	**EPI**
	Heteromurus	*major*	**He_maj**	**HEMI**
	Heteromurus	*nitidus*	**He_nit**	**EU**
	Lepidocyrtus	*cyaneus*	**Le_cya**	**HEMI**
	Lepidocyrtus	*lanuginosus*	**Le_lan**	**HEMI**
	Lepidocyrtus	*lignorum*	**Le_lig**	**HEMI**
	Pseudosinella	*immaculata*	**Ps_imm**	**EU**
	Pseudosinella	*alba*	**Ps_alb**	**HEMI**
Onychiuridae	*Protaphorura*	*armata*	**Pr_arm**	**EU**
	Paratullbergia	*callipygos*	**Pt_cal**	**EU**
Tullbergiidae	*Mesaphorura*	*macrochaeta*	**Mes_mac**	**EU**
	Mesaphorura	*florae*	**Mes_flo**	**EU**
	Mesaphorura	*sylvatica*	**Mes_syl**	**EU**
	Mesaphorura	*italica*	**Mes_ita**	**EU**
	Mesaphorura	*krausbaueri*	**Mes_kra**	**EU**
	Mesaphorura	*hylophila*	**Mes_hyl**	**EU**
	Mesaphorura	sp.	**Mes_x**	**EU**
	Stenaphorura	*denisi*	**St_den**	**EU**
	Stenaphorura	*quadrispina*	**St_qua**	**EU**
Brachystomellidae	*Brachystomella*	*parvula*	**Br_par**	**HEMI**
Hypogastruridae	*Ceratophysella*	*denticulata*	**Ce_den**	**HEMI**
	Hypogastrura	sp.	**Hyp_x**	**HEMI**
Neanuridae	*Friesea*	*mirabilis*	**Fr_mir**	**HEMI**
	Micranurida	*sensillata*	**Mi_sen**	**EU**
Odontellidae	*Monobella*	*grassei*	**Mo_gra**	**HEMI**
Neelidae	*Xenyllodes*	*armatus*	**Xe_arm**	**HEMI**
	Neelus	*murinus*	**Ne_mur**	**EU**
Arrhopalitidae	*Megalothorax*	*minimus*	**Mg_min**	**EU**
Katiannidae	*Arrhopalites*	*sp.*	**Ar_x**	**EU**
	Sminthurinus	*aureus*	**Sminus_aur**	**HEMI**
Sminthurididae	*Sminthurinus*	*elegans*	**Sminus_ele**	**HEMI**
	Sphaeridia	*pumilis*	**Sp_pum**	**HEMI**
	Sminthurides	*malmgreni*	**Smines_mal**	**EPI**
	Sminthurides	*parvulus*	**Smines_par**	**EPI**
Sminthuridae	*Sminthurides*	*sp.*	**Smines_x**	**EPI**
	Sminthurus	*niger*	**Sm_nig**	**EPI**
Bourletiellidae	*Sminthurus*	*viridis*	**Sm_vir**	**EPI**
	Bourletiella	*hortensis*	**Bo_hor**	**EPI**

Les collemboles sont très largement représentés par 8 espèces qui représentent à elles seules près de 80% de l'abondance totale des collemboles collectés. Trois espèces représentent 54,6% des collemboles : *Parisotoma notabilis* (26,7%), *Isotomurus gr. palustris* (16,7%) et *Cryptopygus thermophilus* (11,2%) qui sont des taxons communs et cosmopolites (Figure 7). A titre de comparaison, l'étude réalisée sur la zone OPE-Andra montre également une forte proportion de *P.notabilis,* 22,5%,

dans les communautés de collemboles. On note qu'une seule espèce, du genre *Sminthurides,* a été identifiée sur le site n°725 (site de culture) et qu'un maximum de 16 espèces a été identifié sur le site n°611 (site forestier).

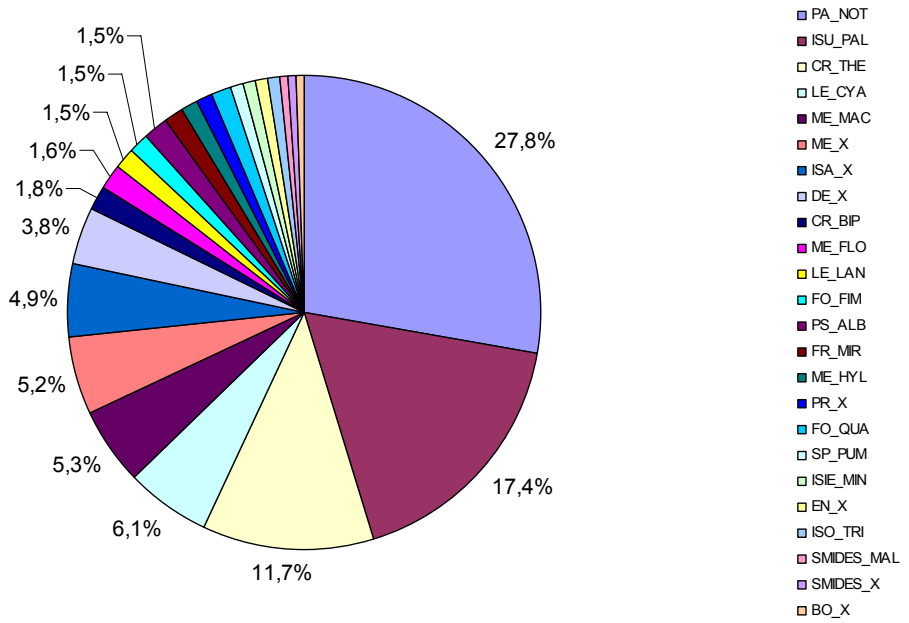


Figure 7 : Abondance relative des différents taxons de collemboles (valeurs >0,5%), représentant 96,2% de l'abondance totale, sur l'ensemble des sites RMQS *BioDiv*

1.2.2 Fréquence des taxons

Les différents taxons de collemboles peuvent également être distingués en fonction de leur fréquence d'apparition sur les sites RMQS *BioDiv*. Ainsi, des taxons ubiquistes, intermédiaires et rares peuvent être différenciés (Figure 8 et Tableau 2).

Seuls 4 taxons sont présents sur plus de 50% des sites : ce sont des taxons **ubiquistes**. Il s'agit de *Parisotoma notabilis*, *Isotomurus gp palustris*, *Lepidocyrtus cyaneus* et *Mesaphorura* sp. Cependant ce dernier taxon comprend sûrement plusieurs espèces de *Mesaphorura* dont *Mesaphorura macrochaeta*, qui mériterait ainsi de figurer parmi ces espèces ubiquistes.
Les taxons **intermédiaires** ont une fréquence d'apparition comprise entre 10 et 50% : 18 taxons se trouvent dans cette catégorie.
En dessous d'une fréquence d'apparition de 10 % les taxons sont considérés comme « **rares** » : 37 taxons présentent ce cas de figure. Il est à noter que ces taxons ont été qualifiés de rares dans notre contexte, ce qui ne signifie pas qu'ils sont tous

reconnus comme rares dans la littérature scientifique. L'essentiel des taxons identifiés sont communs et présentent une large distribution mis à part *Proisotoma admaritima* et *Folsomia sexoculata* qui ont la particularité d'être des espèces maritimes (Hopkin, 1997; Potapow, 2001).

Figure 8 : Fréquence d'apparition des taxons de collemboles sur les sites RMQS *BioDiv*

Tableau 2 : Statistiques descriptives des abondances des taxons de collemboles

	Moyenne	Ecart type (n-1)	Médiane	Maximum	Coefficient de variation	Somme	Nb sites présents	Fréquence sur les sites
PA_NOT	2879,5	6997,0	353,7	72868,8	2,4	840820,7	80	81,6
ISU_PAL	1805,0	4753,4	0,0	32897,1	2,6	527060,5	70	71,4
LE_CYA	632,4	1950,4	0,0	24053,8	3,1	184648,0	64	65,3
ME_X	540,3	2241,5	0,0	30420,9	4,1	157764,4	50	51,0
ME_MAC	546,3	1472,5	0,0	12026,9	2,7	159533,1	48	49,0
CR_THE	1210,2	3981,0	0,0	32543,3	3,3	353378,1	41	41,8
ISA_X	510,0	2525,4	0,0	26883,6	4,9	148921,1	37	37,8
PS_ALB	152,6	445,5	0,0	3891,1	2,9	44570,2	34	34,7
SP_PUM	96,9	405,3	0,0	3537,3	4,2	28298,5	26	26,5
DE_X	392,5	3265,4	0,0	52352,3	8,3	114609,1	24	24,5
BO_X	55,7	195,4	0,0	1414,9	3,5	16271,7	24	24,5
LE_LAN	153,8	899,5	0,0	9904,5	5,8	44923,9	23	23,5
SMIDES_X	59,4	210,2	0,0	1768,7	3,5	17332,9	21	21,4
ISIE_MIN	96,9	386,9	0,0	3537,3	4,0	28298,5	20	20,4
ME_FLO	168,4	741,5	0,0	5306,0	4,4	49168,7	20	20,4
FO_FIM	153,8	964,1	0,0	9904,5	6,3	44923,9	19	19,4
PR_X	119,9	539,7	0,0	5659,7	4,5	35019,5	19	19,4
FR_MIR	151,4	738,2	0,0	7428,4	4,9	44216,5	16	16,3
SMIDES_MAL	63,0	413,0	0,0	5659,7	6,5	18394,1	13	13,3
EN_X	81,2	526,9	0,0	6720,9	6,5	23700,0	12	12,2
NE_MUR	21,8	145,0	0,0	2122,4	6,6	6367,2	12	12,2
OR_X	31,5	223,0	0,0	3183,6	7,1	9197,0	11	11,2
SMINUS_AUR	41,2	243,6	0,0	2476,1	5,9	12026,9	9	9,2
SMINUS_ELE	21,8	145,0	0,0	1768,7	6,6	6367,2	9	9,2
BR_PAR	15,7	98,2	0,0	1061,2	6,2	4598,5	8	8,2
FO_X	26,7	260,9	0,0	4244,8	9,8	7782,1	7	7,1
ME_HYL	122,4	1444,1	0,0	23700,0	11,8	35726,9	6	6,1
ST_DEN	13,3	84,4	0,0	707,5	6,3	3891,1	6	6,1
PT_CAL	14,5	108,8	0,0	1061,2	7,5	4244,8	5	5,1
ISO_TRI	80,0	672,3	0,0	7782,1	8,4	23346,3	4	4,1
MU_GAR	13,3	138,5	0,0	2122,4	10,4	3891,1	4	4,1
FO_CAN	8,5	90,0	0,0	1414,9	10,6	2476,1	4	4,1
FO_QUA	117,5	1112,6	0,0	15210,5	9,5	34312,0	4	4,1
ME_SYL	9,7	87,4	0,0	1061,2	9,0	2829,9	4	4,1
MG_MIN	9,7	92,2	0,0	1061,2	9,5	2829,9	4	4,1
ISU_ANT	14,5	162,6	0,0	2476,1	11,2	4244,8	3	3,1
PRO_MIT	29,1	351,9	0,0	5306,0	12,1	8489,6	3	3,1
ST_QUA	13,3	102,8	0,0	1061,2	7,7	3891,1	3	3,1
CE_DEN	8,5	90,0	0,0	1061,2	10,6	2476,1	3	3,1
SM_VIR	3,6	35,7	0,0	353,7	9,8	1061,2	3	3,1
HE_MAJ	9,7	113,2	0,0	1768,7	11,7	2829,9	2	2,0
LE_LIG	3,6	46,2	0,0	707,5	12,7	1061,2	2	2,0
PS_IMM	9,7	146,3	0,0	2476,1	15,1	2829,9	2	2,0
XE_ARM	6,1	74,5	0,0	1061,2	12,3	1768,7	2	2,0
SMIDES_PAR	7,3	105,5	0,0	1768,7	14,5	2122,4	2	2,0
ISO_PRO	38,8	551,9	0,0	9197,0	14,2	11319,4	1	1,0
CR_BIP	185,3	2585,7	0,0	43509,0	13,9	54121,0	1	1,0
PRO_ADM	8,5	144,9	0,0	2476,1	17,1	2476,1	1	1,0
PRO_MIM	1,2	20,7	0,0	353,7	17,1	353,7	1	1,0
FO_SEX	10,9	138,7	0,0	2122,4	12,7	3183,6	1	1,0
FO_SET	2,4	41,4	0,0	707,5	17,1	707,5	1	1,0
HE_NIT	1,2	20,7	0,0	353,7	17,1	353,7	1	1,0
MI_SEN	1,2	20,7	0,0	353,7	17,1	353,7	1	1,0
ME_ITA	6,1	103,5	0,0	1768,7	17,1	1768,7	1	1,0
ME_KRA	1,2	20,7	0,0	353,7	17,1	353,7	1	1,0
HY_X	1,2	20,7	0,0	353,7	17,1	353,7	1	1,0
MO_GRA	1,2	20,7	0,0	353,7	17,1	353,7	1	1,0
AR_X	2,4	29,2	0,0	353,7	12,0	707,5	1	1,0
SM_NIG	3,6	62,1	0,0	1061,2	17,1	1061,2	1	1,0

1.3 Diversité taxonomique et équitabilité

La diversité spécifique moyenne est de 1,3 (Figure 9a). La valeur de l'équitabilité moyenne est égale à 0,6 alors que ce paramètre a une valeur pouvant varier de 0 à 1 (Figure 9b). Cela montre, malgré la dominance de certains taxons, une bonne répartition des effectifs parmi les espèces déterminées sur chacun des sites.

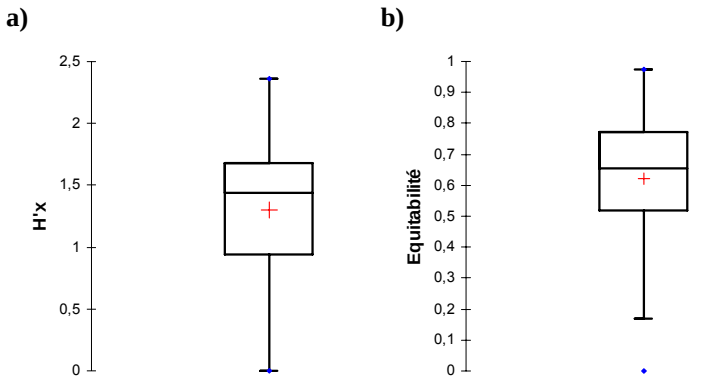


Figure 9 : Boite à moustaches de la diversité spécifique (a) et de l'équitabilité (b) des collemboles sur 97 sites RMQS *BioDiv*

1.4 Caractérisation fonctionnelle des peuplements de collemboles

Les collemboles peuvent être divisés en trois groupes : **épi-, hémi- et eu-édaphiques** (Gisin, 1943). Ce classement, qui reflète les distributions verticales, est basé sur des critères anatomiques, morphologiques et écologiques (taille de l'individu, régression oculaire, coloration, présence ou absence de furca) et sur dires d'experts (J.F. Ponge, J. Cortet et C. Pernin). Ainsi, les espèces euédaphiques qui vivent en permanence dans le sol, sont caractérisées par une taille réduite, une perte de leur coloration et par une réduction ou perte des organes saltatoires et visuels. Les espèces épiédaphiques qui vivent à la surface du sol et sur la végétation sont au contraire des espèces de grande taille, très colorées, avec une furca très développée et un nombre d'ocelles maximal égal à 8. Les espèces hémiédaphiques qui vivent dans les horizons superficiels et la litière composée de feuilles présentent des caractères intermédiaires (Hopkin, 1997). La prise en compte de ces groupes permet d'appréhender les capacités de résilience d'un milieu, les espèces épiédaphiques, plus aptes à se disperser rapidement, recolonisant plus rapidement les milieux perturbés (Ponge *et al.*, 2006).

Parmi les 57 taxons considérés dans cette étude, 13 ont été définis comme épiédaphiques, 23 comme hémiédaphiques et 21 comme euédaphiques (Tableau 1).
L'abondance des collemboles épi- et hémiédaphiques est significativement plus élevée que celle des collemboles euédaphiques (Figure 10a).
Parmi les 58% de collemboles qui composent la communauté mésofaunique collectée dans les 5 premiers centimètres du sol, plus de la moitié, 53,0%, sont des espèces hémiédaphiques. En moyenne, on retrouve 16188 ind/m² appartenant à ce type biologique. Les collemboles épiédaphiques représentent 28,4% des peuplements avec une moyenne de 9550 ind/m². Enfin, les collemboles euédaphiques sont les moins représentées dans les peuplements avec seulement 18,6% et une densité moyenne de 5780 ind/m² (Figure 10b). La proportion des collemboles hémiédaphiques rencontrés sur les sites RMQS *BioDiv* est comparable à celle rencontrée dans l'étude réalisée sur la zone OPE-Andra (55,4%). En revanche, dans cette dernière étude, les proportions en collemboles épiédaphiques et euédaphiques sont respectivement égales à 10,0 et 34,6% (Maillant *et al.*, 2009).

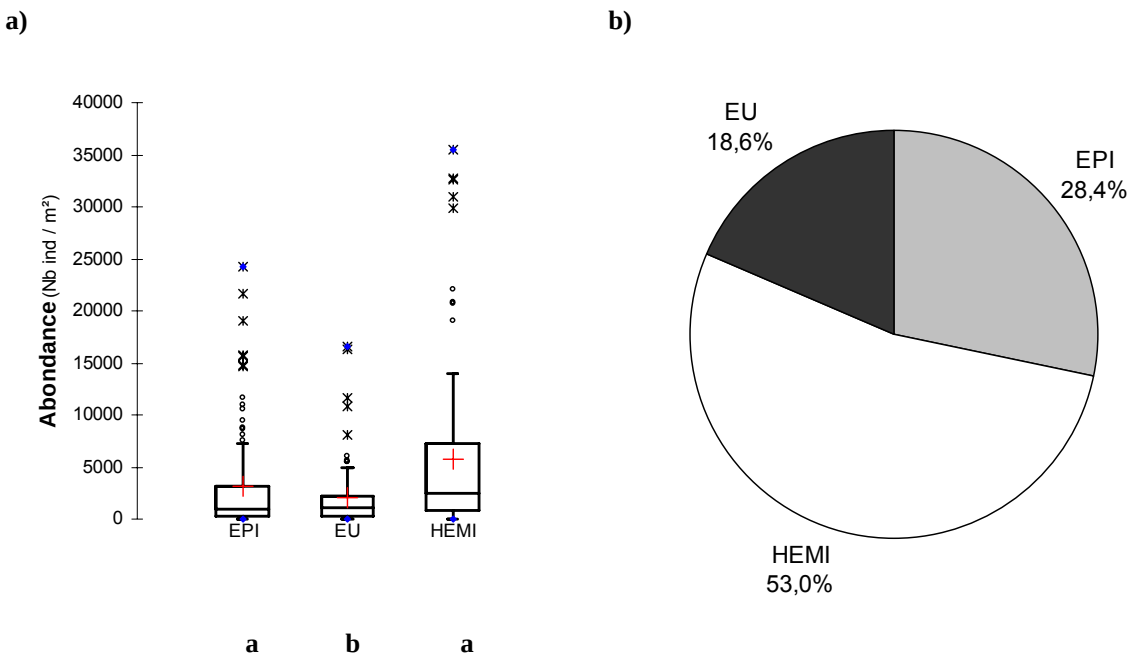


Figure 10 : Abondance absolue (a) et relative (b) des types biologiques de collemboles sur les sites RMQS *BioDiv*

N = 97 ; Les lettres (a et b) sous la boîte à moustache indiquent des moyennes significativement différentes d'après le test de Kruskal-Wallis à $p<0,05$

2. Approche spatiale

2.1 Structuration spatiale des paramètres de la mésofaune

Les paramètres de la mésofaune rassemblent des paramètres d'abondance globaux (mésofaune totale, collemboles et acariens), des paramètres d'abondance fonctionnels (types biologiques de collemboles), et des paramètres de diversité (richesse taxonomique, indice de diversité et équitabilité). Ces données sont représentées spatialement sous forme de cartes (Figure 12, 13, 14, 15, 16 et 17). Cette représentation permet d'identifier visuellement si des patterns spatiaux à l'échelle régionale existent. On note que l'abondance des collemboles semble plus importante sur les sites côtiers. De plus, ces cartogrammes permettent de visualiser le caractère particulier du site dunaire (site n° 713) situé sur la pointe sud-ouest de la Bretagne.

Les données box-cox transformées (Annexe II) sont utilisées pour réaliser les analyses de géostatistiques, corrélogramme de l'indice de Moran et semi-variogramme, qui nécessitent une distribution normale des données. Le site insulaire 418 ne participe pas aux analyses.

L'indice de diversité des collemboles présente une structuration spatiale à l'échelle régionale mise en évidence par le corrélogramme significatif (Figure 11a). Cependant, le semi-variogramme n'étant, pour sa part, pas significatif, il n'y a pas de krigeage possible pour ce paramètre (Figure 11b). Les autres paramètres de mésofaune étudiés ne présentent pas de structuration spatiale (Tableau 3 et Annexe III), ce qui pourrait s'expliquer par une absence de structuration spatiale concernant les usages de sol à cette échelle d'étude. En effet, le type d'usage des sols apparaît comme un paramètre déterminant la structuration des communautés mésofauniques (Cf. 3.1.2.).

Tableau 3 : Synthèse des résultats d'analyses géostatistiques pour les paramètres de mésofaune

Paramètres de mésofaune	Indice de moran	p.value	P value de permutation	Significativité du corrélogramme	Significativité du variogramme
Paramètres globaux					
Mésofaune totale	0,0402	0,2246	0,2242	ns	ns
Collemboles	0,0782	0,0927	0,0801	ns	ns
Acariens	-0,0172	0,541	0,5445	ns	ns
Type biologique de collemboles					
Epi-édaphiques	0,0418	0,2254	0,2392	ns	ns
Hemi-édaphiques	0,0774	0,0971	0,0961	ns	ns
Eu-édaphiques	0,0669	0,1347	0,1201	ns	ns
Sous ordre d'acariens					
Oribatida	0,0267	0,29	0,3033	ns	ns
Gamasida	- 0,0764	0,8294	0,8208	ns	ns
Actinedida	- 0,0179	0,538	0,5025	ns	ns
Paramètres de diversité					
Richesse taxonomique	0,0835	0,0802	0,0861	ns	ns
Indice de diversité	**0,1432**	**0,0108**	**0,0130**	**s**	ns
Equitabilité	0,0206	0,3217	0,3223	ns	ns

a) **b)**

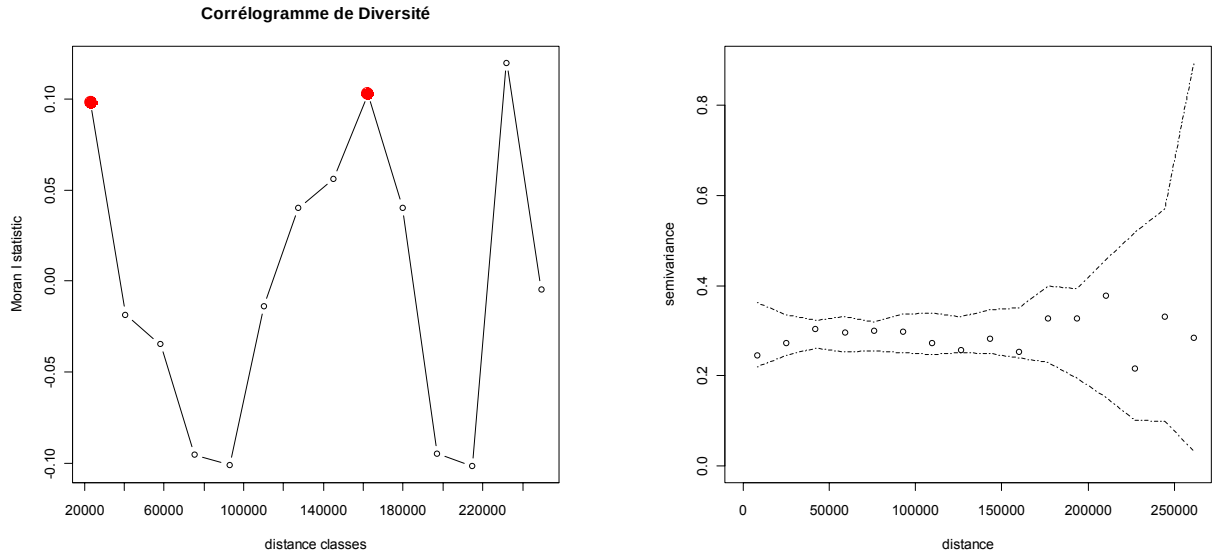
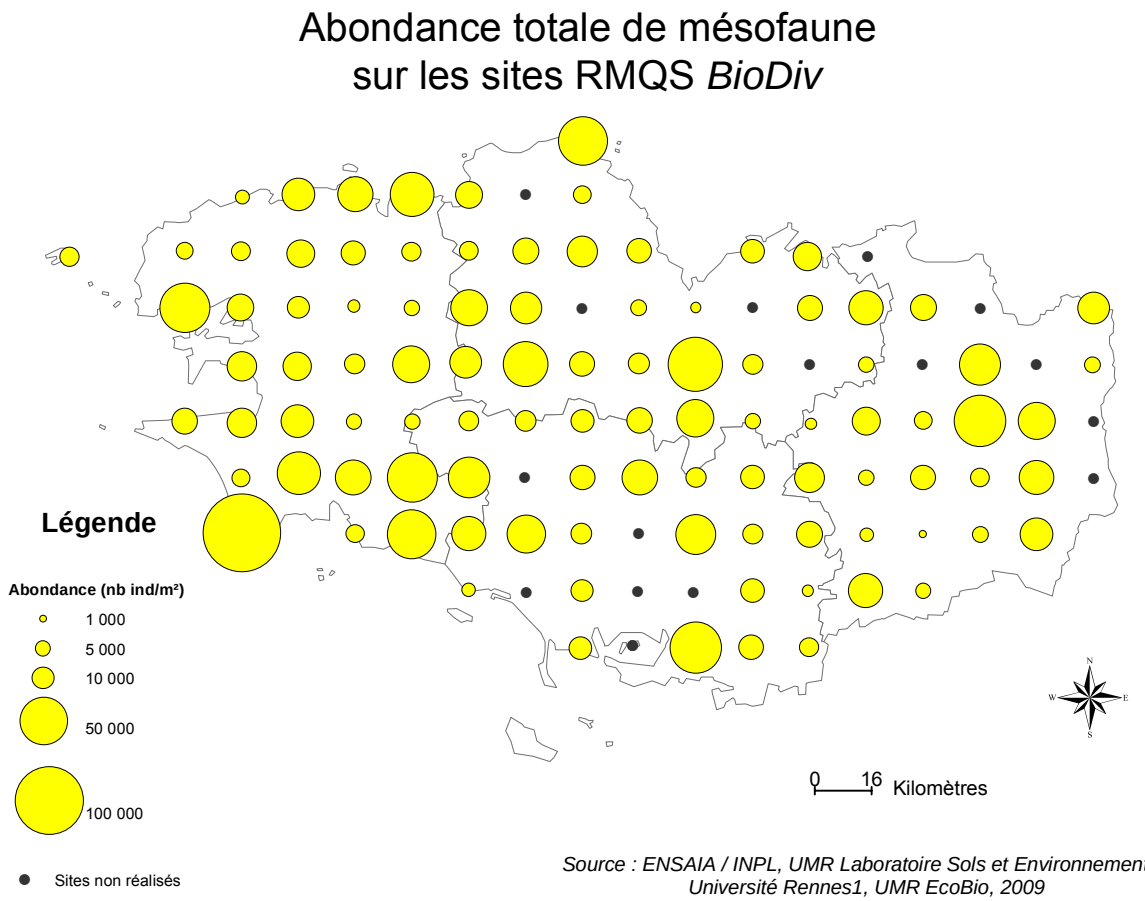


Figure 11 : Corrélogramme (a) et semi-variogramme (b) de la diversité de collemboles



Source : ENSAIA / INPL, UMR Laboratoire Sols et Environnement et Université Rennes1, UMR EcoBio, 2009

Figure 12 : Cartes de l'abondance totale de mésofaune

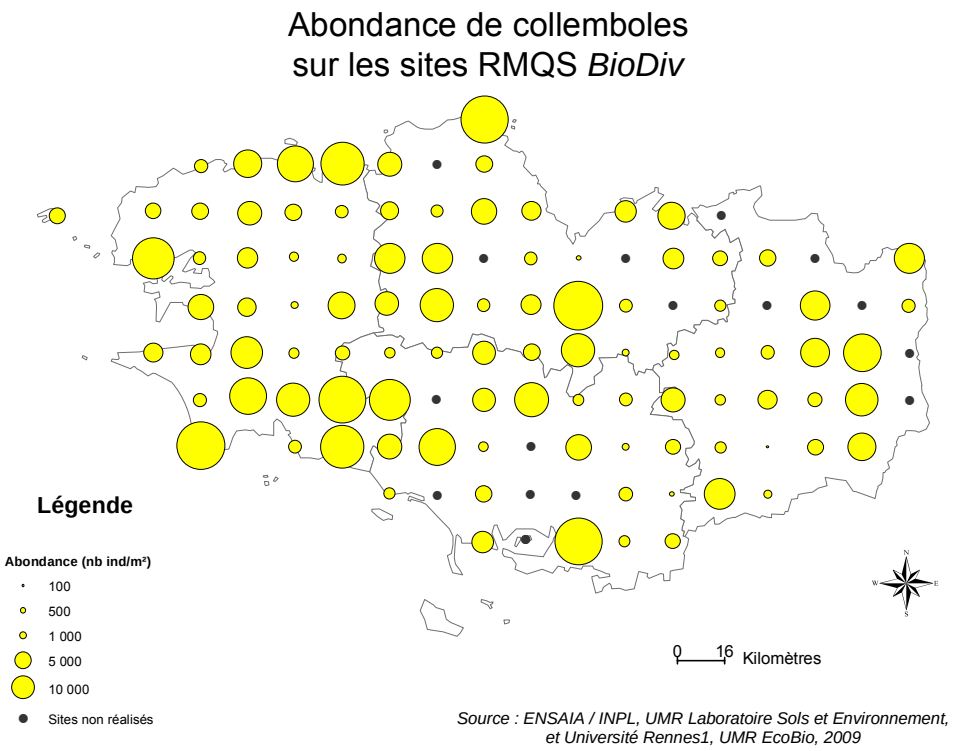


Figure 13 : Cartes de l'abondance de collemboles

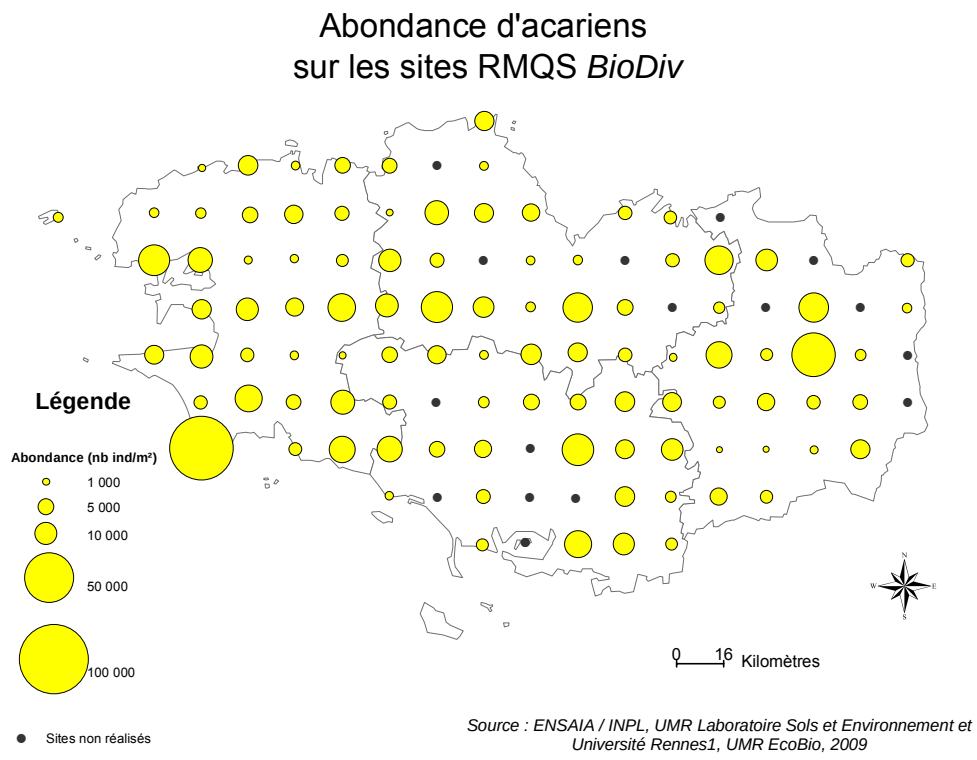
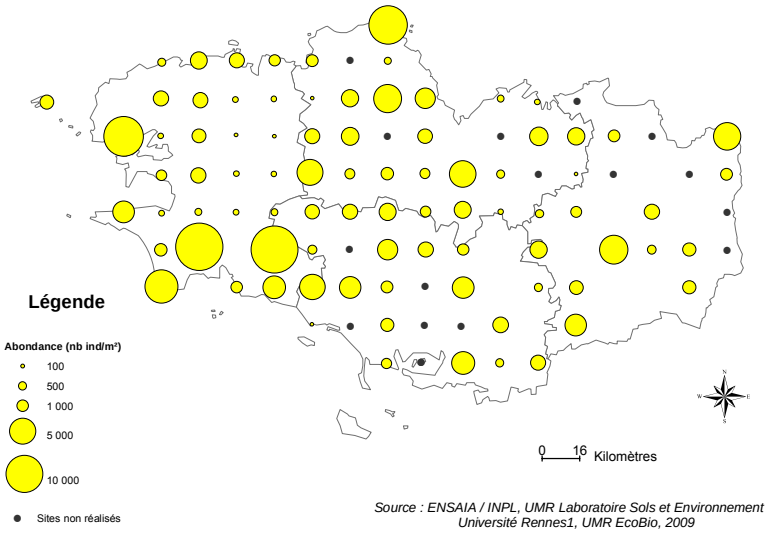


Figure 14 : Cartes de l'abondance d'acariens

a)

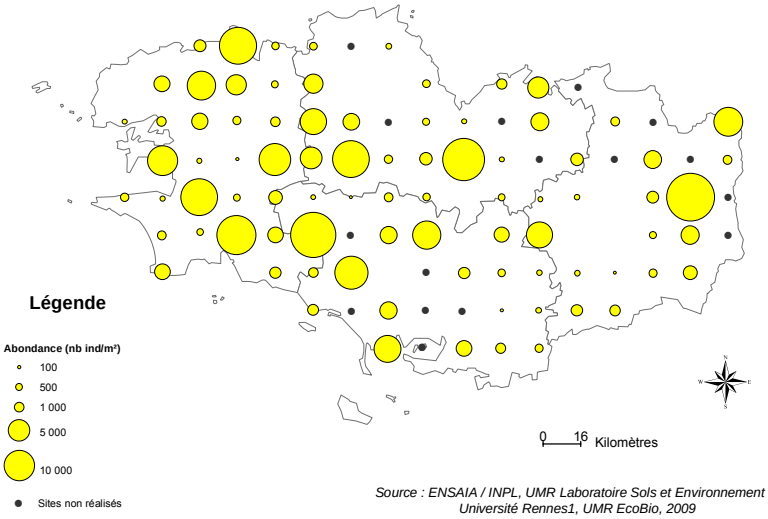
Abondance de collemboles épi-édaphiques
sur les sites RMQS *BioDiv*



Source : ENSAIA / INPL, UMR Laboratoire Sols et Environnement et Université Rennes1, UMR EcoBio, 2009

b)

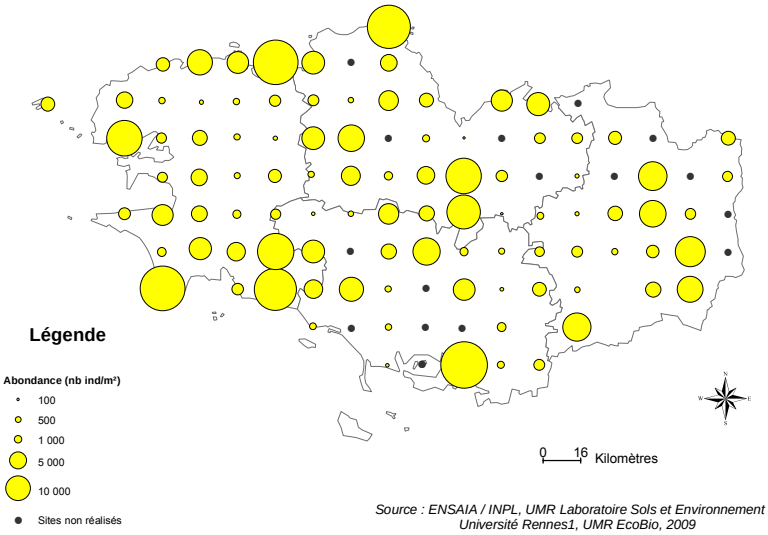
Abondance de collemboles hémi-édaphiques
sur les sites RMQS *BioDiv*



Source : ENSAIA / INPL, UMR Laboratoire Sols et Environnement et Université Rennes1, UMR EcoBio, 2009

c)

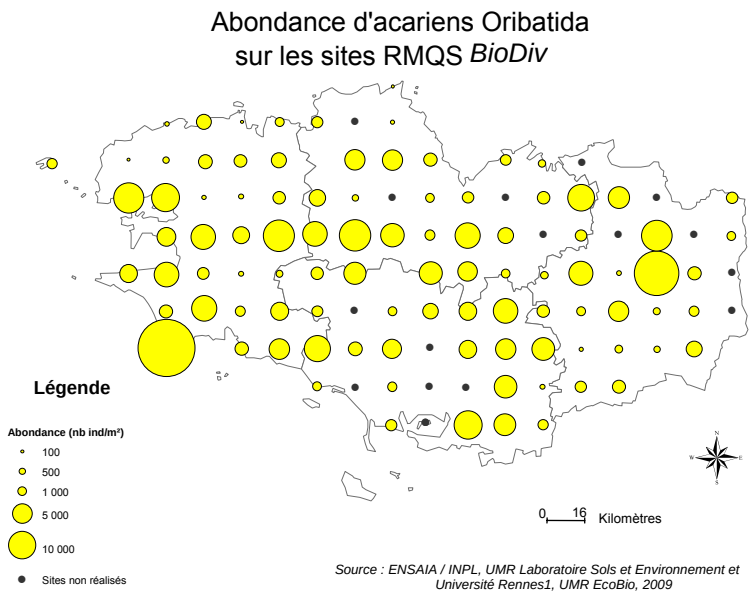
Abondance de collemboles eu-édaphiques
sur les sites RMQS *BioDiv*



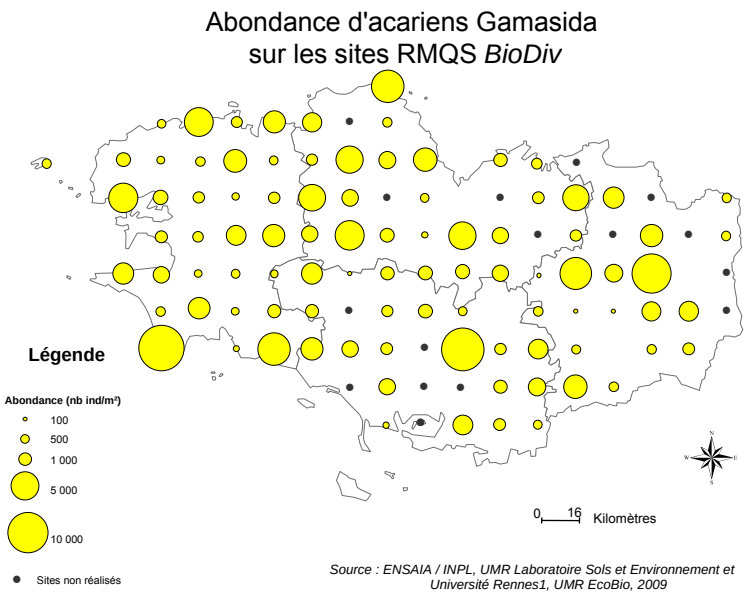
Source : ENSAIA / INPL, UMR Laboratoire Sols et Environnement et Université Rennes1, UMR EcoBio, 2009

Figure 15 : Cartes des types biologiques de collemboles

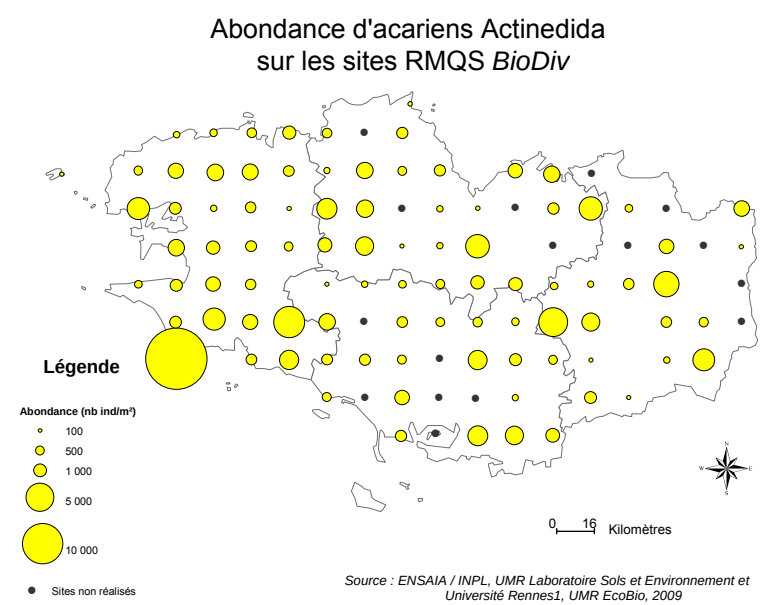
a)



b)



c)



d)

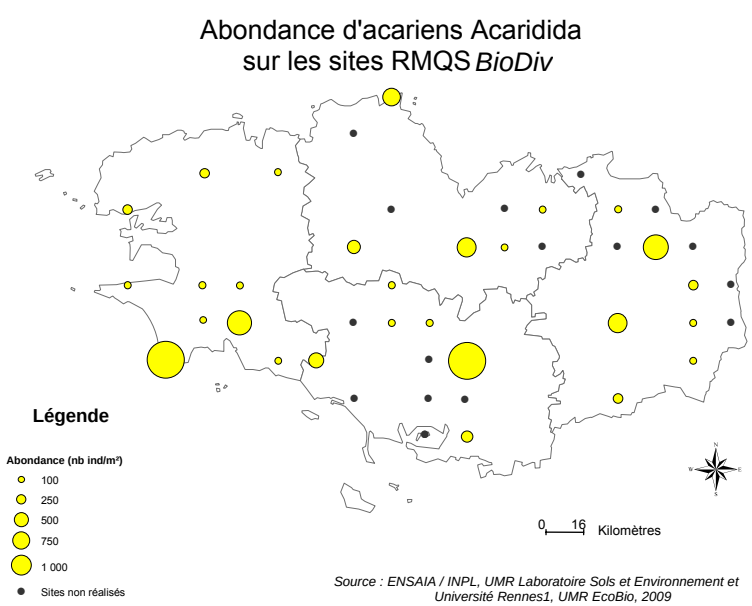
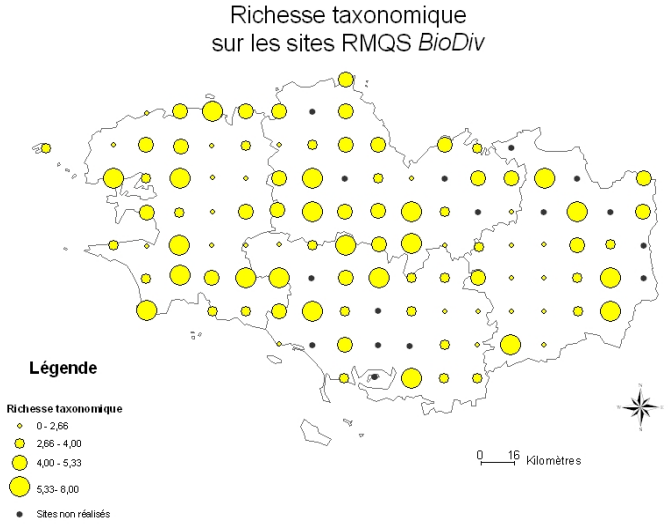
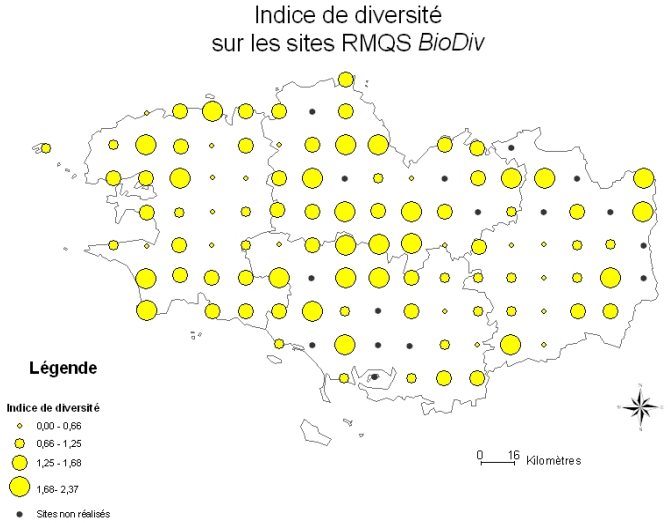


Figure 16 : Cartogramme des sous-ordres d'acariens

a)



b)



c)

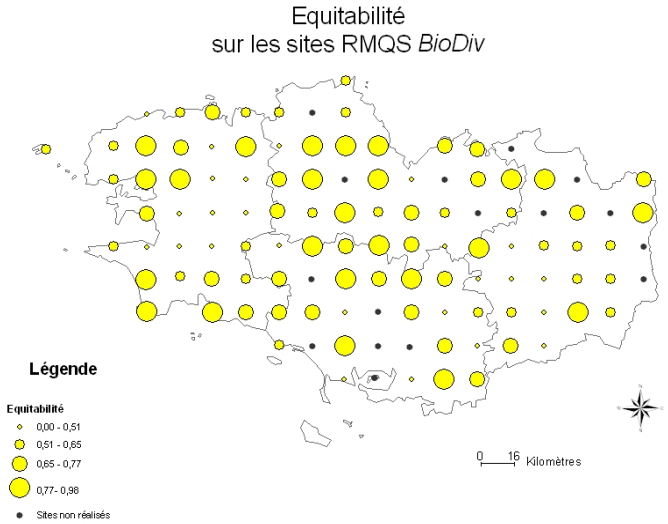


Figure 17 : Cartes des paramètres de diversité
a) Richesse taxonomique, b) Indice de diversité et c) Equitabilité

2.2 Structuration spatiale des taxons de collemboles

Les abondances des principaux taxons de collemboles présents sur les sites RMQS *BioDiv* sont représentées spatialement sous forme de cartes (Annexe II).
La présence d'autocorrélation spatiale des taxons de collemboles a été testée par un test Join-Count[6]. Pour ce test, l'information sur les taxons est codée en présence/absence.

Deux taxons présentent des résultats significatifs d'autocorrélation spatiale. Il s'agit de *Desoria sp.* (z = 2,41 ; p = 0,01) et *Mesaphorura macrochaeta* (z = 2,96 ; p = 0,003) (Figure 18). A noter que sur les 24 sites où le genre *Desoria* a été échantillonné, 16 sites sont des sites de cultures et 8 sites sont des prairies. Ainsi, *Desoria* a uniquement été échantillonné dans les milieux ouverts.
Par ailleurs, les spécimens regroupés sous le genre indéterminé *Mesaphorura* sp. appartiennent à plusieurs espèces dont *Mesaphorura macrochaeta*. Ainsi, l'abondance de cette dernière espèce est sous-estimée. Il est, par conséquent, peu pertinent d'essayer d'expliquer la structuration spatiale observée pour cette espèce.

a) **b)**

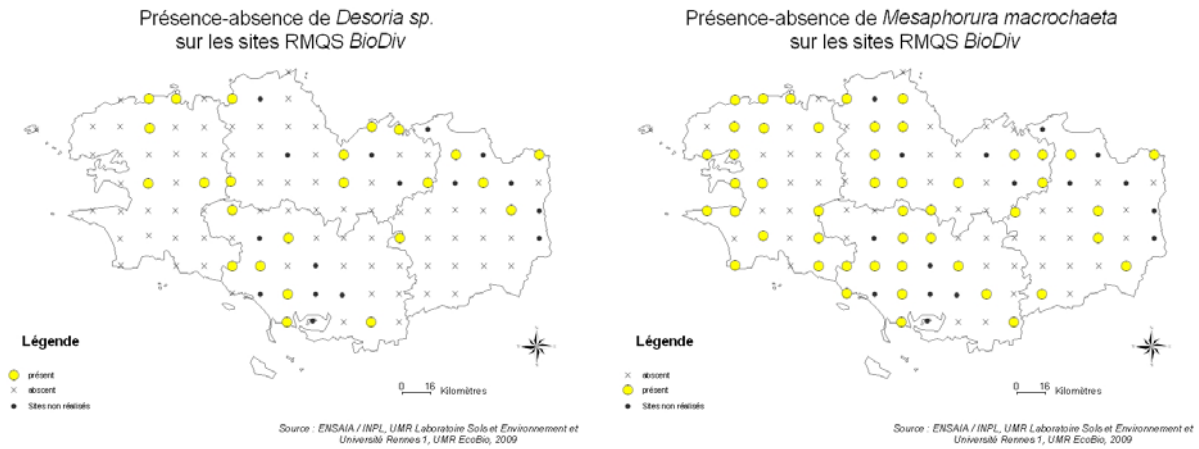


Figure 18 : Répartition de taxons de collemboles présentant une structuration spatiale

[6] Joint-Count : Si Z>1,96, on conclut alors à une autocorrélation positive : la variable étudiée présente une structure spatiale non aléatoire. L'autocorrélation « positive » traduit un regroupement des valeurs de la variable en agrégat ou en patch : on a beaucoup de chance de trouver « présent » près de « présent » et « absent » près d' « absent ». Si Z < -1.96 l'autocorrélation est négative. Les fonctions joincount.test et joincount.mc (package : spdep) du logiciel R sont utilisées.

3. Mésofaune et variables explicatives

3.1 Paramètres de mésofaune en lien avec les variables explicatives

3.1.1 Mésofaune et paramètres physico-chimiques

Les paramètres de mésofaune ont été confrontés aux résultats d'analyses physico-chimiques des sites RMQS. Il existe plusieurs outils statistiques qui permettent d'étudier ce lien tels que les corrélations de Spearman (Tableau 4).

L'abondance totale des collemboles présente des corrélations de Spearman significatives et négatives (alpha = 0,05) avec de nombreux composés métalliques comme le fer, le chrome, le cuivre, le nickel mais aussi avec le manganèse et le cobalt. Les effets des composés métalliques diffèrent selon les études prises en considération mais on admet généralement que, l'effet des polluants métalliques étant spécifique (Fountain et Hopkin, 2004), la structure des communautés soumises à ce genre de contaminants en est modifiée (Chauvat et Ponge, 2002; Gillet et Ponge, 2003). Par exemple, les communautés de la mésofaune du sol le long d'un gradient de pollution métallique ont montré un appauvrissement en espèces et en abondance des communautés sur les sites les plus pollués (Fountain et Hopkin, 2004). Des corrélations significativement positives sont observées avec le sodium et le calcium. Concernant le sodium, le cartogramme des collemboles totaux a effectivement montré une présence plus prononcée, mais non significative, de ces collemboles en bord de mer. Le calcium, quant à lui, fait partie intégrante du complexe argilo-humique en assurant des liaisons solides et stables entre les argiles et des polymères organiques, empêchant ainsi une minéralisation trop rapide de la matière organique humifiée et procurant au sol des propriétés favorables à sa fertilité (Gobat *et al.*, 1998). Ces conditions semblent ainsi profitables aux collemboles totaux et hémiédaphiques (Figure 19a). Les collemboles épiédaphiques montrent de nombreuses corrélations positives avec les paramètres physico-chimiques du sol tels que le pH, la CEC, le phosphore, le potassium et le calcium, qui reflètent indirectement le type d'usage des sols (Figure 19b). Ces collemboles épiédaphiques sont ainsi plus abondants dans les sols cultivés, caractérisés par des CEC, des

teneurs en phosphore et en potassium élevées (Cf. 3.1.2.1.). On observe également des corrélations négatives avec l'aluminium échangeable et avec le sodium. En effet, comme le montrent les cartogrammes ci-dessus (Figure 15), les collemboles épiédaphiques ne sont pas nombreux sur les sites côtiers à l'inverse des collemboles totaux et euédaphiques qui montrent une corrélation positive avec le sodium. Ces collemboles euédaphiques sont significativement et négativement corrélés avec la présence de nombreux métaux tels que le fer (libre et total), le cobalt, le chrome, le nickel et le zinc totaux. Lock *et al*. (2003) et Fountain et Hopkin (2004) ont également émis l'hypothèse selon laquelle les collemboles euédaphiques, peu mobiles par l'absence de furca (Ponge *et al.*, 2006) seraient plus sensibles à la pollution métallique des sols étant donné qu'ils vivent en contact avec le sol. De plus, ils pourraient être moins résilients en cas de perturbations du milieu. On note également une corrélation positive significative entre la densité de collemboles euédaphiques et le C/N (Figure 19c), reflétant la quantité et la qualité de la litière (Gobat *et al.*, 1998). Ainsi, leur densité serait d'autant plus élevée que la matière organique aurait tendance à s'accumuler, ce qui est le cas des milieux forestiers de notre étude.

Les acariens sont moins sensibles aux conditions du milieu et ne présentent que quelques corrélations significatives. Les acariens Oribatida, connus pour posséder une forte capacité d'accumulation des métaux (Lebrun et Van Straalen, 1995; Van Straalen *et al.*, 2001; Skubała et Kafel, 2004) présentent ainsi des corrélations significatives et positives avec le fer échangeable, le chrome extractible et l'aluminium total. Cette relation est négative avec le calcium.

A noter également les corrélations significatives et négatives entre les indices d'humus (HI) et l'ensemble de la mésofaune. En effet, l'indice d'humus le plus bas représente les sols grumeleux, avec des teneurs élevées en complexes organo-minéraux, à humification rapide, correspondant à un humus de type Mull (HI = 1). Dans notre étude, ces sols biologiquement actifs semblent donc être caractérisés par une forte densité de microarthropodes. Ces résultats peuvent sembler contradictoire avec la littérature sur le sujet : ainsi Petersen (1982) observe des abondances totales beaucoup plus élevée dans les humus de type mor biologiquement peu actifs comparativement aux humus de type mull. Toutefois, dans l'état de l'art établi par Petersen (1982) la caractérisation des humus ne concerne que les milieux forestiers. Nos résultats sont, en revanche, conformes à ceux observés par Ponge *et al.* (2003), qui montrent des abondances plus élevées pour des indices d'humus faibles.

Tableau 4 : Matrice de corrélations entre les paramètres de mésofaune et les paramètres physico-chimiques.

Variables	AB_mésofaune tot	AB_collembole tot	AB_acarien tot	AB_col EU	AB_col EPI	AB_col HEMI	AB_ac Oribatida	AB_ac Gamasida	AB_ac Actinedida	AB_ac Acaridida
PH_EAU	0,043	0,141	-0,053	-0,051	**0,275**	0,134	-0,149	-0,084	0,121	0,052
CEC	0,071	0,133	0,002	-0,041	**0,207**	0,138	-0,059	-0,036	0,105	0,133
P_ASS	**0,203**	**0,256**	-0,015	-0,006	**0,396**	0,129	-0,101	0,076	0,066	**0,252**
CA_ECH	0,094	0,171	-0,020	-0,061	**0,266**	0,171	-0,109	-0,031	0,127	0,137
K_ECH	-0,043	0,000	-0,078	**-0,293**	**0,223**	-0,058	-0,126	0,035	-0,114	0,072
NA_ECH	0,052	0,031	0,072	0,151	**-0,224**	0,090	0,021	0,153	0,025	-0,004
AL_ECH	-0,056	-0,148	0,059	0,037	**-0,245**	-0,137	0,154	0,079	-0,067	-0,110
MN_ECH	-0,149	**-0,219**	0,012	**-0,214**	-0,171	-0,194	0,091	0,001	-0,137	-0,049
FE_ECH	-0,130	**-0,237**	0,058	-0,008	**-0,296**	-0,192	**0,210**	-0,108	-0,002	-0,124
FE_LIB	-0,115	**-0,229**	0,077	**-0,272**	-0,052	-0,121	0,151	-0,053	0,006	-0,040
CR_EXT	0,187	0,101	**0,204**	**0,207**	-0,055	0,151	**0,240**	0,055	0,130	0,151
NI_EXT	-0,159	-0,103	-0,172	**-0,253**	-0,021	-0,084	-0,152	-0,128	**-0,241**	0,032
ZN_EXT	0,100	0,110	-0,034	-0,151	**0,212**	0,066	-0,090	0,040	-0,011	0,094
AL_TOT	0,135	0,000	**0,251**	0,007	0,016	0,049	**0,240**	0,192	0,061	0,196
CA_TOT	0,107	**0,242**	-0,079	0,163	0,077	**0,237**	**-0,224**	0,079	0,184	0,112
FE_TOT	-0,095	**-0,234**	0,110	**-0,225**	-0,151	-0,098	0,142	0,082	-0,022	-0,023
NA_TOT	0,180	**0,254**	-0,005	**0,220**	-0,053	**0,222**	-0,117	0,101	0,080	0,146
CO_TOT	-0,142	**-0,256**	0,044	**-0,250**	-0,155	-0,169	0,083	0,078	-0,144	-0,044
CR_TOT	-0,152	**-0,268**	0,070	**-0,283**	-0,038	-0,153	0,172	0,030	-0,046	-0,013
NI_TOT	-0,144	**-0,255**	0,044	**-0,262**	-0,064	-0,186	0,124	0,008	-0,063	-0,033
ZN_TOT	-0,026	-0,134	0,101	**-0,201**	0,021	-0,075	0,120	0,097	-0,032	0,096
C/N	0,189	0,131	0,157	**0,365**	0,015	0,066	0,148	0,123	**0,214**	0,059
HI	**-0,345**	**-0,368**	**-0,230**	**-0,196**	**-0,256**	**-0,304**	**-0,139**	**-0,231**	**-0,187**	**-0,246**

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

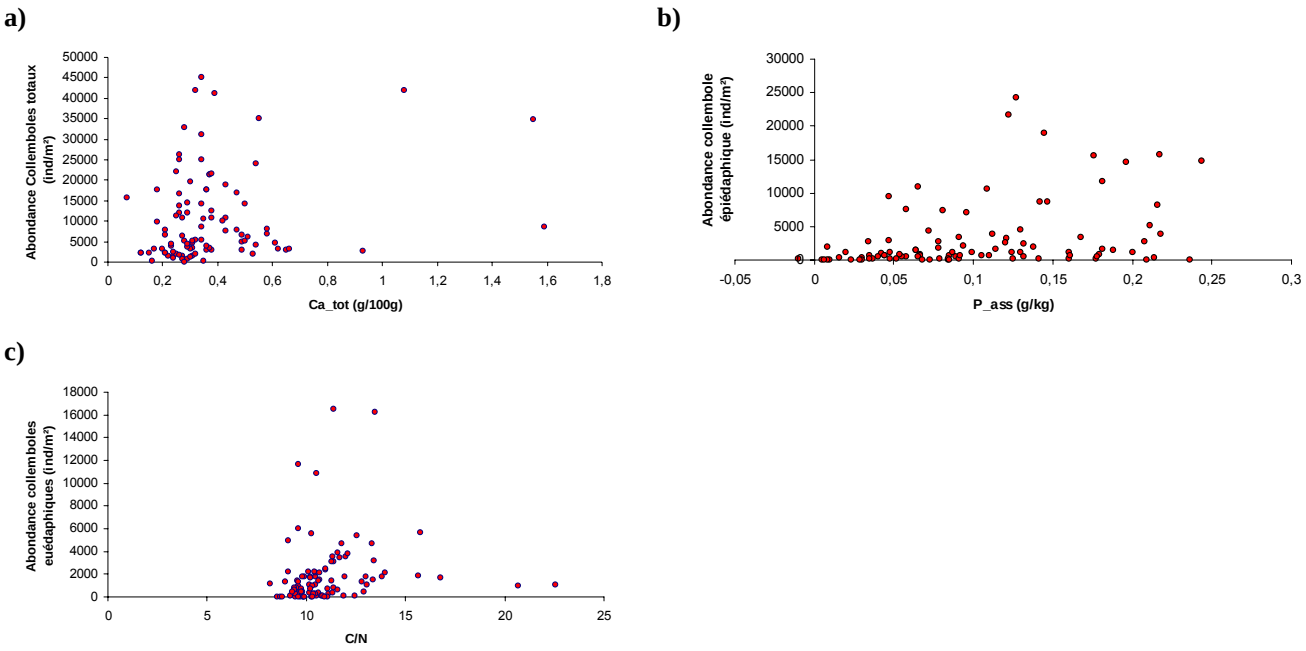


Figure 19 : Abondance des collemboles totaux en fonction de la concentration en calcium total (a), abondance des collemboles épiédaphiques en fonction de la concentration en phosphore assimilable (b) et abondance des collemboles euédaphiques en fonction du ratio C/N (c).

3.1.2 Mésofaune et occupation des sols

3.1.2.1 Occupation du sol : premier niveau

Les sites RMQS *BioDiv* ont été, dans un premier temps, classés selon la nature du système auquel ils appartiennent : **C**ulture, **P**rairie ou **F**orêt.

Les communautés mésofauniques échantillonnées sur les différents sites sont composées de 59,0 à 64,7% de collemboles, respectivement, sur les sites de prairie et de culture, qui sont des milieux ouverts. La proportion des collemboles est plus faible dans les milieux forestiers et ne représente que 27,6% des communautés. Les proportions d'acariens varient de 31,5 à 38,2% des communautés échantillonnées sur les sites de culture et de prairie. Cette proportion est deux fois plus élevée sur les sites forestiers où les acariens représentent 65,5% des effectifs (Figure 20). Globalement, les densités moyennes de collemboles observées en prairies et forêts, 36308 m^{-2} et 16360 m^{-2} respectivement, sont comparables à la gamme de valeurs rencontrées dans la littérature. Cependant, cette même littérature montre que, généralement, la densité de collemboles est plus élevée en milieu forestier (Petersen, 1982). Pour exemple, Ponge *et al.* (2003), dans leur étude réalisée au sein du parc naturel régional du Morvan, ont trouvé des densités de collemboles égales à 46860 ind/m² en prairie et 66730 ind/m² en milieu forestier. Il est à noter que le nombre de sites forestiers est relativement faible dans notre étude (N=8), comparé aux 47 sites de culture et 42 sites de prairie.

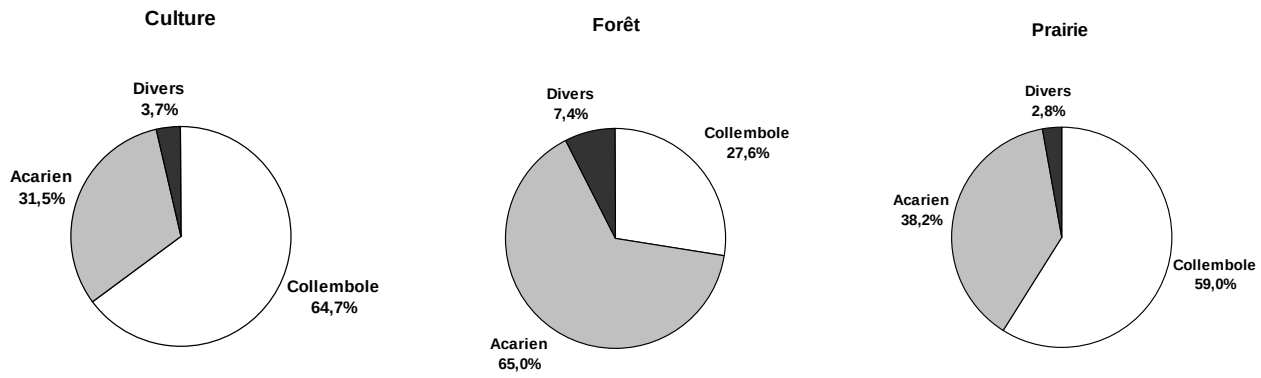


Figure 20 : Abondance relative globale des collemboles, des acariens et des microarthropodes divers sur les sites de culture, forêt et prairie.

Les Oribatida constituent généralement la principale composante des populations d'acariens. Ainsi, dans cette étude, ils représentent 52,1%, 55,5% et 66,7% des

acariens échantillonnés, respectivement, en prairies, cultures et forêts. Les proportions d'acariens Gamasida, essentiellement prédateurs, sont relativement stables et sont égales à 22,4% et 25,2% sur, respectivement, les sites forestiers et de culture et avec un maximum de 29,6% sur les prairies. Les acariens Actinedida ont également une proportion plus élevée sur les cultures et les prairies où ils représentent jusqu'à 17,3% et 15,3% des acariens. Leur proportion est plus faible sur les sites forestiers (10,9%) (Figure 21).

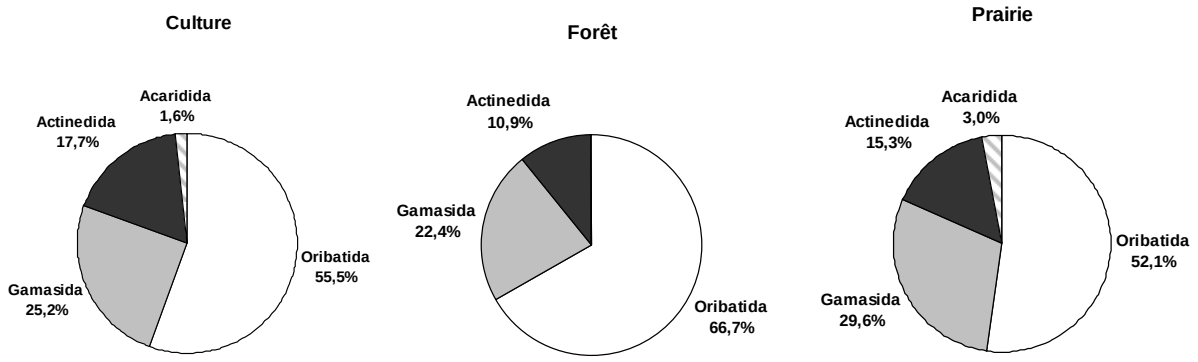


Figure 21 : Abondance relative des différents sous-ordres d'acariens sur les sites de culture, forêt et prairie.

La structure des populations d'acariens échantillonnées sur la zone OPE-Andra est relativement comparable à celle observée dans notre étude. En effet, sur la zone OPE-Andra, la proportion d'acariens Oribatida varie de 65,9% sur les sites forestiers à 70,1% sur les sites de culture, avec une plus faible proportion sur les sites prairiaux (32,4%). Les proportion de Gamasida sont également stables et sont égales à 17,7%, 24,9% et 25,0% sur, respectivement, les forêts, les cultures et les prairies. Les proportions d'Actinedida sont plus hétérogènes avec 5,0% en culture, 16,5% en forêt et 42,6% en prairie (Maillant *et al.*, 2009).

La proportion des différents types biologiques de collemboles varie selon le type d'usage des sols. Les collemboles hémiédaphiques représentent plus de la moitié des collemboles sur les sites forestiers (55,6%) et les prairies (62,7%). Cette proportion est plus faible en cultures (44,8%). Les collemboles épiédaphiques sont très peu présents en forêt où ils représentent moins de 5% des effectifs. En prairie, cette proportion est de 17,8% et atteint 44,8% en culture. En milieux ouverts, les

collemboles euédaphiques représentent 15,6% et 19,5%, sur, respectivement, les cultures et les prairies. En forêts, cette proportion atteint 39,6% de la population de collemboles (Figure 22).

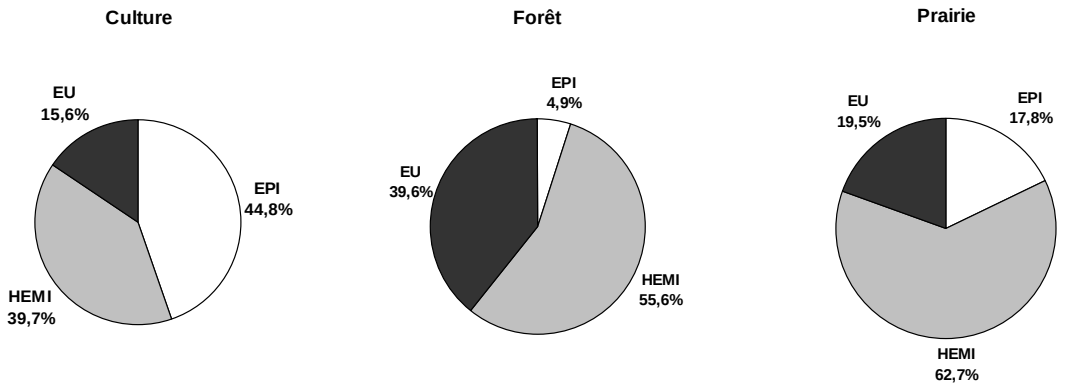


Figure 22 : Abondance relative des différents types biologiques de collemboles sur les sites de culture, de forêt et de prairie.

Des tests de Kruskal-Wallis sont effectués pour chaque paramètre en fonction de ces 3 systèmes. Une procédure de comparaisons multiples est ensuite appliquée pour identifier les groupes présentant des différences (méthode de Dunn et correction du niveau de signification de Bonferroni). Les boîtes à moustaches illustrent les résultats.

Le test de Kruskal-Wallis est significatif pour les paramètres d'abondance totale en acariens totaux, en acariens Oribatida et Gamasida et en collemboles épiédaphiques (Tableau 5).

Comme attendu (Petersen, 1982), les acariens, principalement représentés par les Oribatida et Gamasida, sont significativement plus nombreux sur les sites forestiers, de types moder, caractérisés par un pH acide compris en 4 et 5,4 (Figure 23a.b).

En revanche, l'abondance des collemboles épiédaphiques permet de bien discriminer les systèmes cultivés (culture et prairie) des systèmes forestiers, caractérisés par des densités plus faibles (Figure 23c). Ces résultats concordent avec ceux de Ponge *et al* (2006) montrant que les espèces à fort pouvoir de dispersion, qui caractérisent généralement les collemboles épiédaphiques, sont favorisés dans les systèmes ouverts, prairies ou grandes cultures, par rapport aux systèmes forestiers fermés.

Tableau 5 : Synthèse des tests de Kruskal-Wallis par système d'occupation des sols (1er niveau)

Paramètres mésofaune	Valeur de H	p	significativité	C (N=47)	P (N=42)	F (N=8)
Paramètres globaux						
Abondance de mésofaune	1,205	0,548	ns			
Abondance de collemboles	2,233	0,327	ns			
Abondance d'acariens	**12,046**	**0,002**	**s**	**b**	**a**	**a**
Paramètres fonctionnels						
Type biologique de collemboles						
Abondance des épi-édaphiques	**16,804**	**0,0001**	**s**	**a**	**a**	**b**
Abondance des hémi-édaphiques	2,2197	0,3296	ns			
Abondance des eu-édaphiques	5,596	0,0609	ns			
Sous-ordre d'acariens						
Abondance des Oribatida	**11,411**	**0,0033**	**s**	**b**	**a,b**	**a**
Abondance des Gamasida	**7,869**	**0,01955**	**s**	**b**	**a**	**a**
Abondance des Actinedida	1,121	0,5709	ns			
Paramètres de diversité						
Richesse taxo	0,231	0,891	ns			
Indice de Shannon	0,551	0,759	ns			
Equitabilité	4,913	0,086	ns			

N = 97

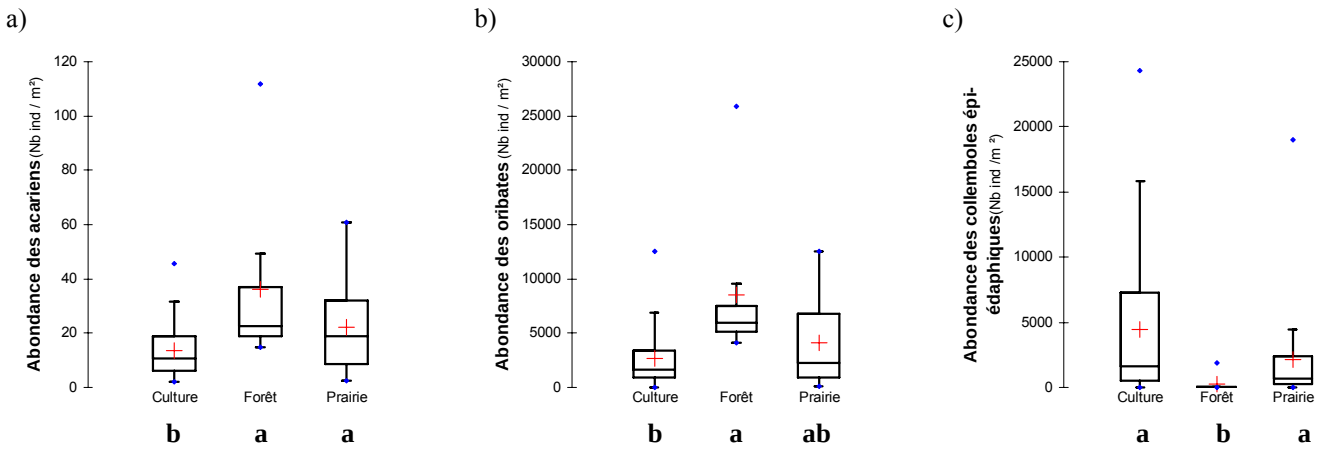


Figure 23 : Abondance des acariens totaux (a), des acariens Oribatida (b) et des collemboles épiédaphiques (c) par occupation du sol (1er niveau)

C= Culture (N = 47) ;P=Prairie (N = 42) ; F=Forêt (N = 8)

Les lettres sous les graphs indiquent des moyennes significativement différentes d'après le test de Kruskal-Wallis à p<0,05

3.1.2.2 Occupation du sol : deuxième niveau

Dans un second temps, la classification de l'occupation du sol a été affinée en se basant, dans la mesure du possible, sur la codification FAO[7]. 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 mêmes traitements statistiques sont appliqués que précédemment (test de Kruskal-Wallis et correction de Bonferroni).

Le test de Kruskal-Wallis est significatif pour les paramètres d'abondance des acariens totaux et d'Oribatida ainsi que pour les collemboles épiédaphiques (Tableau 6).

Tableau 6 : Synthèse des tests de Kruskal-Wallis par système d'occupation des sols (2ème niveau)

Paramètres mésofaune	Valeur de H	p.value	significativité	AA (N=38)	AA/M (N=10)	M/AA (N=21)	Mp (N=20)	F (N=8)
Paramètres globaux								
Abondance de mésofaune	4,019	0,403	ns					
Abondance de collemboles	6,261	0,180	ns					
Abondance d'acariens	12,995	0,011	**s**	**a**	**a**	**a**	**a**	**a**
Paramètres fonctionnels								
Type biologique de collemboles								
Abondance des épi-édaphiques	20,737	0,0000	**s**	**a**	**a**	**a**	**a,b**	**b**
Abondance des hémi-édaphiques	7,6602	0,1048	ns					
Abondance des eu-édaphiques	6,7216	0,1514	ns					
Sous-ordre d'acariens								
Abondance des Oribatida	11,2202	0,0242	**s**	**b**	**b**	**a,b**	**a,b**	**a**
Abondance des Gamasida	8,6226	0,0713	ns					
Abondance des Actinedida	5,9771	0,2009	ns					
Paramètres de diversité								
Richesse taxonomique	4,406	0,354	ns					
Indice de Shannon	3,684	0,450	ns					
Equitabilité	6,733	0,151	ns					

N = 97

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

Les résultats concernant l'abondance des acariens totaux sont identiques à ceux observés dans le chapitre 3.1.2.1. En effet, les acariens ont tendance à être plus abondants en milieu forestier. Ainsi, les acariens totaux n'apportent ici aucune information supplémentaire quand on utilise ce second niveau d'analyse. En revanche, l'abondance d'Oribatida décroît graduellement des milieux forestiers jusqu'aux cultures, les prairies occupant une position intermédiaire, et ce quel que soit leur historique. Ainsi, c'est l'usage (prairie, culture ou forêt) plutôt que la pratique (Mp, M/AA, AA, AA/M) au moment du prélèvement qui semble déterminant dans l'abondance des acariens (Figure 24a.b)

Cependant, si les collemboles épiédaphiques permettent de discriminer les milieux ouverts (culture et prairies) des milieux fermés (forêts) (Cf. 3.1.2.1.), ils ont également tendance à montrer un gradient croissant de stabilité des milieux cultivés incluant les prairies temporaires (M/AA), jusqu'aux milieux forestiers. Les prairies permanentes occupent une position intermédiaire au sein de ce gradient (Figure 24c).

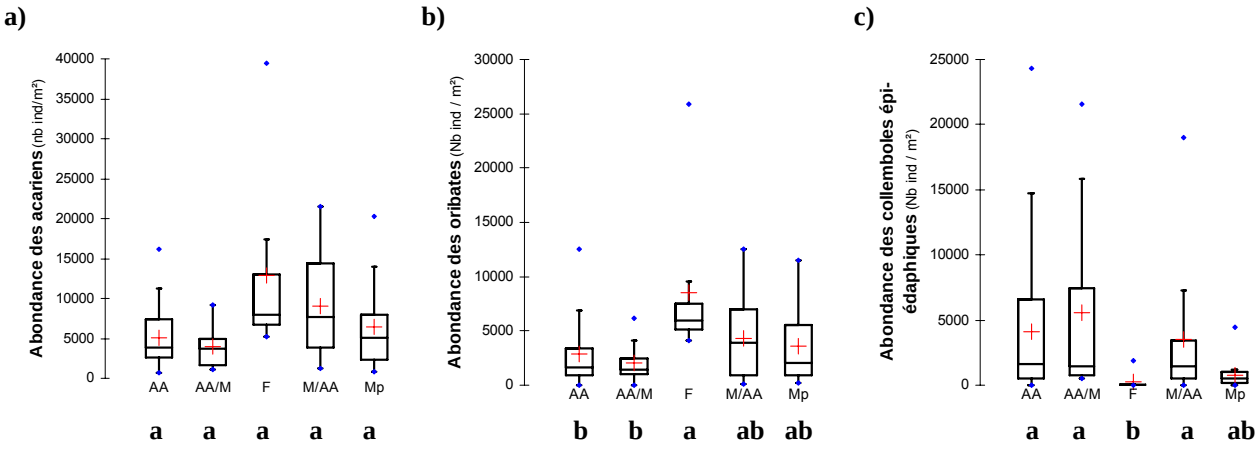


Figure 24 : Abondance des acariens totaux (a), des acariens Oribatida (b) et des collemboles épiédaphiques (c) par occupation du sol (2ème niveau)

AA (N = 38) ; AA/M (N = 10) ; F (N = 8) ; M/AA (N = 21) ; Mp (N = 20)

Les lettres sous les graphs indiquent des moyennes significativement différentes d'après le test de Kruskal-Wallis à $p<0,05$

Le nombre total d'espèces identifiées en milieu forestier est comparable aux valeurs observés par Usher (1970) en Suède, soit entre 24 et 32 espèces dans différentes forêt de conifères mais faible par rapport aux résultats de Ponge et al. (2003) qui rapportent 42 espèces identifiées dans des milieux comparables. De la même façon, la richesse spécifique mesurée en culture est plus faible dans notre étude (36 espèces en grandes cultures AA et 23 en cultures en rotation avec prairie AA/M) que celle mesurée par Ponge et al. (2003) qui ont répertorié 47 espèces. Cette dernière étude montre également une richesse spécifique maximum de 42 espèces en prairie ; cette richesse est légèrement plus élevée que celle mesurée sur nos sites prairiaux de Bretagne et qui varie de 36 à 37 selon que cette prairie soit en rotation avec les cultures (M/AA) ou permanente (Mp) (Tableau 7).

Tableau 7 : Richesse spécifique maximale des collemboles pour chaque type d'occupation des sols

	AA	AA/M	M/AA	Mp	F	D
S_{max}	36	23	36	37	27	10

Les valeurs d'équitabilité calculées ont des moyennes supérieures à 0,6, ce qui implique une bonne répartition des espèces dans les échantillons (Figure 25). On n'observe donc pas de phénomènes de dominance. Notons que l'équitabilité a tendance à être plus élevée dans les sites forestiers.

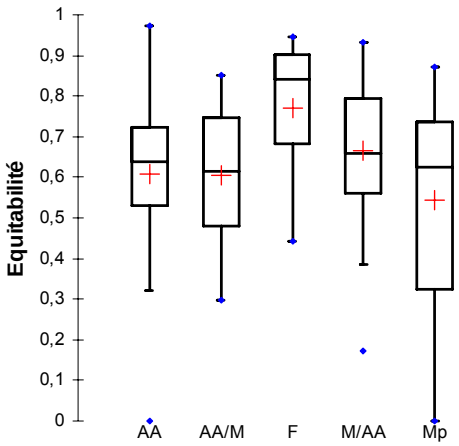


Figure 25 : Equitabilité en fonction de l'occupation du sol (2ème niveau)

3.1.3 Mésofaune et pratiques agricoles

Afin de compléter les résultats obtenus concernant les effets des usages et des pratiques utilisées en milieux cultivés, des analyses complémentaires ont été effectué sur un jeu de données excluant les sites forestiers, non concernés par ces pratiques.

Les pratiques agricoles étudiées, ici, sont :

- le type de fertilisation (pas de fertilisation, minérale, organique, minérale et organique)
- l'amendement et fertilisation organique (pas d'amendement, non-pailleux, pailleux, mixte : fumier +lisier)
- le travail du sol (pas de travail, travail sans labour, travail inf à 25cm, travail sup à 25cm)
- les traitements phytoparasitaires (oui, non)

Les mêmes traitements statistiques sont appliqués que précédemment (test de Kruskal-Wallis et correction de Boneferroni) pour la majorité des variables. Un test de Mann-Whitney est réalisé pour la variable présence ou absence de traitements phytosanitaires.

Les tests de Kruskal-Wallis ne sont pas significatifs pour les paramètres globaux de mésofaune. L'abondance de collemboles épiédaphiques est significativement plus élevée sur les sites bénéficiant d'une fertilisation (Tableau 8). Cet effet est d'autant plus élevé que cette fertilisation est organique ou organo-minérale.

Tableau 8 : Synthèse des tests de Kruskal-Wallis et Mann-Whitney réalisés avec les variables pratiques agricoles

	Kruskal-Wallis	p-value	Significativité
Type de fertilisation			
Abondance de mésofaune	1,09	0,78	ns
Abondance d'acariens	0,77	0,86	ns
Abondance d'acariens Gamasida	4,35	0,23	ns
Abondance d'acariens Oribatida	2,24	0,52	ns
Abondance d'acariens Actinedida	1,84	0,61	ns
Abondance de collemboles	2,64	0,45	ns
Abondance de collemboles épiédaphiques	**9,53**	**0,02**	**s**
Abondance de collemboles hémiédaphiques	1,44	0,70	ns
Abondance de collemboles euédaphiques	1,33	0,72	ns
Richesse taxonomique	3,71	0,29	ns
Indice de Shannon	3,73	0,29	ns
Equitabilité	1,15	0,76	ns
Amendement et fertilisation organique			
Abondance de mésofaune	0,32	0,96	ns
Abondance d'acariens	1,44	0,70	ns
Abondance d'acariens Gamasida	2,47	0,48	ns

Abondance d'acariens Oribatida	1,85	0,61	ns
Abondance d'acariens Actinedida	2,50	0,48	ns
Abondance de collemboles	2,07	0,56	ns
Abondance de collemboles épiédaphiques	5,29	0,15	ns
Abondance de collemboles hémiédaphiques	0,65	0,88	ns
Abondance de collemboles euédaphiques	2,63	0,45	ns
Richesse taxonomique	1,70	0,64	ns
Indice de Shannon	2,10	0,55	ns
Equitabilité	1,06	0,79	ns
Travail du sol			
Abondance de mésofaune	1,53	0,68	ns
Abondance d'acariens	4,09	0,25	ns
Abondance d'acariens Gamasida	1,66	0,65	ns
Abondance d'acariens Oribatida	3,36	0,34	ns
Abondance d'acariens Actinedida	2,25	0,52	ns
Abondance de collemboles	0,23	0,97	ns
Abondance de collemboles épiédaphiques	3,63	0,30	ns
Abondance de collemboles hémiédaphiques	0,92	0,82	ns
Abondance de collemboles euédaphiques	2,70	0,44	ns
Richesse taxonomique	0,95	0,81	ns
Indice de Shannon	0,38	0,95	ns
Equitabilité	0,59	0,90	ns
	Mann Whitney	**p-value**	**Significativité**
Traitement phytosanitaire			
Abondance de mésofaune	611,5	0,77	ns
Abondance d'acariens	524	0,52	ns
Abondance d'acariens Gamasida	499	0,37	ns
Abondance d'acariens Oribatida	623	0,68	ns
Abondance d'acariens Actinedida	583	1,00	ns
Abondance de collemboles	619,5	0,71	ns
Abondance de collemboles épiédaphiques	545,5	0,68	ns
Abondance de collemboles hémiédaphiques	595	0,91	ns
Abondance de collemboles euédaphiques	725	0,13	ns
Richesse taxonomique	564	0,83	ns
Indice de Shannon	561	0,81	ns
Equitabilité	534	0,59	ns

3.1.4 Mésofaune et caractéristiques pédologiques

Les données pédologiques utilisées ici sont basées sur le code tarière. Ce code synthétique rassemble des informations sur :

- la géologie
- l'hydromorphie
- le profil de sol
- la profondeur de sol

Les mêmes traitements statistiques que ceux précédemment utilisés sont appliqués (test de Kruskal-Wallis et correction de Bonferroni).

Peu de paramètres concernant la mésofaune présentent des résultats significatifs avec les variables pédologiques. Aucun résultat significatif n'est retrouvé avec les variables profil de sol et profondeur de sol (Tableau 9).

Les paramètres de mésofaune qui présentent des résultats significatifs sont :

- abondance des Oribatida et géologie (Figure 26)
- abondance des collemboles hémiédaphiques et hydromorphie (Figure 27a)
- richesse taxonomique et hydromorphie (Figure 27b)

On observe significativement plus d'Oribatida sur substrat gneissique (I) que sur substrat colluvial et alluvial (U et V). En effet, les gneiss génèrent souvent des sols pauvres et acides alors que les substrats d'origine colluviale et alluviale génèrent des sols profonds et riches. D'ailleurs, dans notre étude, un tiers des sites gneissiques est recouvert par des forêts, dont l'abondance en Oribatida est significativement supérieure aux milieux cultivés ; alors que les sites sur substrat colluvial et alluvial sont recouverts par des cultures et des prairies.

Par ailleurs, l'abondance des collemboles, particulièrement les hémiédaphiques (53% de l'abondance totale de collemboles), ainsi que la richesse spécifique sont significativement plus faibles dans les sols soumis à une hydromorphie sévère. En effet, les collemboles du sol sont généralement hygrobiontes et non hydrobiontes, les sols souvent saturés en eau ne leur seraient *a priori* pas favorables. En effet, les seuls milieux non propices à la prolifération des collemboles sont les milieux aquatiques. Bien que les collemboles soient abondants et variés en bordure de sites aquatiques et milieux humides, aucune espèce n'est adaptée à une vie permanente dans l'eau (Fjellberg, 1998).

La profondeur de sol n'a aucun effet sur les paramètres étudiés de la mésofaune, celle-ci vivant dans les premiers centimètres du sol, et principalement dans les 5 premiers centimètres (Cf. Tome 2 : Protocoles & Procédures).

Tableau 9 : Synthèse des tests de Kruskal-Wallis avec les variables pédologiques

	Kruskal-Wallis	p-value	significativité
Géologie			
Abondance de mésofaune	15,3254	0,0531	ns
Abondance d'acariens	14,8752	0,0616	ns
Abondance d'acariens Gamasida	11,6895	0,1656	ns
Abondance d'acariens Oribatida	**15,9217**	**0,0435**	**s**
Abondance d'acariens Actinedida	8,1811	0,4160	ns
Abondance de collemboles	11,8395	0,1585	ns
Abondance de collemboles épiédaphiques	8,5154	0,3848	ns
Abondance de collemboles hémiédaphiques	6,2911	0,6147	ns
Abondance de collemboles euédaphiques	15,4495	0,0509	ns
Richesse taxonomique	6,0816	0,6381	ns
Indice de Shannon	6,4016	0,6023	ns
Equitabilité	8,3371	0,4012	ns
Hydromorphie			
Abondance de mésofaune	5,0306	0,1696	ns
Abondance d'acariens	1,5143	0,6790	ns
Abondance d'acariens Gamasida	0,2203	0,9743	ns
Abondance d'acariens Oribatida	1,6085	0,6575	ns
Abondance d'acariens Actinedida	3,934	0,2687	ns
Abondance de collemboles	**9,8724**	**0,0197**	**s**
Abondance de collemboles épiédaphiques	7,5464	0,0564	ns
Abondance de collemboles hémiédaphiques	**8,708**	**0,0334**	**s**
Abondance de collemboles euédaphiques	1,9693	0,5788	ns
Richesse taxonomique	**8,1465**	**0,0431**	**s**
Indice de Shannon	2,1774	0,5364	ns
Equitabilité	1,9622	0,5803	ns
Profil de sol			
Abondance de mésofaune	0,3325	0,8468	ns
Abondance d'acariens	1,6543	0,4373	ns
Abondance d'acariens Gamasida	1,6692	0,4341	ns
Abondance d'acariens Oribatida	0,9379	0,6257	ns
Abondance d'acariens Actinedida	4,7082	0,0949	ns
Abondance de collemboles	0,2565	0,8796	ns
Abondance de collemboles épiédaphiques	0,4015	0,8181	ns
Abondance de collemboles hémiédaphiques	0,9007	0,6374	ns
Abondance de collemboles euédaphiques	1,2588	0,5329	ns
Richesse taxonomique	0,4156	0,8124	ns
Indice de Shannon	0,2385	0,8876	ns
Equitabilité	0,3879	0,8237	ns
Profondeur de sol			
Abondance de mésofaune	0,3130	0,9576	ns
Abondance d'acariens	0,8527	0,8368	ns
Abondance d'acariens Gamasida	1,0557	0,7878	ns
Abondance d'acariens Oribatida	0,4142	0,9373	ns
Abondance d'acariens Actinedida	2,0885	0,5542	ns
Abondance de collemboles	0,3800	0,9443	ns
Abondance de collemboles épiédaphiques	2,6134	0,4551	ns
Abondance de collemboles hémiédaphiques	2,4109	0,4916	ns
Abondance de collemboles euédaphiques	2,7072	0,4390	ns
Richesse taxonomique	0,0495	0,9971	ns
Indice de Shannon	0,0594	0,9962	ns
Equitabilité	0,1738	0,9817	ns

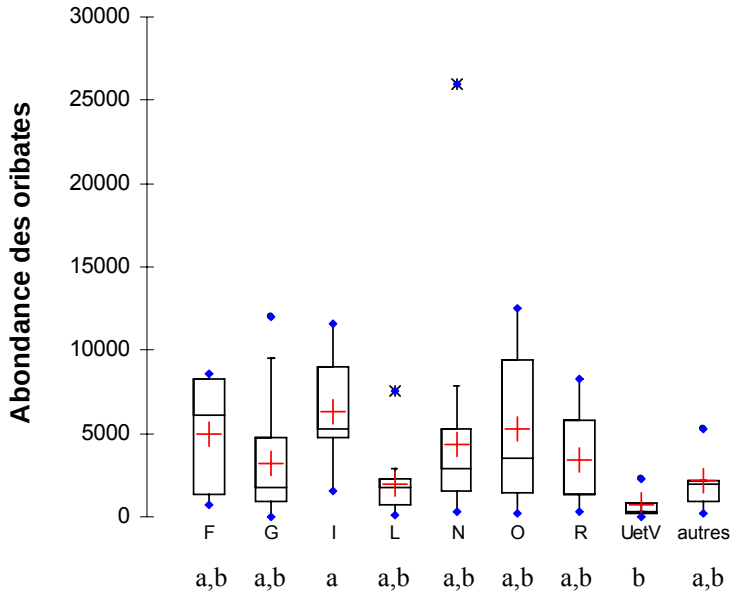


Figure 26 : Abondance des Oribatida par matériaux parental
F : Micashiste (N = 5) ; **G** : Granite (N = 24) ; **I** : Gneiss (N = 9) ; **L** : Limon (N = 12) ;
N : Schiste tendre (N = 20) ; **O** : Schiste moyen (N = 11) ; **R** : Schiste gréseux (N = 7) ;
UetV : Matériau d'apport colluvial et alluvial (N = 4) ;
autres : Sable, Terrasse caillouteuse, Grès dur, Eboulis de pente (N = 5)

Les lettres différentes indiquent des moyennes significativement différentes d'après le test de Kruskal-Wallis à p<0,05

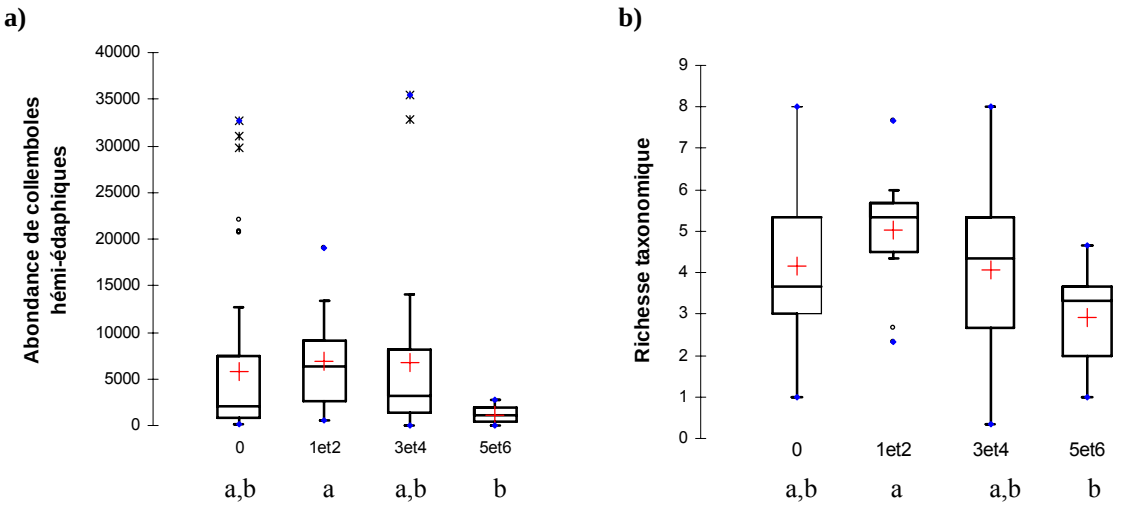


Figure 27 : Abondance des collemboles hémiédaphiques (a) et richesse taxonomique (b) par classe d'hydromorphie
0 : Absence d'hydromorphie (N = 55) ;
1 et 2 : taches d'oxydo-réduction à une prof sup à 80 cm (N = 11) ;
3 et 4 : taches d'oxydo reduction à une prof entre 40 et 80 cm (N = 23) ;
5 et 6 : taches d'oxydo reduction dès la surface (N = 9)

Les lettres différentes indiquent des moyennes significativement différentes d'après le test de Kruskal-Wallis à p<0,05

3.1.5 Mésofaune et année de prélèvement

Les prélèvements des sites RMQS *BioDiv* ayant été réalisés sur deux années 2006 et 2007, il est intéressant de vérifier l'homogénéité des valeurs entre ces deux années. Pour cela des tests de Mann-Whitney (U) sont réalisés uniquement sur les sites prairiaux (N= 42) dont 16 sites ont été réalisé en 2006 et 24 sites en 2007.

Les résultats montrent qu'il n'y a pas de différences significatives entre les prairies échantillonnés en 2006 et celle en 2007 pour une grande majorité de paramètres mésofaune (Tableau 10). Seule l'abondance des collemboles euédaphiques présente des différences significatives entre les valeurs des deux années en milieu prairial avec des abondances plus élevée en 2006 qu'en 2007 (Figure 28). De nombreux facteurs, tels que les conditions climatiques peuvent expliquer cette différence (Wolters, 1998).

Tableau 10 : Synthèse des tests de Mann-Whitney par année de prélèvement

Paramètres mésofaune	Valeur de U	p.value	significativité
Abondance de mésofaune	161	0,166	ns
Abondance d'acariens	173	0,280	ns
Abondance d'acariens Gamasida	146,5	0,079	ns
Abondance d'acariens Oribatida	188	0,484	ns
Abondance d'acariens Actinedida	269,5	0,177	ns
Abondance de collemboles	168,5	0,232	ns
Abondance de collemboles épiédaphiques	214,5	0,980	ns
Abondance de collemboles hémiédaphiques	192,5	0,559	ns
Abondance de collemboles euédaphiques	**116**	**0,011**	**s**
Richesse taxonomique	201,5	0,721	ns
Indice de diversité	211,5	0,919	ns
Equitabilité	219,5	0,939	ns

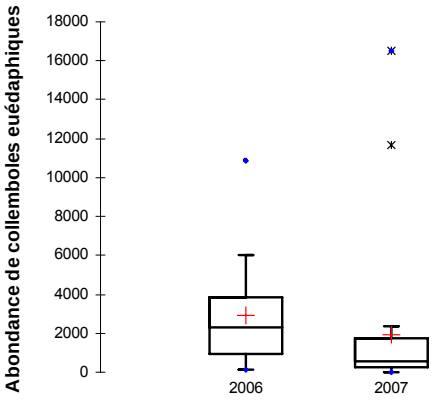


Figure 28 : Abondance de collemboles euédaphiques par année de prélèvement 2006-2007

3.1.6 Mésofaune et humidité des sols

L'humidité relative du sol des échantillons RMQS *BioDiv* a été mesurée par pesées sur les échantillons avant et après extraction de la mésofaune. Pour identifier un lien entre l'humidité du sol et les paramètres mésologiques des tests de corrélation (Spearman, alpha = 0,05) ont été effectués.

Les corrélations significatives sont présentées dans la Figure 29a. L'abondance totale de mésofaune, de collemboles, de collemboles épi et hémiédaphiques et la richesse taxonomique présentent des corrélations significativement négatives avec l'humidité des sols. Le résultat le plus significatif est retrouvé pour l'abondance de collemboles (Figure 29b). En effet, même s'il est généralement admis que la mésofaune du sol est particulièrement sensible à la dessiccation du milieu (Vannier, 1967; Poinsot-Balaguer, 1976), plusieurs études ont montré une corrélation négative entre le taux d'humidité et l'abondance de la mésofaune du sol, comme celle observée dans notre étude (Bardgett *et al.*, 1993; Sinka *et al.*, 2007)

a)

Humidité relative			
Variables	**R**	**p**	**R²**
Abondance de mésofaune	**-0,250**	**0,014**	**0,062**
Abondance d'acariens	0,047	0,649	0,002
Abondance d'acariens Gamasida	0,153	0,137	0,023
Abondance d'acariens Oribatida	-0,176	0,087	0,031
Abondance d'acariens Actinedida	0,016	0,875	0,000
Abondance de collemboles	**-0,393**	**< 0,0001**	**0,154**
Abondance de collemboles épiédaphiques	**-0,316**	**0,002**	**0,100**
Abondance de collemboles hémiédaphiques	**-0,332**	**0,001**	**0,110**
Abondance de collemboles euédaphiques	-0,132	0,198	0,018
Richesse taxonomique	**-0,203**	**0,048**	**0,041**
Indice de diversité	-0,081	0,432	0,007
Equitabilité	0,107	0,300	0,011

b)

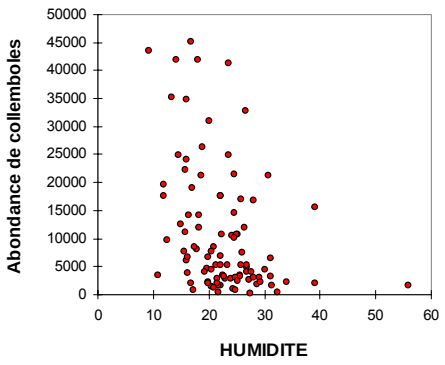


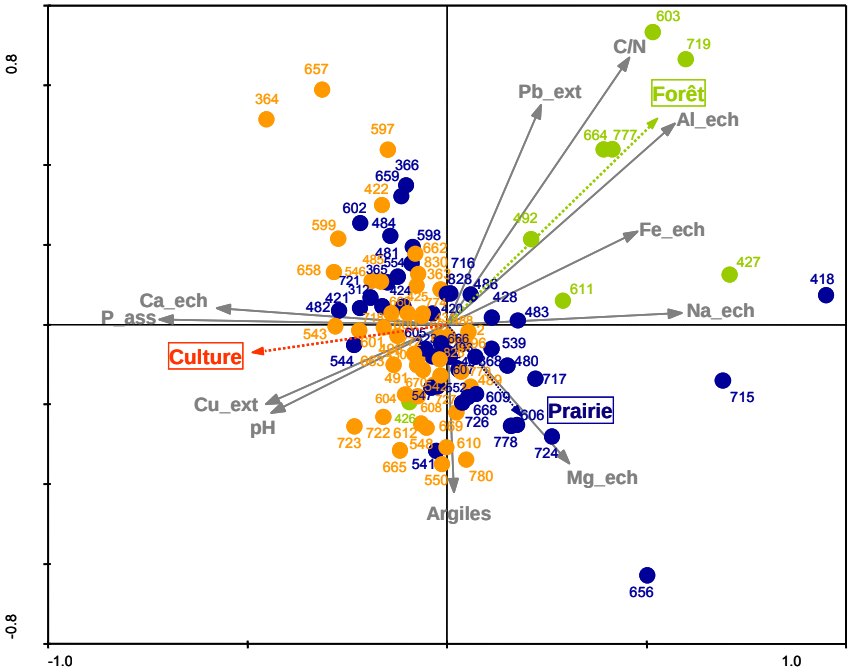
Figure 29 : Paramètres de la mésofaune en fonction de l'humidité des sols sur les sites RMQS *BioDiv*
a) Résultats des tests de corrélations de Spearman entre paramètres de mésofaune et humidité relative des sols (N = 96). Les valeurs en gras sont significativement différentes de 0 à un niveau de signification alpha = 0,05.
b) Abondance de collemboles en fonction de l'humidité relative des sols

3.2 Structure taxonomique des communautés de collemboles et variables explicatives

Afin d'étudier le comportement de la structure des communautés de la mésofaune du sol face aux différentes variables explicative, 2 types d'analyses multivariées ont été réalisés. Une **analyse de redondance (RDA)** a été réalisée permettant de confronter directement certains paramètres physico-chimiques, les sites et les espèces. Le type d'occupation des sols (1er niveau) a été inclus dans l'analyse en tant que variables supplémentaires. Par ailleurs, une **analyse en composantes principales (ACP)** a été réalisée afin de discriminer les espèces rencontrées sur les différents sites. Pour cette dernière, le plan factoriel des sites a été utilisé pour effectuer une interprétation visuelle de l'effet des différents paramètres d'occupation des sols, des pratiques agricoles, des caractéristiques pédologiques ou encore l'année de prélèvement (18,4 % de l'inertie est extraite par les trois premiers axes : plan 1-2: 12,7%, plan 1-3 :12,3% et plan 2-3 : 11,7%). A noter, que les sites forestiers n'étant pas soumis aux différentes pratiques agricoles, ces derniers n'ont pas été pris en compte dans l'ACP (3.2.3) (19,3 % de l'inertie est extraite par les trois premiers axes : plan 1-2: 13,8%, plan 1-3 :12,7% et plan 2-3 : 12,1%).

3.2.1 Structure des communautés de collemboles et paramètres physico-chimiques

a)



b)

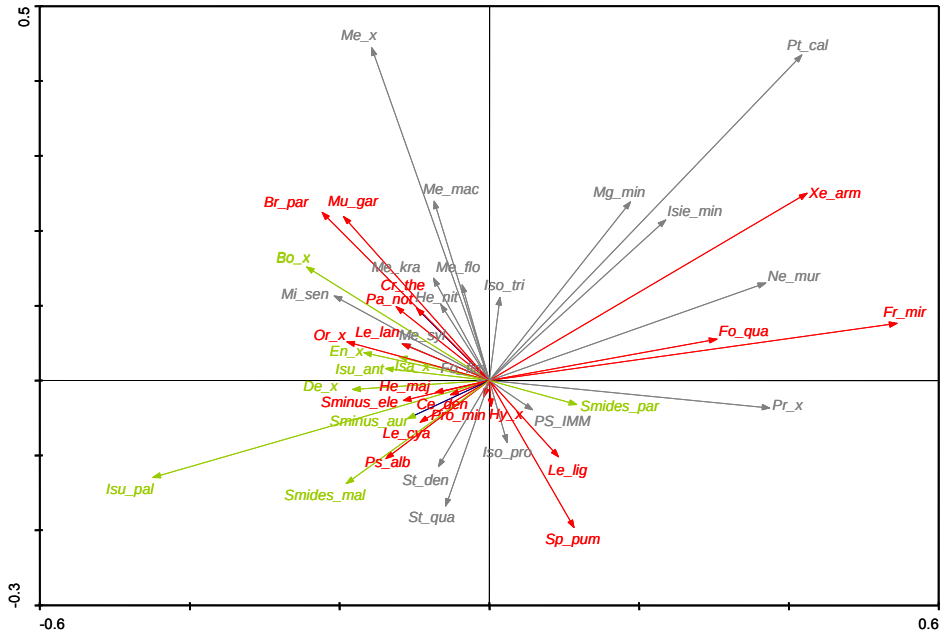


Figure 30 : Analyse de redondance, 1er niveau d'occupation des sols. (a) variables physico-chimiques, sites et (b) espèces

(a) Variables physico-chimiques (en gris) : ech : échangeable, ext : extractible, ass : assimilable.
Sites (cercles pleins) : sites forestiers en vert, sites prairiaux en bleu et site de culture en orange.
(b) Espèces épiédaphiques en vert, espèces hémiédaphiques en rouge et espèces euédaphiques en gris

L'analyse de redondance montre un lien fort entre les usages du sol d'une part et les caractéristiques des sols et les échantillons d'autre part. Ainsi l'axe 1, qui explique 39,9% de la variance, oppose les sites forestiers de ceux cultivés. Les sites de prairie occupent une situation intermédiaire (Figure 30). L'axe 2, qui explique 15,7% de la variance, singularise les sols particulièrement riches en argiles. Cette analyse montre également la différentiation qui s'opère entre les différents types biologiques des collemboles et l'usage des sols. Ainsi, les espèces épiédaphiques (en vert) sont étroitement corrélées aux sites de culture. La caractérisation des autres usages de sol est moins évidente. Des résultats similaires ont été observés sur la zone OPE-Andra (Maillant *et al.*, 2009)

3.2.2 Structure des communautés de collemboles et occupation des sols

3.2.2.1 Occupation du sol : premier niveau

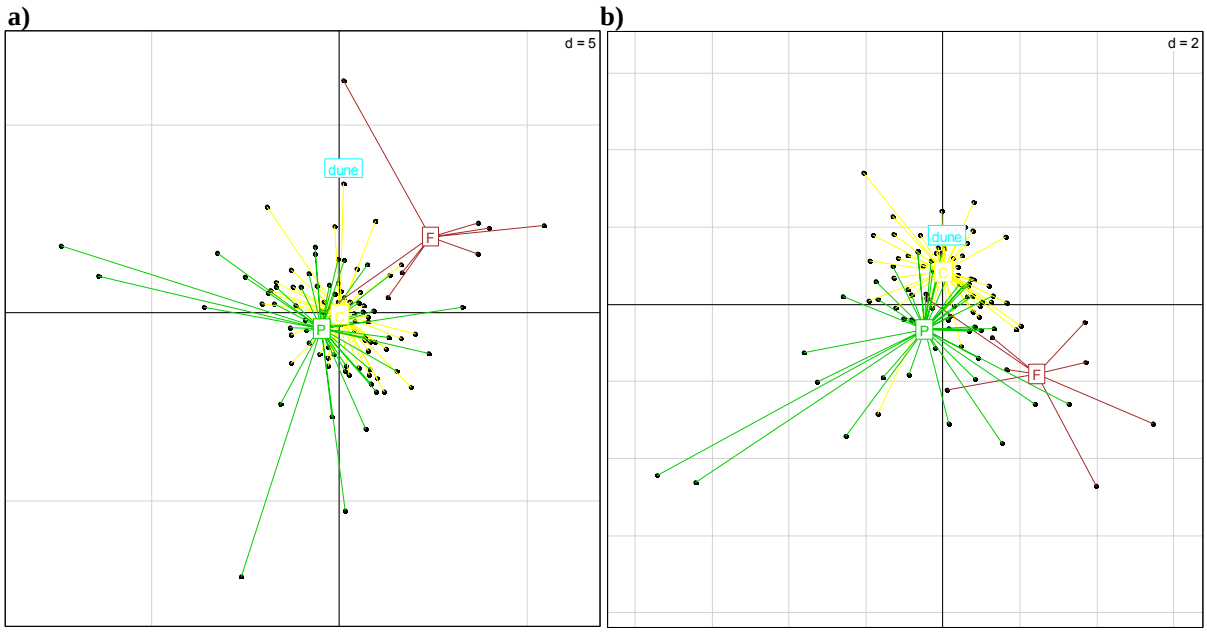


Figure 31 : Plan factoriel a) 1-2, b) 1-3 en fonction de l'occupation des sols (1er niveau)
C : Culture (N = 47) ; P : Prairie (N = 42) ; F : Forêt (N = 8) ; dune (N = 1)

Les plans factoriels de l'ACP confirment la discrimination entre les différents types d'usage des sols. Le plan formé par les axes 1 et 2, montre une opposition dans la structure des communautés des sites fermés forestiers avec celles des sites ouverts de prairie et de culture. On note également la position particulière du site de dune (Figure 31a). Le plan formé par les axes 1 et 3 permet de montrer la séparation entre les communautés des prairies d'une part et celles des cultures d'autre part (Figure 31b).

3.2.2.2 Occupation du sol : deuxième niveau

Les plans factoriels de l'ACP permettent d'affiner les résultats précédents et de se rendre compte de l'intérêt de la mésofaune du sol pour discriminer les différents types d'usage des sols. Ainsi, si le plan factoriel formé par les axes 1 et 2 (Figure 32a) montre une fois encore l'opposition des sites forestiers avec tous les autres, les plans factoriels formés par les axes 1 et 3 d'une part et 2 et 3 d'autre part, permettent une séparation plus fine des sites de milieux ouverts. Ainsi, si les sites de prairies

s'opposent aux sites de culture, on note également une séparation des sites de prairie permanente (Mp) avec les sites de prairie temporaire (M/AA). De la même façon, les sites de grandes cultures (AA) sont séparés des sites de culture en rotation avec des prairies (AA/M) (Figure 32b.c).

La structure des communautés permet donc de descriminer les usages mais aussi certaines pratiques agricoles, comme les systèmes de rotation utilisés. L'étude la structure des commmunautés confirme donc les résultats obtenus précédement concernant les paramètres d'abondance et de diversité.

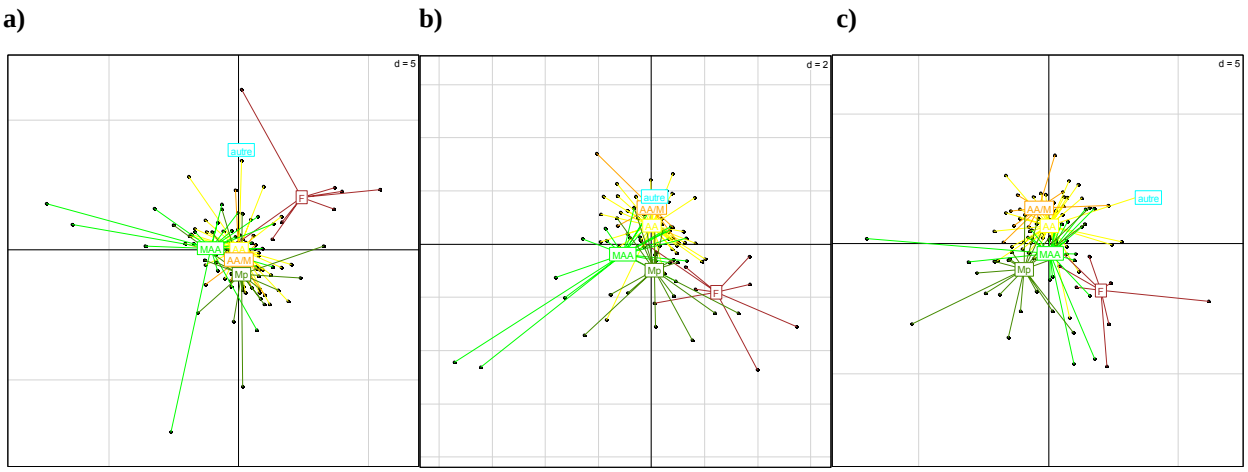


Figure 32 : Plan factoriel a) 1-2, b) 1-3 c) 2-3 en fonction de l'occupation des sols (2ème niveau)
AA (N = 38) ; AA/M (N = 10) ; F (N = 8) ; M/AA (N = 21) ; Mp (N = 20) ; dune (N = 1)

3.2.3 Structure des communautés de collemboles et pratiques agricoles

3.2.3.1 Fertilisation

a) **b)**

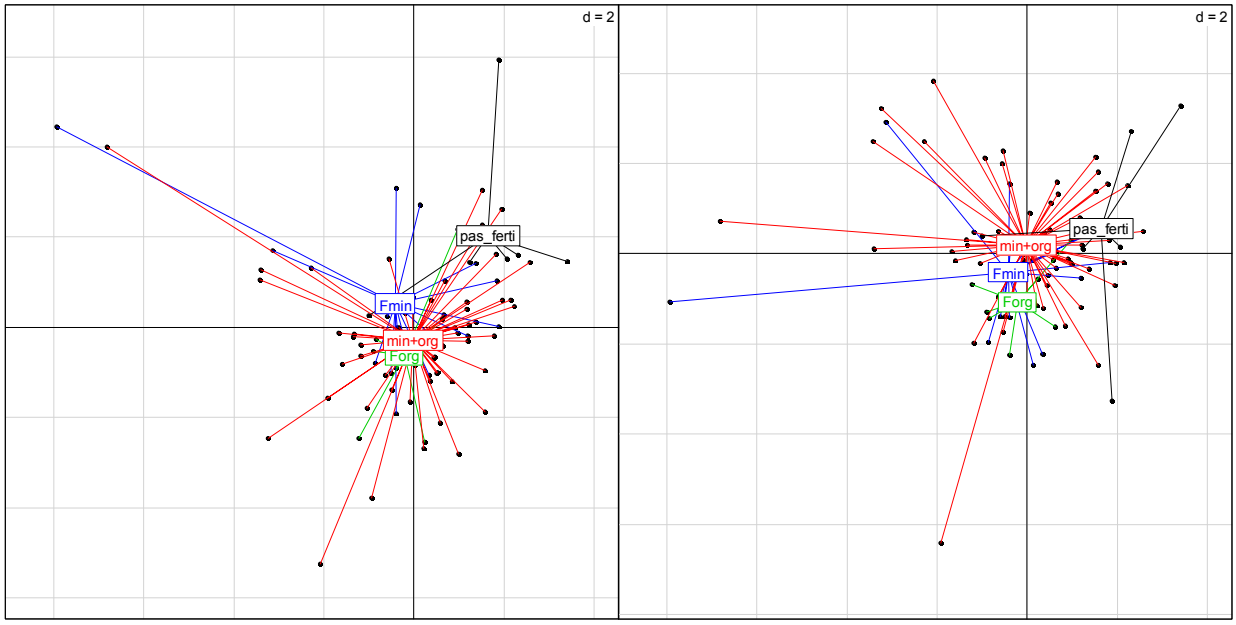


Figure 33 : Plan factoriel a) 1-2, b) 1-3 en fonction du type de fertilisation sur les sites

Si le plan factoriel de l'ACP formé par les axes 1 et 2 montre l'opposition des communautés échantillonnées sur sites fertilisés par rapport aux communautés des sites non fertilisés (Figure 33a), le plan factoriel formé par les axes 1 et 3 permet d'affiner l'analyse et de séparer les communautés soumises aux différents types de fertilisation. L'axe 3 permet de visualiser les différents types de fertilisation utilisés : uniquement organique, organo-minéral ou uniquement minéral (Figure 33b).

3.2.3.2 Paillage

Le plan factoriel de l'ACP formé par les axes 1 et 2 montre l'opposition des communautés échantillonnées sur sites ayant subi un amendement pailleux, non pailleux ou mixte à celles échantillonnées sur les sites n'ayant subit aucun amendement de ce type (Figure 34). La structure des communautés de la mésofaune du sol n'apparaît donc pas forcément comme un bon indicateur pour ce paramètre.

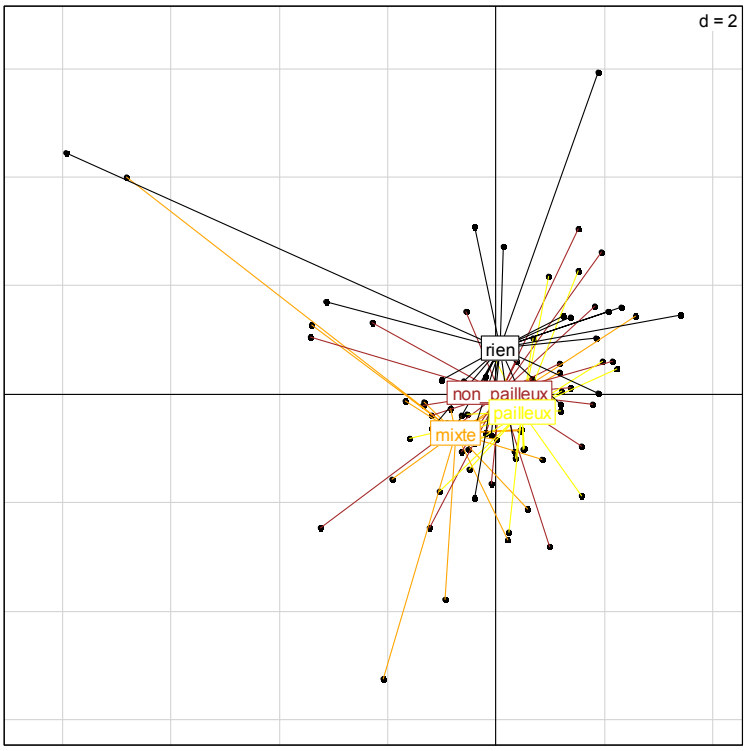


Figure 34 : Plan factoriel 1-2 en fonction de l'amendement et la fertilisation organique sur les sites

3.2.3.3 Travail du sol

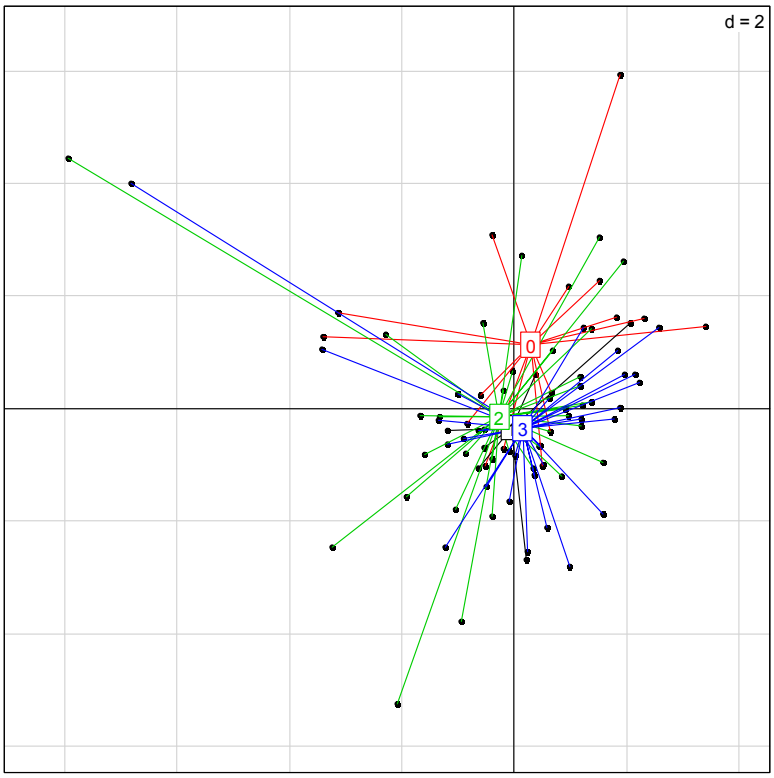


Figure 35 : Plan factoriel 1-2 en fonction du travail du sol sur les sites

Le plan factoriel de l'ACP formé par l'axe 1 et 2 montre l'opposition des communautés échantillonnées sur sites n'ayant subi aucun travail du sol de celles échantillonnées sur les sites ayant subi un travail plus ou moins profond (Cortet *et al.*, 2002b)(Figure 35). Les communautés de la mésofaune du sol ne permettent pas de discriminer plus finement l'intensité du travail du sol.

3.2.3.4 Traitements phytosanitaires

Le plan factoriel de l'ACP formé par les axes 1 et 2 montre une opposition de la composition des communautés échantillonnées sur les sites ayant subit un traitement phytosanitaire et celles échantillonnées sur les sites n'ayant subit aucun traitement. Ces résultats sont conformes à ceux trouvés dans la littérature (Cortet et Poinsot-Balaguer, 2000; Cortet *et al.*, 2002a)(Figure 36).

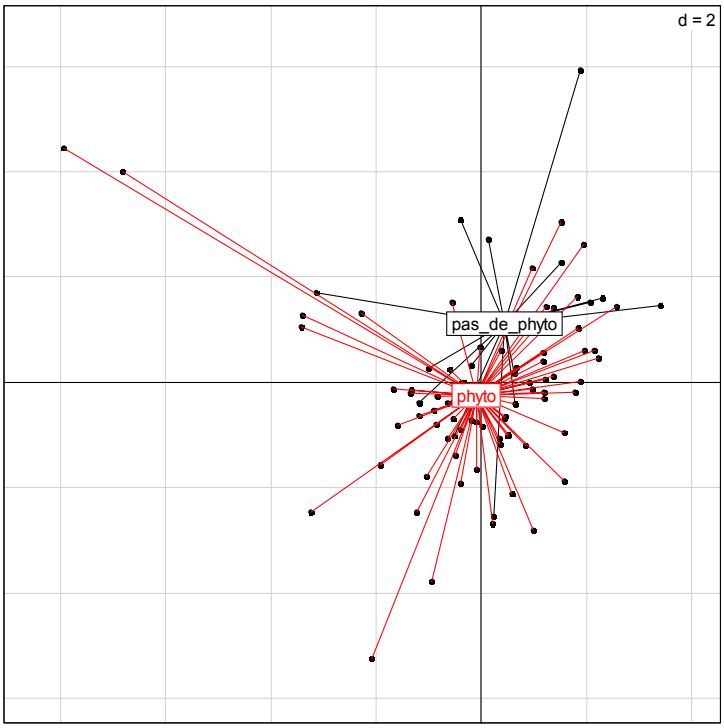


Figure 36 : Plan factoriel 1-2 en fonction de présence de phytosanitaires sur les sites

3.2.4 Structure des communautés de collemboles et caractéristiques pédologiques

3.2.4.1 Géologie

Les plans factoriels de l'ACP formés par les axes 1 et 2 d'une part et 1 et 3 ne montrent aucune discrimination nette des différents substrats géologiques échantillonnés. Une fois encore, le substrat géologique dans le contexte breton, ne permet pas de discriminer les communautés (Figure 37).

a) **b)**

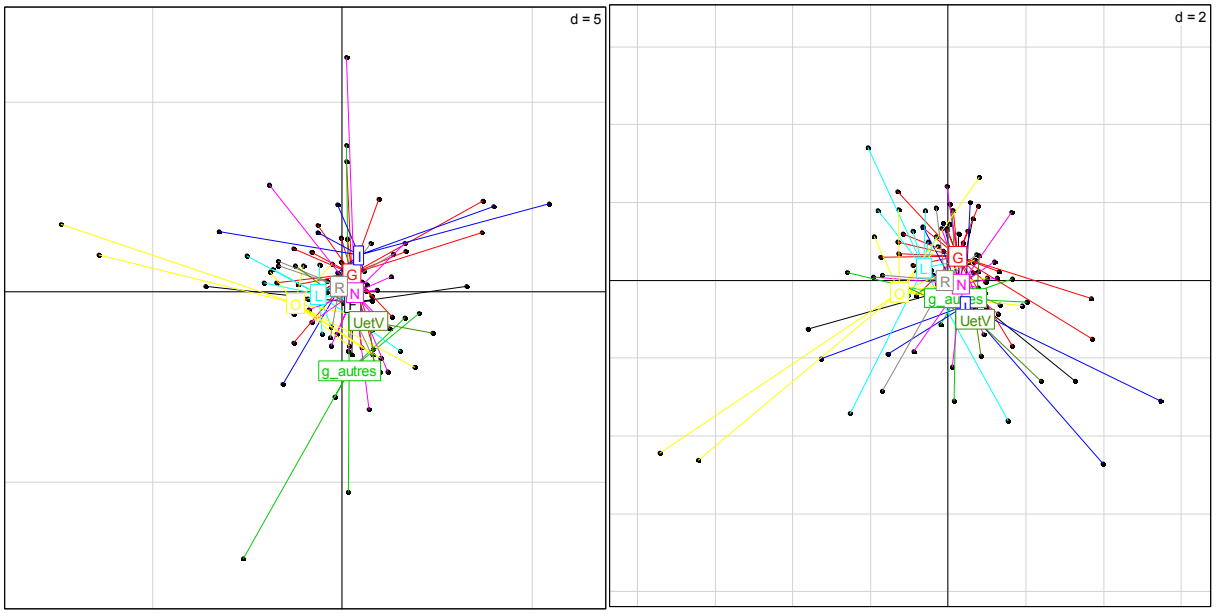


Figure 37 : Plan factoriel a) 1-2, b) 1-3 en fonction de la géologie sur les sites

3.2.4.2 Hydromorphie

Le plan factoriel formé par les axes 1 et 2 permet d'opposer les communautés échantillonnées sur sols fortement hydromorphes (modalité 5et 6) aux communautés échantillonnées sur des sols peu ou pas hydromorphes (Figure 38a). Le plan factoriel formé par les axes 1 et 3 confirme cette observation. De plus, l'axe 3 permet de visualiser les sols non hydromorphes (modalité 0), des sites fortement hydromorphes (modalité 5et6), avec, en position intermédiaire, les sites peu hydromorphes (modalités 1et2 et 3et4) (Figure 38b).

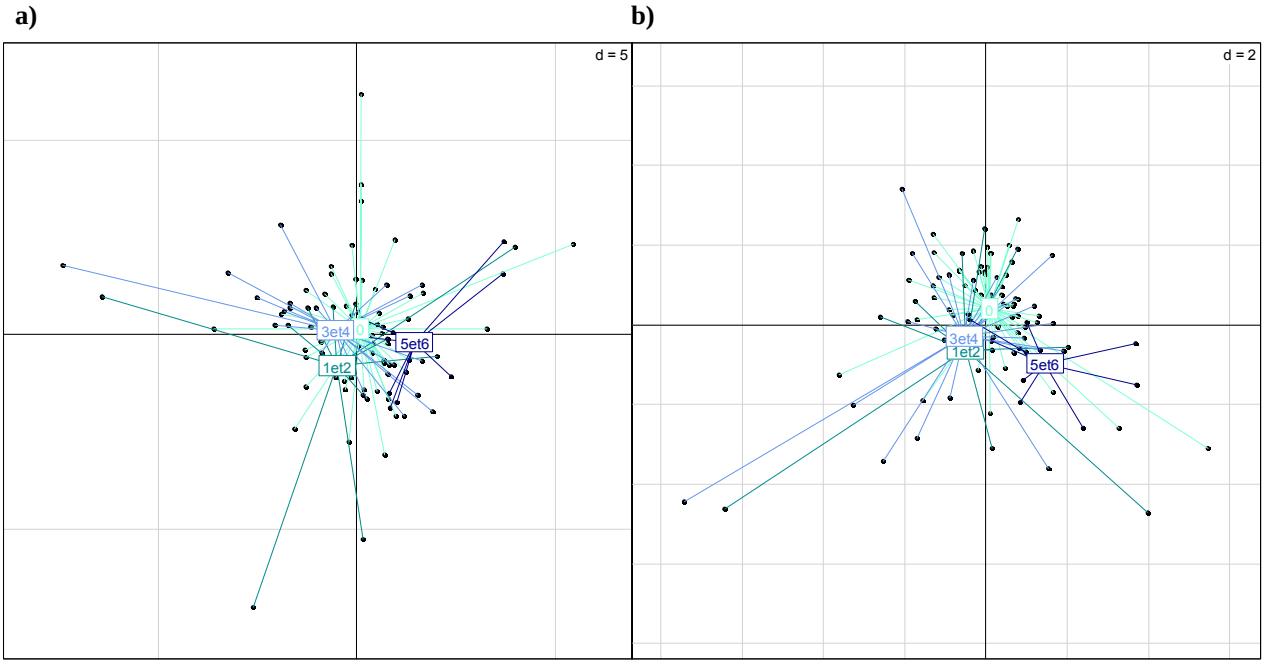


Figure 38 : Plan factoriel a) 1-2, b) 1-3 en fonction de l'hydromorphie sur les sites

3.2.4.3 Profil de sol

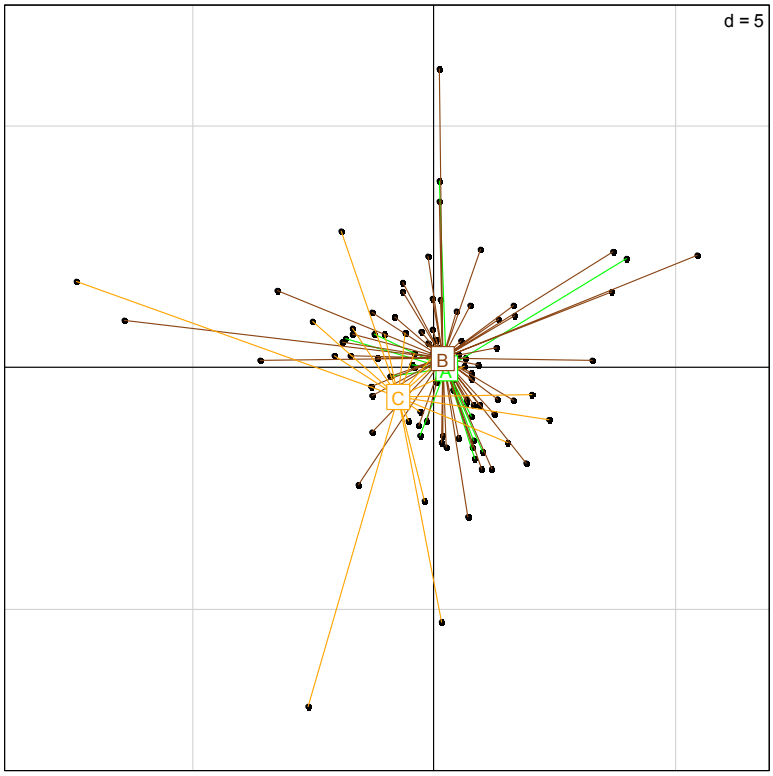


Figure 39 : Plan factoriel 1-2, en fonction du type de sol sur les sites

Le plan factoriel formé par les axes 1 et 2 semble singulariser les sols bruns légèrement lessivés (C) par rapport aux autres sols (Figure 39).

3.2.4.4 Profondeur

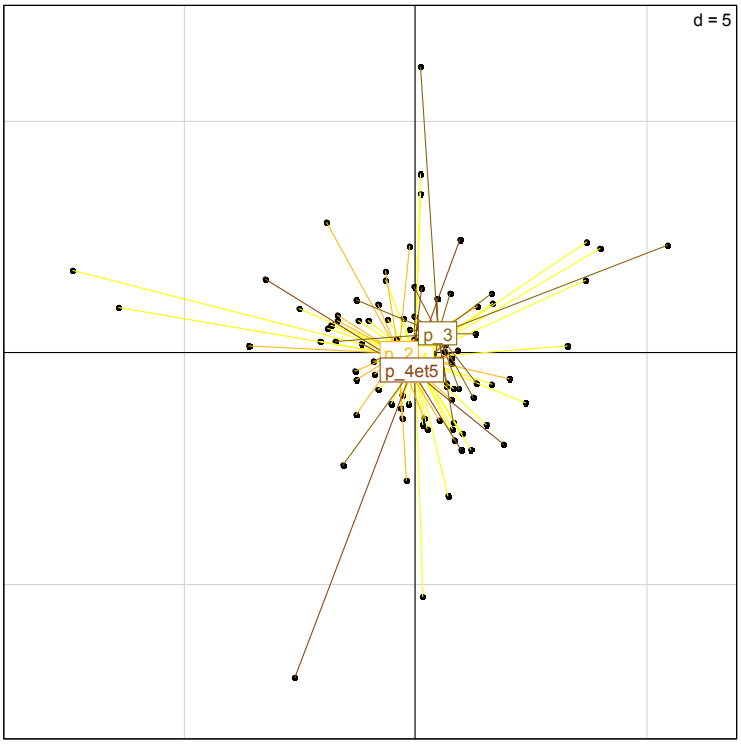


Figure 40 : Plan factoriel 1-2 en fonction de la profondeur de sol sur les sites

Le plan factoriel formé par les axes 1 et 2 n'apporte aucune information. La profondeur des sols ne permet pas de discriminer les communautés (Figure 40).

3.2.5 Structure des communautés de collemboles et année de prélèvement

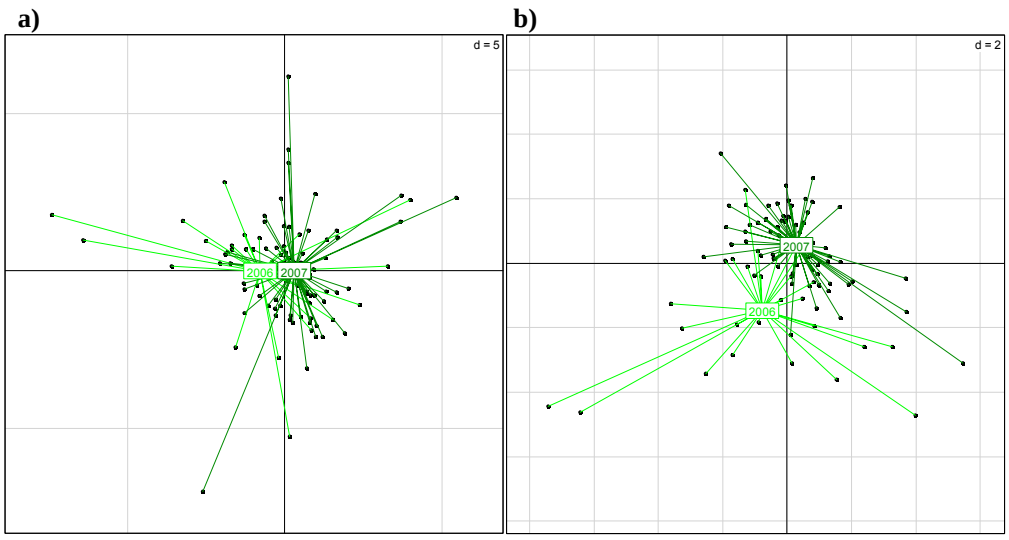


Figure 41 : Plan factoriel a) 1-2, b) 1-3 en fonction de l'année de réalisation des sites RMQS *BioDiv*

Les plans factoriels composés des axes 1 et 2 d'une part et des axes 1 et 3 d'autre part, montrent une nette différence de la structure des communautés échantillonnées en 2006 par rapport à celles échantillonnées en 2007. Outre l'effet des changements des conditions environnementales et notamment climatiques d'une année sur l'autre (Wolters, 1998), on note également que seulement 27 sites ont été échantillonnés en 2006 contre 71 en 2008.

SYNTHESE

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.

Table des illustrations

Figure 1 : Groupes biologiques étudiés et équipes partenaires associées du programme RMQS *BioDiv*..... 2
Figure 2 : Statistiques descriptives (a), boîte à moustaches (b) et histogramme (c) de l'abondance totale de la mésofaune sur 97 sites RMQS *BioDiv*..... 8
Figure 3 : Abondance relative des différents groupes mésofaunique sur les sites RMQS *BioDiv*..... 8
Figure 4 : Statistiques descriptives (a), boîtes à moustaches (b) et histogramme (c) de l'abondance des acariens totaux sur 97 sites RMQS *BioDiv*..... 9
Figure 5 : Abondance absolue (a) et relative (b) des sous-ordres d'acarien..... 10
Figure 6 : Statistiques descriptives (a), boîtes à moustaches (b) et histogramme (c) de l'abondance des collemboles sur 97 sites RMQS *BioDiv*..... 11
Figure 7 : Abondance relative des différents taxons de collemboles (valeurs >0,5%), représentant 96,2% de l'abondance totale, sur l'ensemble des sites RMQS *BioDiv*..... 13
Figure 8 : Fréquence d'apparition des taxons de collemboles sur les sites RMQS *BioDiv*..... 14
Figure 9 : Boite à moustaches de la diversité spécifique (a) et de l'équitabilité (b) des collemboles sur 97 sites RMQS *BioDiv*..... 16
Figure 10 : Abondance absolue (a) et relative (b) des types biologiques de collemboles sur les sites RMQS *BioDiv*. 18
Figure 11 : Corrélogramme (a) et semi-variogramme (b) de la diversité de collemboles..... 20
Figure 12 : Cartes de l'abondance totale de mésofaune..... 21
Figure 13 : Cartes de l'abondance de collemboles..... 22
Figure 14 : Cartes de l'abondance d'acariens..... 22
Figure 15 : Cartes des types biologiques de collemboles..... 23
Figure 16 : Cartogramme des sous-ordres d'acariens..... 24
Figure 17 : Cartes des paramètres de diversité..... 25
Figure 18 : Répartition de taxons de collemboles présentant une structuration spatiale..... 26
Figure 19 : Abondance des collemboles totaux en fonction de la concentration en calcium total (a), abondance des collemboles épiédaphiques en fonction de la concentration en phosphore assimilable (b) et abondance des collemboles euédaphiques en fonction du ratio C/N (c). 29
Figure 20 : Abondance relative globale des collemboles, des acariens et des microarthropodes divers sur les sites de culture, forêt et prairie. 30
Figure 21 : Abondance relative des différents sous-ordres d'acariens sur les sites de culture, forêt et prairie..... 31
Figure 22 : Abondance relative des différents types biologiques de collemboles sur les sites de culture, de forêt et de prairie. 32
Figure 23 : Abondance des acariens totaux (a), des acariens Oribatida (b) et des collemboles épiédaphiques (c) par occupation du sol (1er niveau)..... 33
Figure 24 : Abondance des acariens totaux (a), des acariens Oribatida (b) et des collemboles épiédaphiques (c) par occupation du sol (2ème niveau) 35
Figure 25 : Equitabilité en fonction de l'occupation du sol (2ème niveau)..... 36
Figure 26 : Abondance des Oribatida par matériaux parental 41
Figure 27 : Abondance des collemboles hémiédaphiques (a) et richesse taxonomique (b)..... 41
Figure 28 : Abondance de collemboles euédaphiques par année de prélèvement 2006-2007 42
Figure 29 : Paramètres de la mésofaune en fonction de l'humidité des sols sur les sites RMQS *BioDiv*..... 43
Figure 30 : Analyse de redondance, 1er niveau d'occupation des sols. (a) variables physico-chimiques, sites et (b) espèces 45
Figure 31 : Plan factoriel a) 1-2, b) 1-3 en fonction de l'occupation des sols (1er niveau)..... 46
Figure 32 : Plan factoriel a) 1-2, b) 1-3 c) 2-3 en fonction de l'occupation des sols (2ème niveau)..... 47
Figure 33 : Plan factoriel a) 1-2, b) 1-3 en fonction du type de fertilisation sur les sites..... 48
Figure 34 : Plan factoriel 1-2 en fonction de l'amendement pailleux sur les sites..... 49
Figure 35 : Plan factoriel 1-2 en fonction du travail du sol sur les sites 49
Figure 36 : Plan factoriel 1-2 en fonction de présence de phytosanitaires sur les sites..... 50
Figure 37 : Plan factoriel a) 1-2, b) 1-3 en fonction de la géologie sur les sites..... 51
Figure 38 : Plan factoriel a) 1-2, b) 1-3 en fonction de l'hydromorphie sur les sites 52
Figure 39 : Plan factoriel 1-2, en fonction du type de sol sur les sites..... 52
Figure 40 : Plan factoriel 1-2 en fonction de la profondeur de sol sur les sites..... 53
Figure 41 : Plan factoriel a) 1-2, b) 1-3 en fonction de l'année de réalisation des sites RMQS *BioDiv*..... 53

Tableau 1 : Liste des taxons de collemboles identifiés, classés par famille, sur les sites RMQS *BioDiv*..... 12
Tableau 2 : Statistiques descriptives des abondances des taxons de collemboles..... 15
Tableau 3 : Synthèse des résultats d'analyses géostatistiques pour les paramètres de mésofaune 20
Tableau 4 : Matrice de corrélations entre les paramètres de mésofaune et les paramètres physico-chimiques. 29
Tableau 5 : Synthèse des tests de Kruskal-Wallis par système d'occupation des sols (1er niveau) 33
Tableau 6 : Synthèse des tests de Kruskal-Wallis par système d'occupation des sols (2ème niveau)..... 34
Tableau 7 : Richesse spécifique maximale des collemboles pour chaque type d'occupation des sols 36
Tableau 8 : Synthèse des tests de Kruskal-Wallis et Mann-Whitney réalisés avec les variables pratiques agricoles . 37
Tableau 9 : Synthèse des tests de Kruskal-Wallis avec les variables pédologiques 40
Tableau 10 : Synthèse des tests de Mann-Whitney par année de prélèvement..... 42

Références bibliographiques

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

BACHELIER, G. (1978). La faune des sols, son écologie et son action, Orstom édition, Paris, pp. 391.

BARDGETT, R.D., FRANKLAND, J.C., WHITTAKER, J.B. (1993). The effects of agricultural management on the soil biota of some upland grasslands. *Agr. Ecosyst. Environ.*, **45**, p 25-35.

BRETFELD, G. (1999). Synopses on paleoarctic collembola. Symphypleona. Staatliches Museum für Naturkunde Görlitz, pp. 318.

CHAUVAT, M., PONGE, J.-F. (2002). Colonization of heavy metal-polluted soils by collembola: preleminary experiments in compartimented boxes. *Applied Soil Ecology*, **21**, p 91-106.

COLEMAN, D.C., CROSSLEY, D.A.J. (1996). Fundamentals of soil ecology. Academic Press, pp. 205.

CORTET, J., POINSOT-BALAGUER, N. (1998). Collembola populations under sclerophyllous coppices in Provence: comparaison between 2 types of vegetation Quercus ilex L. and Quercus coccifera L. *Acta Oecologia*, **19**, p 413 - 424.

CORTET, J., POINSOT-BALAGUER, N. (2000). Impact de produits phytopharmaceutiques sur les microarthropodes du sol en culture de maïs irrigué: approche fonctionnelle par la méthode des sacs de litière. *Canadian Journal of Soil Science*, **80**, p 237 - 249.

CORTET, J., GILLON, D., JOFFRE, R., OURCIVAL, J.-M., POINSOT-BALAGUER, N. (2002a). Effects of pesticides on organic matter recycling and microarthropods in a maize field: use and discussion of the litterbag methodology. *European Journal of Soil Biology*, **38**, p 261-265.

CORTET, J., RONCE, D., POINSOT-BALAGUER, N., BEAUFRETON, C., CHABERT, A., VIAUX, P., CANCELA DA FONSECA, J.P. (2002b). Impacts of different agricultural practices on the biodiversity of microarthropod communities in arable crop systems. *European Journal of Soil Biology*, **38**, p 239-244.

DACEY, M., 1968. A review of measures of contiguity for two and k-color maps. Spatial Analysis: a Reader in Statistical Geography (eds B. J. L. Berry & D. F. Marble), pp. 479±490. Prentice Hall, Englewood Cli€s, NJ.

DEHARVENG, L. (2004). Recent advances in Collembola systematics. *Pedobiologia*, **48**, p 415-433.

FJELLBERG, A. (1998). The Collembola of Fennoscandia and Denmark. Part I: Poduromorpha. Fauna Entomologica Scandinava, Brill Academic Pub, Leiden., pp. 184.

FOUNTAIN, M.T., HOPKIN, S.P. (2004). A comparative study of the effects of metal contamination on Collembola in the field and in the laboratory. *Ecotoxicology*, **13**, p 573-587.

GILLET, S., PONGE, J.-F. (2003). Changes in species assemblages and diets of Collembola along a gradient of metal pollution. *Applied Soil Ecology*, **634**, p 1-12.

GISIN, H. (1943). Ökologie und Lebensgemeinschaften der Collembolen im Schweizerischen Exkursionsgebiet Basels. *Revue Suisse de Zoologie*, **50**, p 131-224.

GISIN, H. (1960). Collembolen fauna Europas. Museum d'Histoire Naturelle, Genève, pp. 312.

GOBAT, J.-M., ARAGNO, M., MATTHEY, W. (1998). Le sol vivant, base de pédologie, biologie des sols, 1st edn, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes édition, Lausanne, pp. 519.

HOPKIN, S.P. (1997). Biology of the springtails (Insecta: collembola). Oxford University Press, Inc., New York, pp. 330.

HOPKIN, S.P. (2007). A Key to the Springtails (Collembola) of Britain and Ireland. Field Studies Council (AIDGAP Project), pp. 245.

ISO 23611-2 (2004). Draft: Soil Quality—Sampling of Soil Invertebrates Part 2: Sampling and Extraction of Microarthropods (Collembola and Acarina), Geneva, Switzerland

KRANTZ, G.W. (1978). A manual of acarology, 2nde édition. Oregon State University Book Stores, Inc. Corvallis, pp. 509.

JOLIVET, C., BOULONNE, L., RATIE, C. (2006) - Manuel du Réseau de Mesures de la qualité des Sols. Edition 2006, Unité Infosol, INRA Orléans, France, 190p.

LEBRUN, P., VAN STRAALEN, N.M. (1995). Oribatid mites: Prospects for their use in ecotoxycologie. *Experimental & Applied Acarology*, **19**, p 361-379.

LOCK, K., JANSSENS, F., JANSSEN, C.R. (2003). Effects of metal contamination on the activity and diversity of springtails in an ancient Pb-Zn mining area at Plombières, Belgium. *European Journal of Soil Biology*, **39**, p 25-29.

LORANGER, G., BANDYOPADHYAYA, I., RAZAKA, B., PONGE, J.-F. (2001). Does soil acidity explain altitudinal sequences in collembolan communities? *Soil biology & biochemistry*, **33**, p 381-393.

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, contrat n° 040263, pp. 53.

MORAN P.A.P., 1948. The interpretation of statistical maps. *Journal of the Royal Statistical Society.* 10:243-251.

MORAN P.A.P., 1950. Notes on continuous stochastic phenomena. *Biometrika*. 37: 17-23.

PETERSEN, H. (1982). Structure and size of soil animal populations. *Oikos*, 39, p 306-357.

POINSOT-BALAGUER, N. (1976). Dynamique des communes de collemboles en milieu xérique méditerranéen. *Pedobiologia*, **16**, p 1-17.

PONGE, J.-F. (2000). Vertical distribution of Collembola (Hexapoda) and their food resources in organic horizons of beech forests. *Biology and fertility of soils*, **32**, p 508-522.

PONGE, J.-F., GILLET, S., DUBS, F., FEDOROFF, E., HAESE, L., SOUSA, J.P., LAVELLE, P. (2003). Collembolan communities as bioindicators of land use intensification. *Soil Biology & Biochemistry*, **35**, p 813- 826.

PONGE, J.-F., DUBS, F., GILLET, S., SOUSA, J.P., LAVELLE, P. (2006). Decreased biodiversity in soil springtail communities: the importance of dispersal and landuse history in heterogeneous landscapes. *Soil Biology & Biochemistry* **38**, p 1158-1161.

POTAPOW, M. (2001). Synopses on paleoarctic collembola. *Isotomidae*, Staatliches Museum für Naturkunde Görlitz édition, Görlitz, pp. 603.

SADAKA-LAULAN, N., PONGE, J.-F. (2000). Comparative leaf decomposition within the holm oak complex. *European Journal of Soil Biology*, **36**, p 91-95.

SCHERRER, B. (1998). Biostatistique. Morin Gaetan ed., Paris, pp. 850.

SINKA, M., JONES, T.H., HARTLEY, S.E. (2007). The indirect effect of above-ground herbivory on collembola populations is not mediated by changes in soil water content *Applied Soil Ecology*, **36**, p 92-99.

SKUBAŁA, P., KAFEL, A. (2004). Oribatid mite communities and metal bioaccumulation in oribatid species (Acari, Oribatida) along the heavy metal gradient in forest ecosystems. *Environmental Pollution*, **132**, p 51-60.

THIBAUD, J.-M., SCHULZ, H.-J., DA GAMA ASSALINO, M.M. (2004). Synopses on Palaearctic Collembola. *Hypogastruridae*, Staatliches Museum für Naturkunde Görlitz édition, Görlitz, pp. 287.

USHER, M.B. (1970). Seasonal and vertical distribution of a population of soil arthropods: Collembola. *Pedobiologia*, **10**, p 224-236.

VAN STRAALEN, N.M., BUTOVSKY, R.O., POKARZHEVSKII, A.D., ZAITSEV, A.S., VERHOEF, S.C. (2001). Metal concentrations in soil and invertebrates in the vicinity of a metallurgical factory near Tula (Russia). *Pedobiologia*, **45**, p 451–466.

VANNIER, G. (1967). Définition des rapports entre les arthropodes et l'état hydrique des sols. *Compte Rendu de l'Académie des Sciences. Paris*, **t. 265, série D**, p 1741 - 1744.

WOLTERS, V. (1998). Long-term dynamics of a collembolan community. *Applied Soil Ecology*, **9**, p 221-227.

Table des annexes

Annexe I : Liste des espèces de collemboles collectées sur 98 sites RMQS *BioDiv*

Annexe II : Condition de normalité des paramètres de mésofaune

Annexe III : Résultats des analyses géostatistiques sur les paramètres de mésofaune

Annexe IV : Cartes des abondances des taxons de collembole

Annexe I : Liste des espèces de collemboles collectées sur 98 sites RMQS *BioDiv*

Famille	Genre	Espèce	Categ Eco	Regroupement
Isotomidae	*Isotomurus*	*palustris*	**EPI**	**Isu_x**
	Isotomurus	*prasinus*	**EPI**	**Isu_x**
	Isotomurus	*fusicolus*	**EPI**	**Isu_x**
	Isotomurus	*antennalis*	**EPI**	
	Isotoma	sp.	**EPI**	**Isa_x**
	Isotoma	*viridis*	**EPI**	**Isa_x**
	Isotoma	*anglicana*	**EPI**	**Isa_x**
	Isotomiella	*minor*	**EU**	
	Isotomodes	*trisetosus*	**EU**	
	Isotomodes	*productus*	**EU**	
	Cryptopygus	*bipunctatus*	**HEMI**	
	Cryptopygus	*thermophilus*	**HEMI**	
	Mucrosomia	*garretti*	**HEMI**	
	Desoria	sp.	**EPI**	**Des_x**
	Desoria	*violacea*	**EPI**	**Des_x**
	Desoria	*olivacea*	**EPI**	**Des_x**
	Parisotoma	*notabilis*	**HEMI**	
	Proisotoma	*admaritima*	**HEMI**	
	Proisotoma	*minuta*	**HEMI**	
	Proisotoma	*minima*	**HEMI**	
	Folsomia	sp.	**HEMI**	
	Folsomia	*candida*	**EU**	
	Folsomia	*fimetaria*	**EU**	
	Folsomia	*quadrioculata*	**HEMI**	
	Folsomia	*setosa*	**HEMI**	
	Folsomia	*sexoculata*	**HEMI**	
	Folsomia	*thalassophila*	**HEMI**	
Entomobryidae	*Orchesella*	*villosa*	**EPI**	**Or_x**
	Orchesella	sp.	**EPI**	**Or_x**
	Entomobrya	*lanuginosa*	**EPI**	**En_x**
	Entomobrya	*multifasciata*	**EPI**	**En_x**
	Entomobrya	sp.	**EPI**	**En_x**
	Heteromurus	*major*	**HEMI**	
	Heteromurus	*nitidus*	**EU**	
	Lepidocyrtus	*cyaneus*	**HEMI**	
	Lepidocyrtus	*lanuginosus*	**HEMI**	
	Lepidocyrtus	*lignorum*	**HEMI**	
	Pseudosinella	*immaculata*	**EU**	
	Pseudosinella	*alba*	**HEMI**	
Onychiuridae	*Protaphorura*	*subuliginata*	**EU**	**Pr_arm**
	Protaphorura	*armata*	**EU**	**Pr_arm**
	Paratullbergia	*callipygos*	**EU**	
Tullbergiidae	*Mesaphorura*	*macrochaeta*	**EU**	
	Mesaphorura	*florae*	**EU**	
	Mesaphorura	*sylvatica*	**EU**	
	Mesaphorura	*italica*	**EU**	
	Mesaphorura	*krausbaueri*	**EU**	
	Mesaphorura	*hylophila*	**EU**	
	Mesaphorura	sp.	**EU**	
	Stenaphorura	*denisi*	**EU**	
	Stenaphorura	*quadrispina*	**EU**	
Brachystomellida	*Brachystomella*	*parvula*	**HEMI**	
Hypogastruridae	*Ceratophysella*	*denticulata*	**HEMI**	
	Hypogastrura	sp.	**HEMI**	
Neanuridae	*Friesea*	*mirabilis*	**HEMI**	
	Micranurida	*sensillata*	**EU**	
	Monobella	*grassei*	**HEMI**	
Odontellidae	*Xenyllodes*	*armatus*	**HEMI**	
Neelidae	*Neelus*	*murinus*	**EU**	
	Megalothorax	*minimus*	**EU**	
Arrhopalitidae	*Arrhopalites*	*sp.*	**EU**	
Katiannidae	*Sminthurinus*	*aureus*	**HEMI**	
	Sminthurinus	*elegans*	**HEMI**	
Sminthurididae	*Sphaeridia*	*pumilis*	**HEMI**	
	Sminthurides	*parvulus*	**EPI**	
	Sminthurides	*malmgreni*	**EPI**	
	Sminthurides	*assimilis*	**EPI**	**Smines_x**
	Sminthurides	*schoetti*	**EPI**	**Smines_x**
Sminthuridae	*Sminthurus*	*niger*	**EPI**	
	Sminthurus	*viridis*	**EPI**	
Bourletiellidae	*Bourletiella*	*hortensis*	**EPI**	

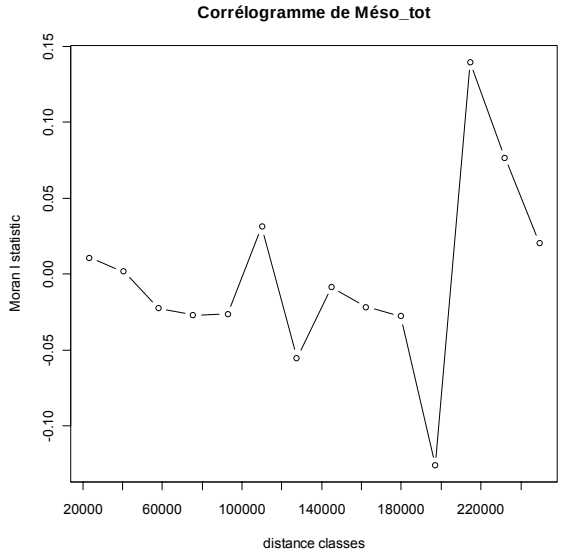
Annexe II : Condition de normalité des paramètres de mésofaune

Paramètres de mésofaune	Transformation des données	Nombres de sites restants	Sites écartés
Mésofaune totale	box-cox (λ = 0,01)	98	
AB_collembole totale	box-cox (λ = 0,01)	98	
AB_acarien total	box-cox (λ = 0,01)	98	
AB_COL_EPI	box-cox (λ = 0,01)	84	312, 362, 418, 420, 426, 427, 492, 606, 610, 664, 667, 668, 715, 719
AB_COL_HEMI	box-cox (λ = 0,01)	96	725, 780
AB_COL_EU	box-cox (λ = 0,01)	85	431, 489, 552, 610, 612, 658, 665, 667, 722, 725, 726, 778, 780
AB_AC_Oribate	box-cox (λ = 0,01)	96	425, 604
AB_AC_Gamaside	box-cox (λ = 0,01)	93	489, 612, 665, 725, 772
AB_AC_Actinedida	box-cox (λ = 0,01)	91	548, 550, 601,612, 668, 725, 778
Richesse taxonomique	box-cox (λ = 0,82)	98	
Indice de diversité	box-cox (λ = 1,26)	95	602, 725, 778
Equitabilité	box-cox (λ = 1,57)	95	602, 725, 778

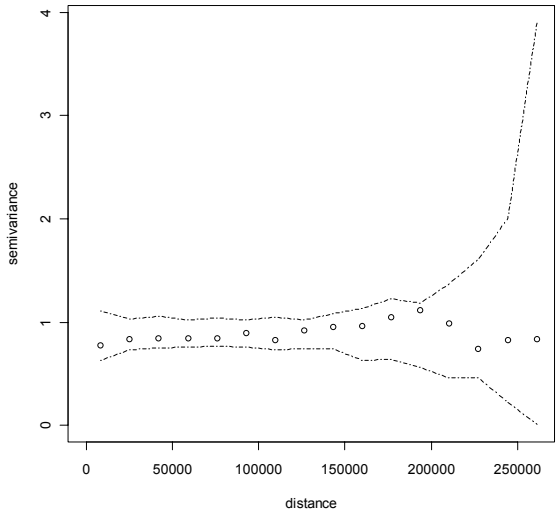
Annexe III : Résultats des analyses géostatistiques sur les paramètres de mésofaune

III.1 : Corrélogramme (a) et variogramme (b) de l'abondance totale de mésofaune

a)

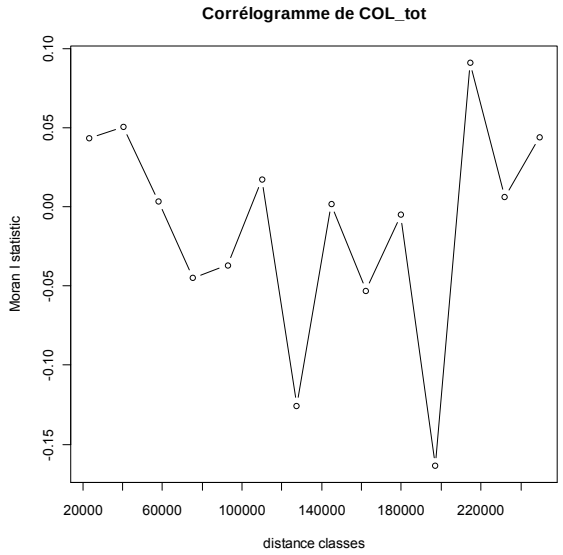


b)

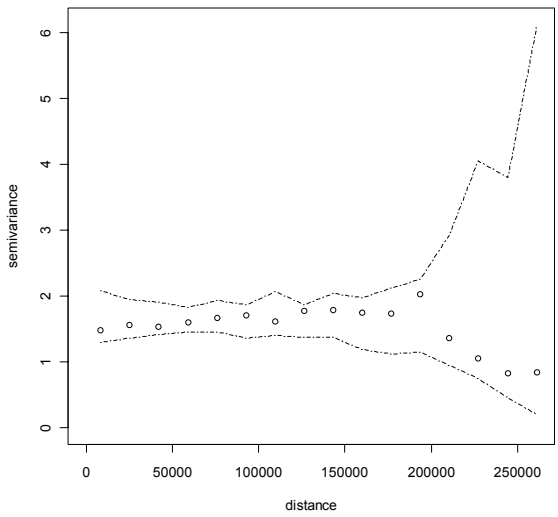


III.2 : Corrélogramme (a) et variogramme (b) de l'abondance totale de collemboles

a)

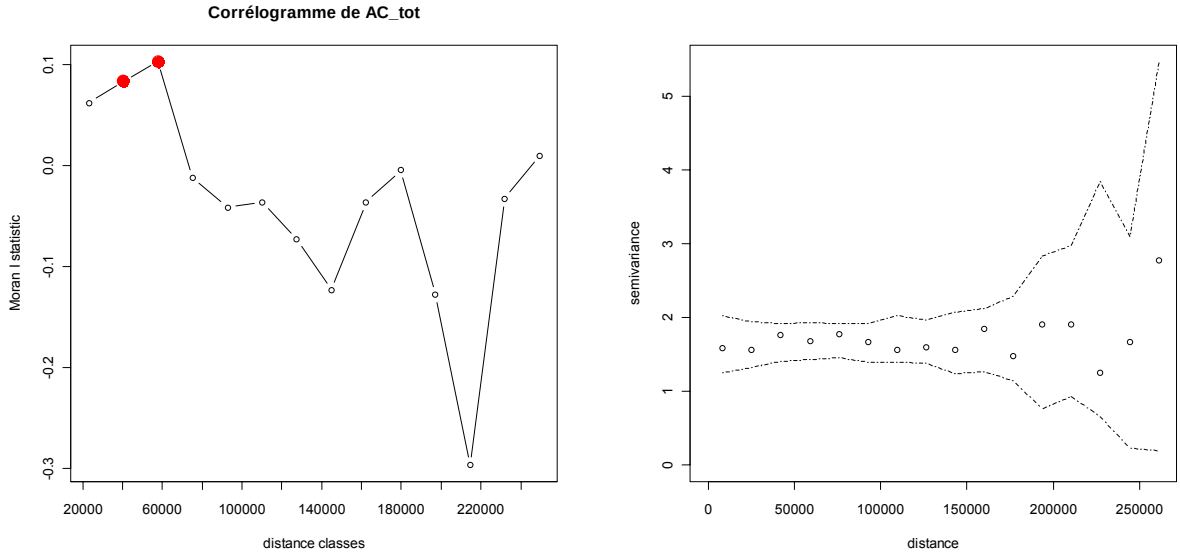


b)



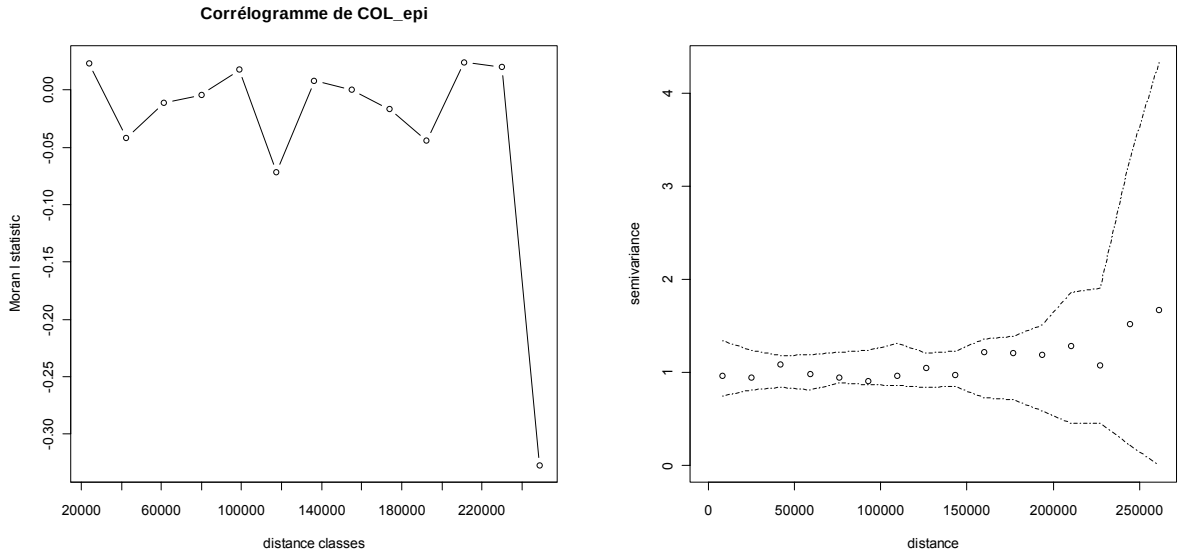
III.3 : Corrélogramme (a) et variogramme (b) de l'abondance totale d'acariens

a) **b)**



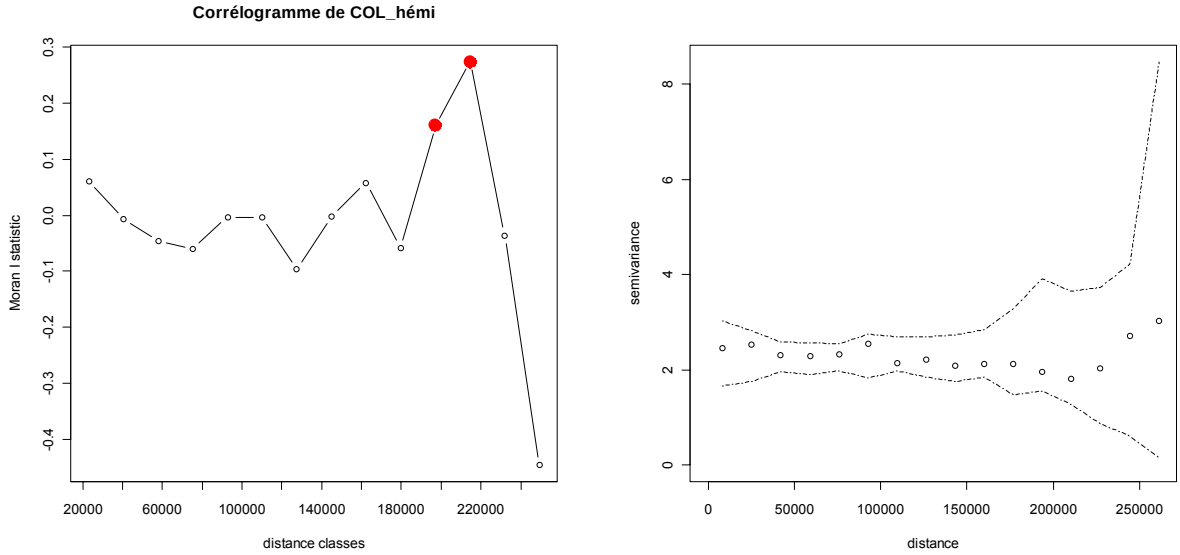
III.4 : Corrélogramme (a) et variogramme (b) de l'abondance de collemboles épi-édaphiques

a) **b)**



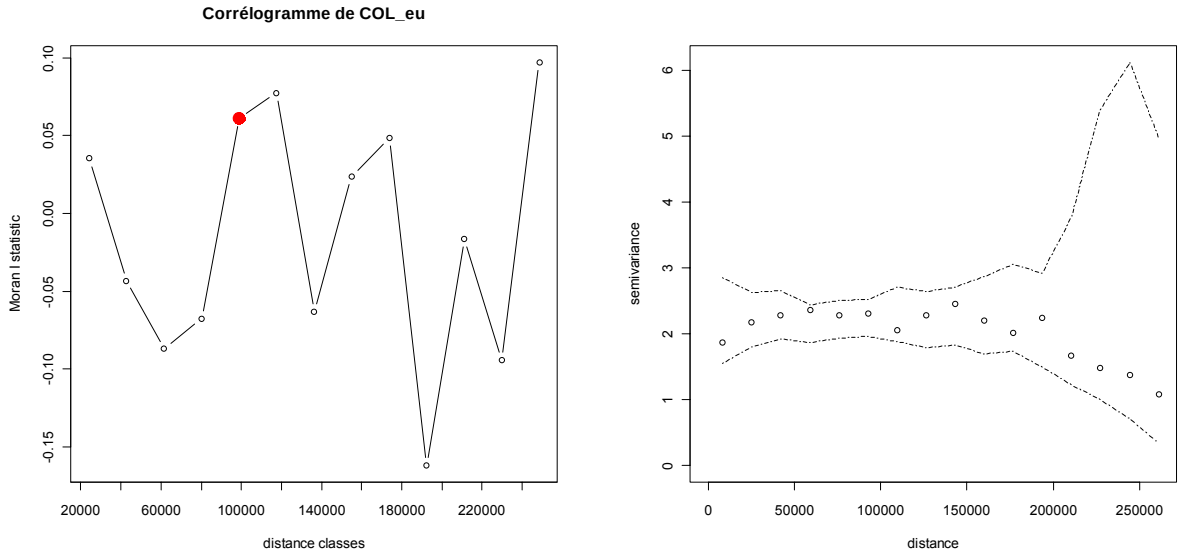
III.5 : Corrélogramme (a) et variogramme (b) de l'abondance de collemboles hémi-édaphiques

a) **b)**



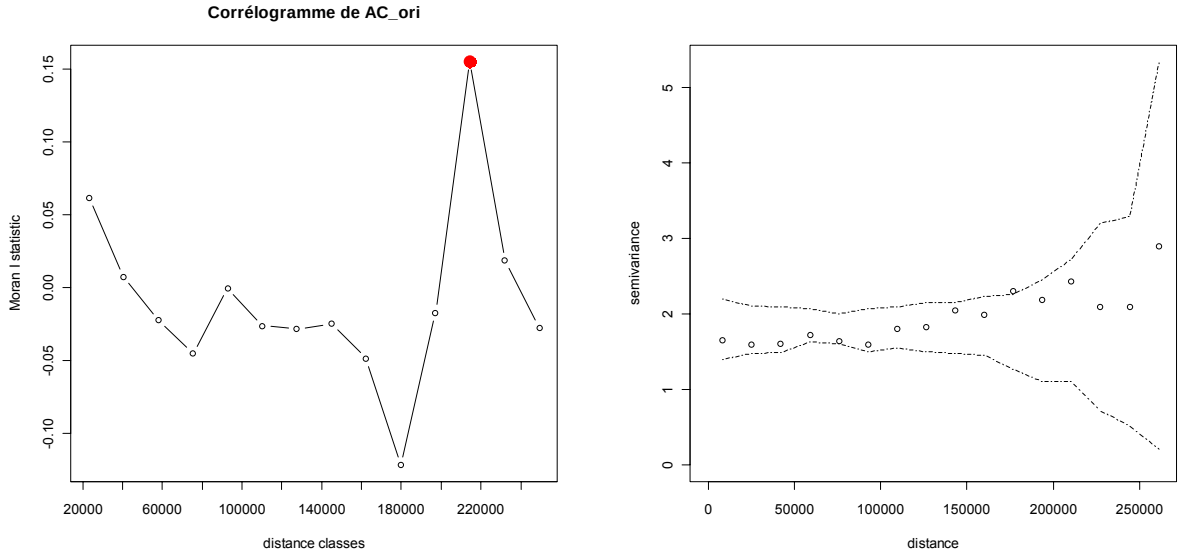
III.6 : Corrélogramme (a) et variogramme (b) de l'abondance de collemboles eu-édaphiques

a) **b)**



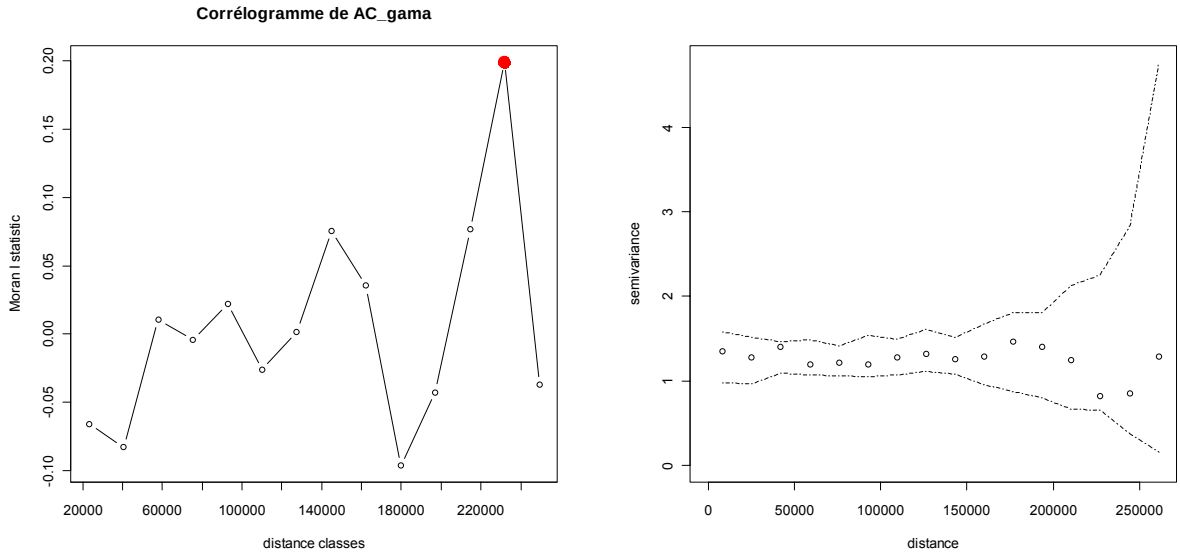
III.7 : Corrélogramme (a) et variogramme (b) de l'abondance des acariens Oribatida

a) **b)**



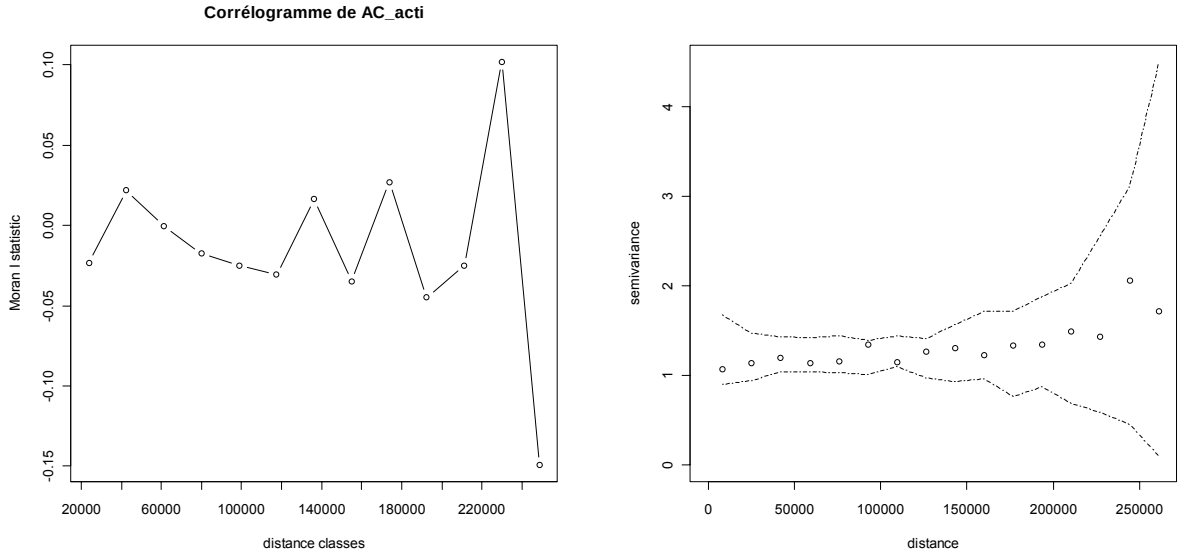
III.8 : Corrélogramme (a) et variogramme (b) de l'abondance des acariens Gamasida

a) **b)**



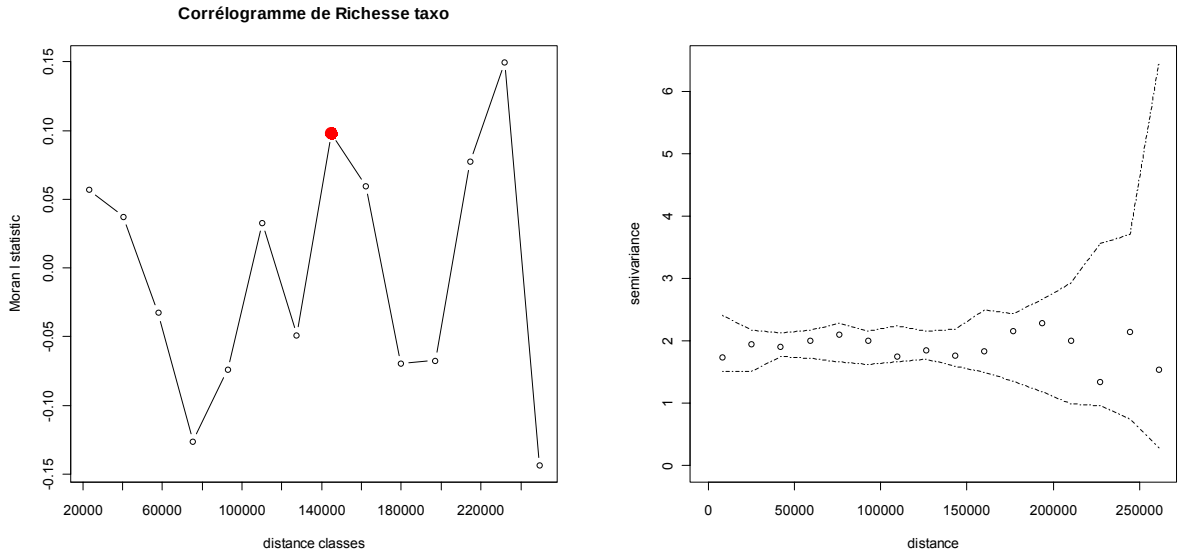
III.9 : Corrélogramme (a) et variogramme (b) de l'abondance des acariens Actinedida

a) **b)**



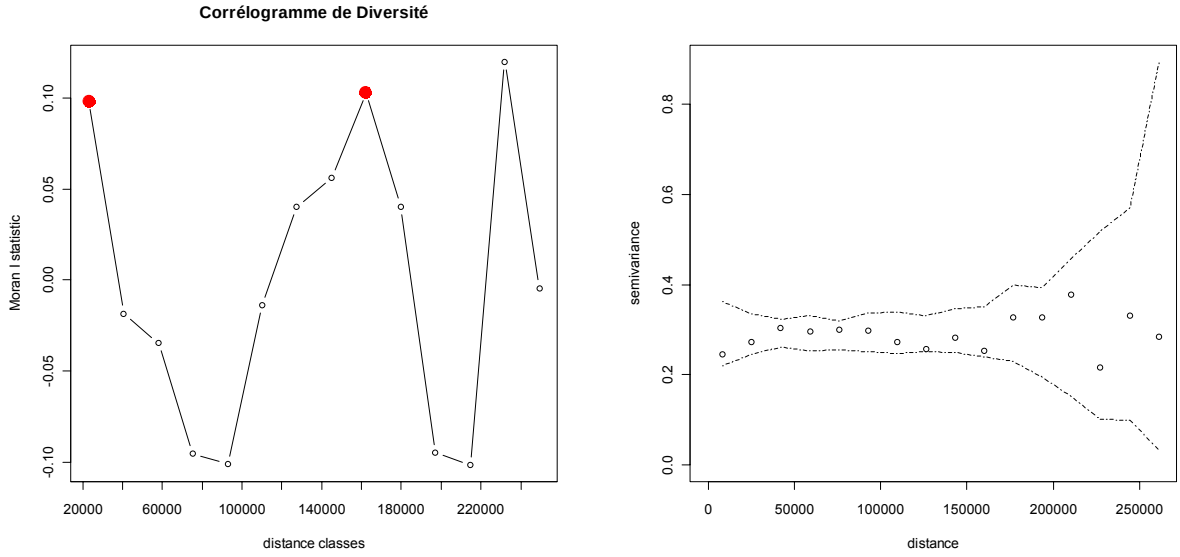
III.10 : Corrélogramme (a) et variogramme (b) de la richesse taxonomique

a) **b)**



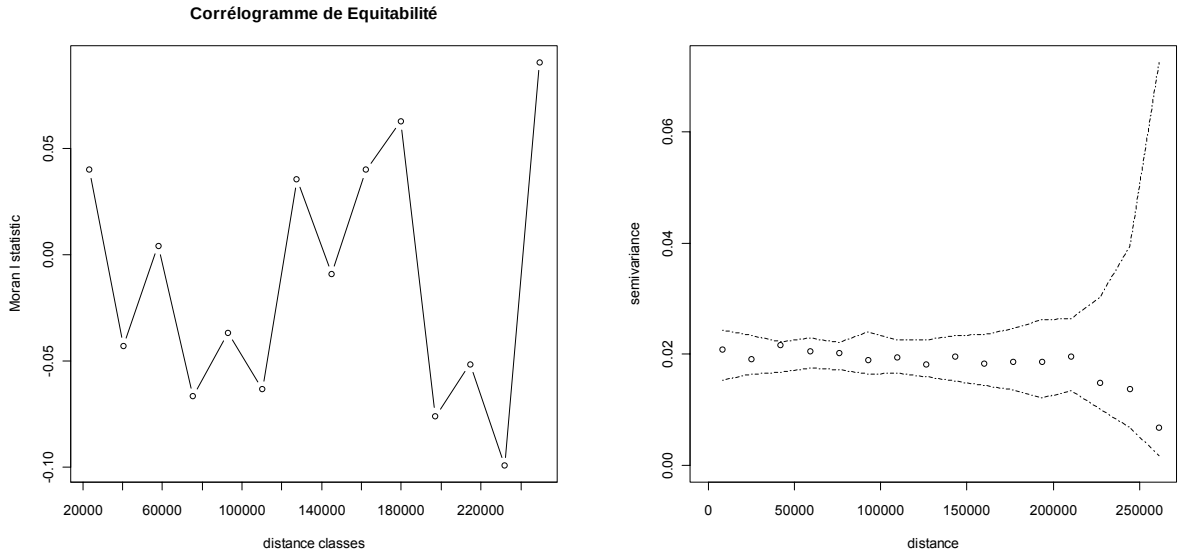
III.11 : Corrélogramme (a) et variogramme (b) de l'indice de diversité

a) **b)**

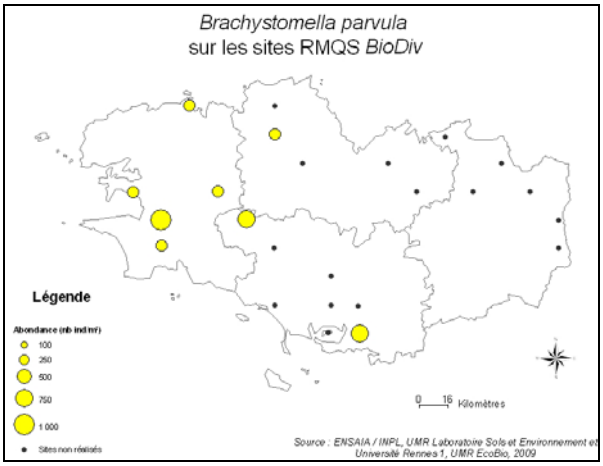


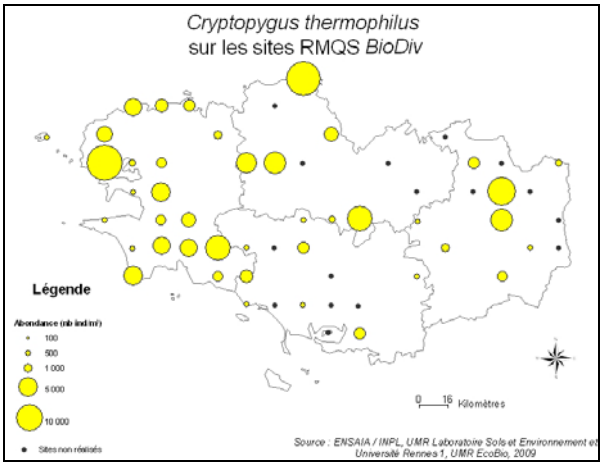
III.12 : Corrélogramme (a) et variogramme (b) de l'équitabilité

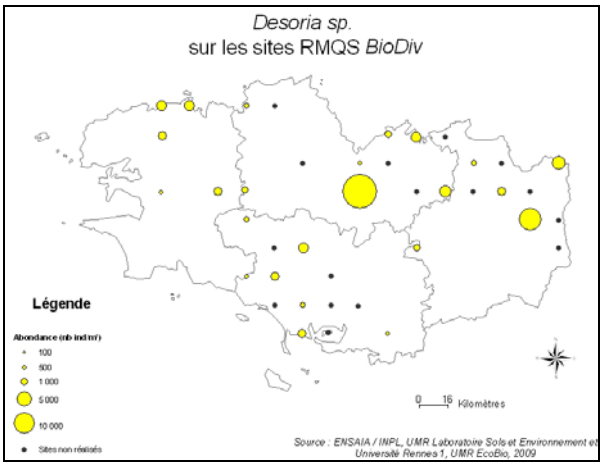
a) **b)**

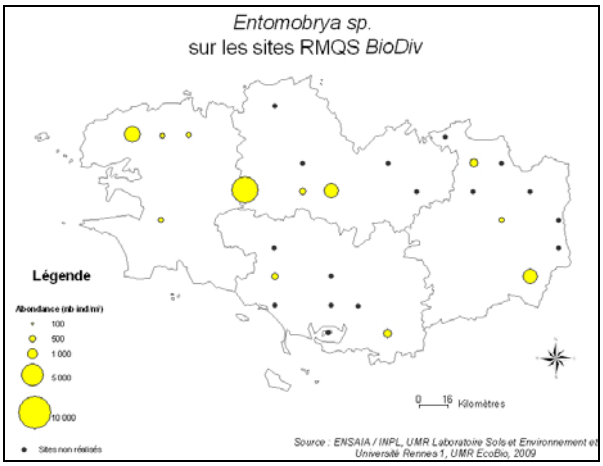


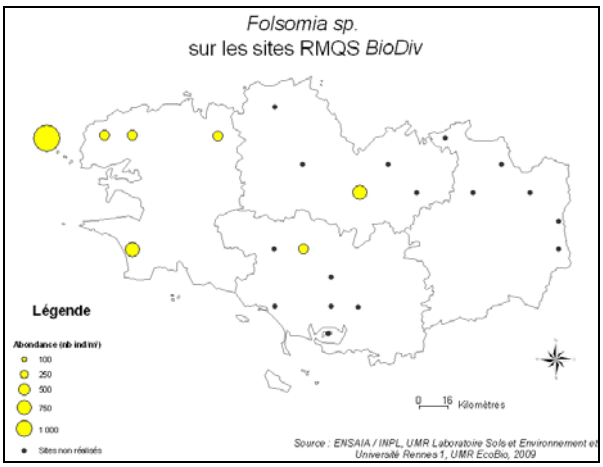
Annexe IV : Cartes des abondances des principaux taxons de collemboles

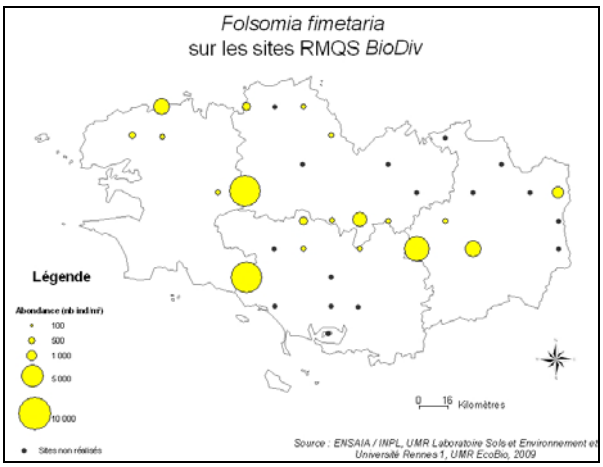


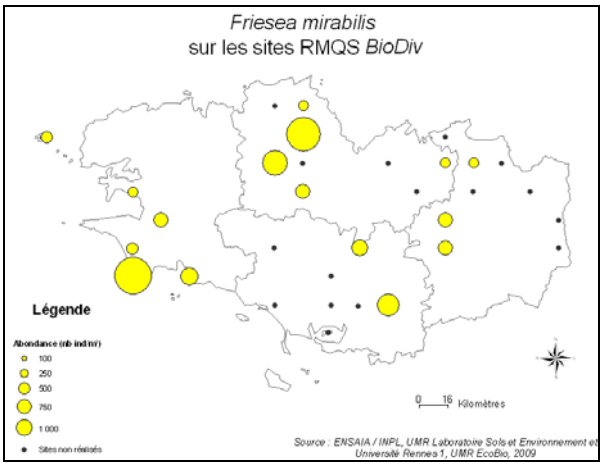


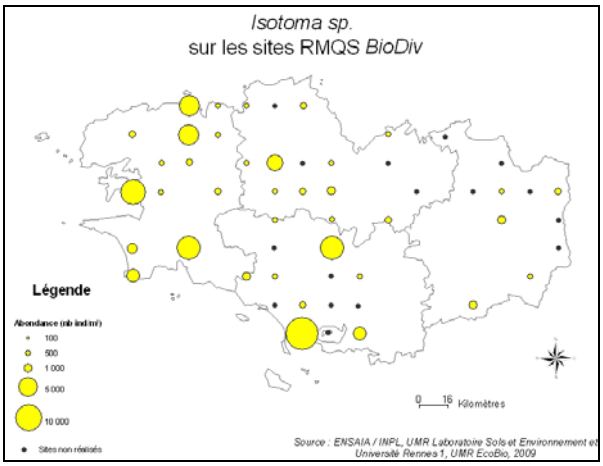


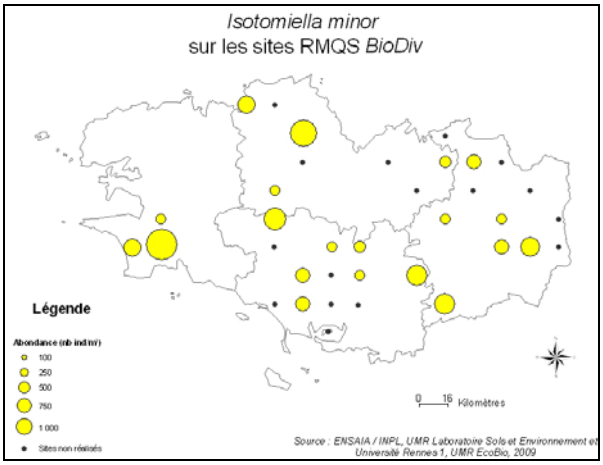


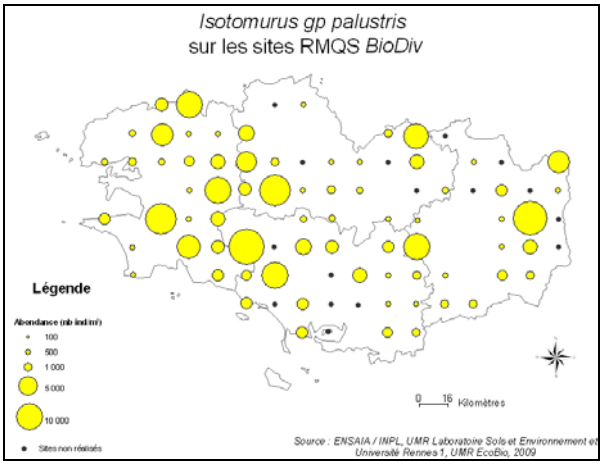


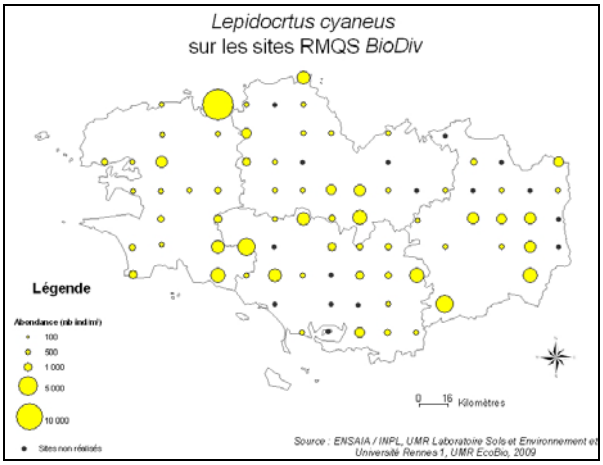


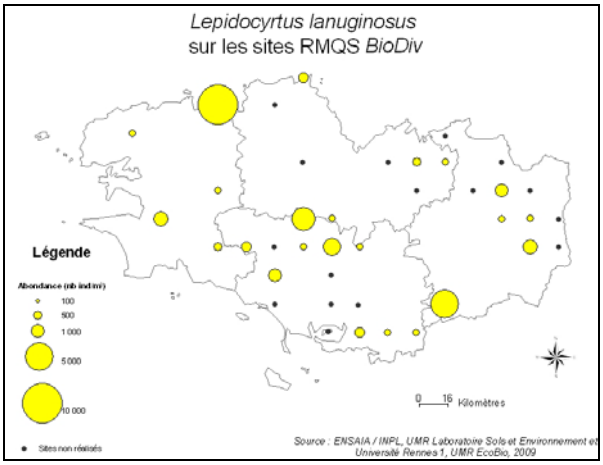

Friesea mirabilis
sur les sites RMQS BioDiv
Légende
Abondance (nb ind/m²)
100
250
500
750
1 000
Sites non réalisés
0 16 Kilomètres
Source : ENSAIA / INPL, UMR Laboratoire Sols et Environnement et Université Rennes 1, UMR EcoBio, 2009

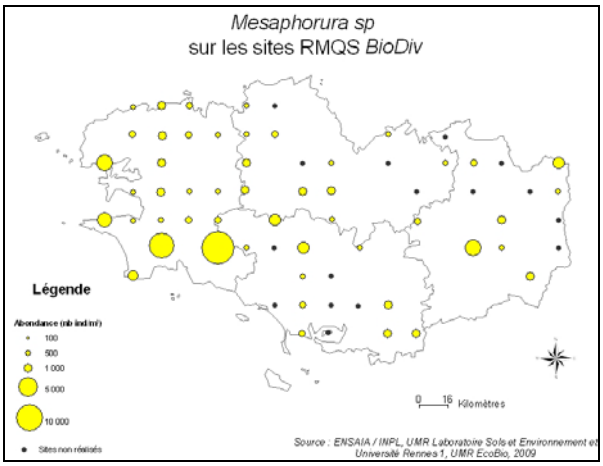

Isotoma sp.
sur les sites RMQS BioDiv
Légende
Abondance (nb ind/m²)
100
500
1 000
5 000
10 000
Sites non réalisés
0 16 Kilomètres
Source : ENSAIA / INPL, UMR Laboratoire Sols et Environnement et Université Rennes 1, UMR EcoBio, 2009

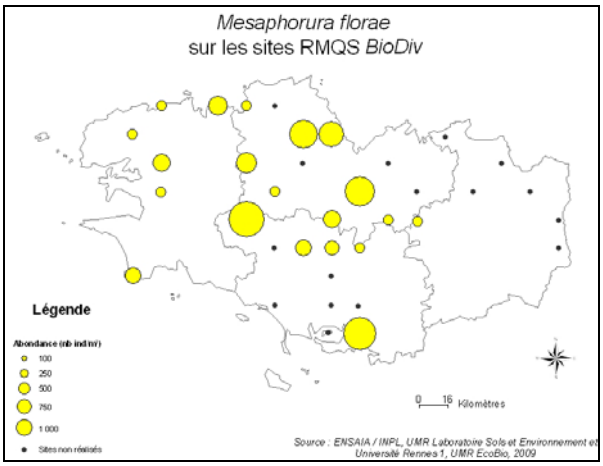

Isotomiella minor
sur les sites RMQS BioDiv
Légende
Abondance (nb ind/m²)
100
250
500
750
1 000
Sites non réalisés
0 16 Kilomètres
Source : ENSAIA / INPL, UMR Laboratoire Sols et Environnement et Université Rennes 1, UMR EcoBio, 2009

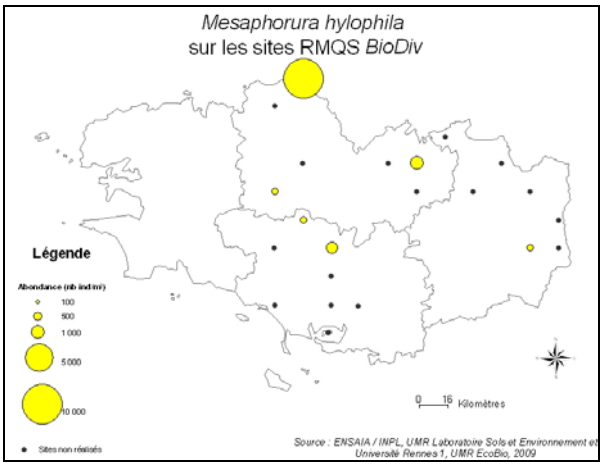

Isotomurus gp palustris
sur les sites RMQS BioDiv
Légende
Abondance (nb ind/m²)
100
500
1 000
5 000
10 000
Sites non réalisés
0 16 Kilomètres
Source : ENSAIA / INPL, UMR Laboratoire Sols et Environnement et Université Rennes 1, UMR EcoBio, 2009

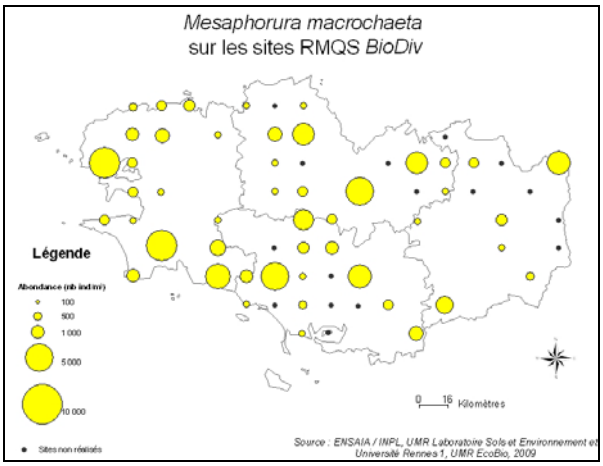

Lepidocrtus cyaneus
sur les sites RMQS BioDiv
Légende
Abondance (nb ind/m²)
100
500
1 000
5 000
10 000
Sites non réalisés
0 16 Kilomètres
Source : ENSAIA / INPL, UMR Laboratoire Sols et Environnement et Université Rennes 1, UMR EcoBio, 2009

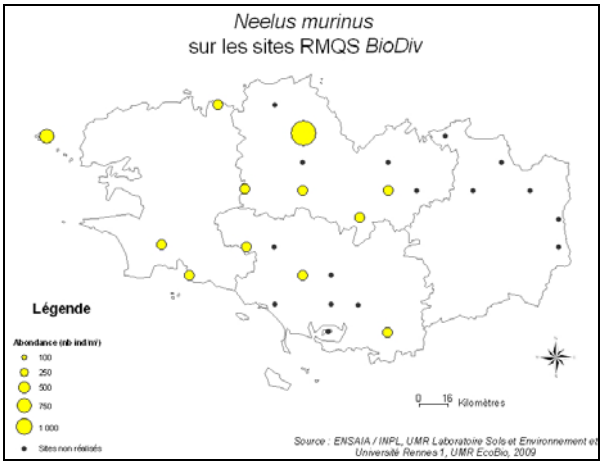

Lepidocyrtus lanuginosus
sur les sites RMQS BioDiv
Légende
Abondance (nb ind/m²)
100
500
1 000
5 000
10 000
Sites non réalisés
0 16 Kilomètres
Source : ENSAIA / INPL, UMR Laboratoire Sols et Environnement et Université Rennes 1, UMR EcoBio, 2009

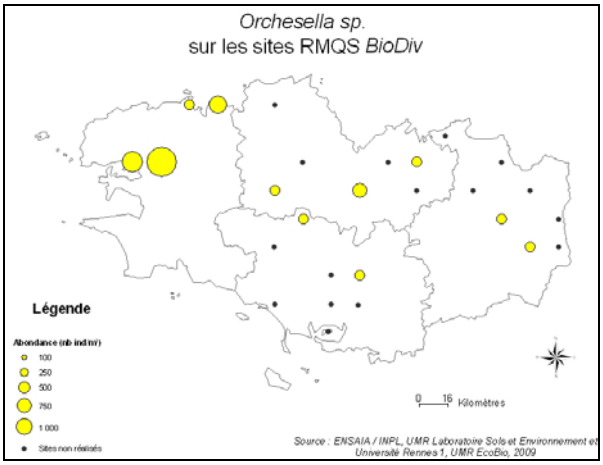

Mesaphorura sp
sur les sites RMQS BioDiv
Légende
Abondance (nb ind/m²)
100
500
1 000
5 000
10 000
Sites non réalisés
0 16 Kilomètres
Source : ENSAIA / INPL, UMR Laboratoire Sols et Environnement et Université Rennes 1, UMR EcoBio, 2009

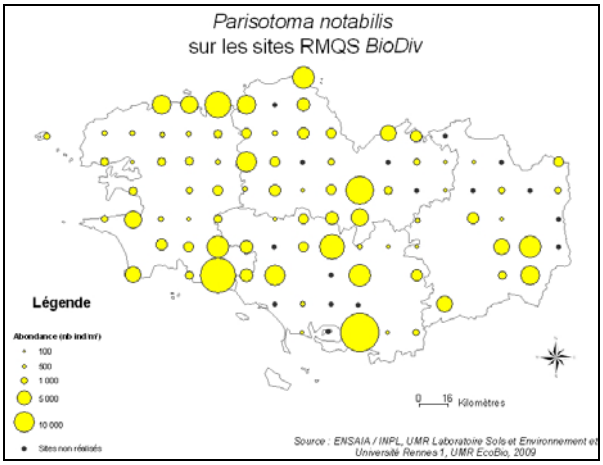

Mesaphorura florae
sur les sites RMQS BioDiv
Légende
Abondance (nb ind/m²)
100
250
500
750
1 000
Sites non réalisés
0 16 Kilomètres
Source : ENSAIA / INPL, UMR Laboratoire Sols et Environnement et Université Rennes 1, UMR EcoBio, 2009

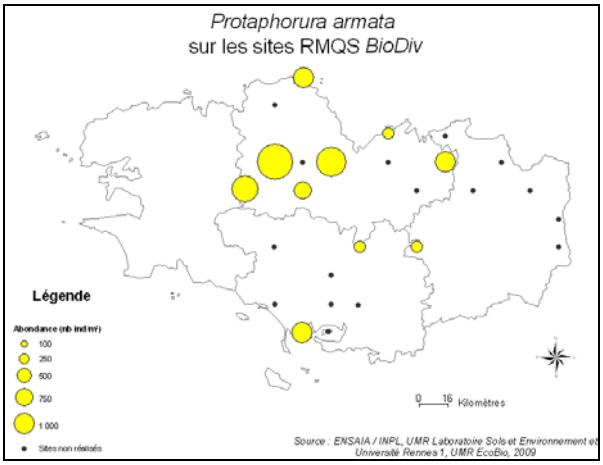

Mesaphorura hylophila
sur les sites RMQS BioDiv
Légende
Abondance (nb ind/m²)
100
500
1 000
5 000
10 000
Sites non réalisés
0 16 Kilomètres
Source : ENSAIA / INPL, UMR Laboratoire Sols et Environnement et Université Rennes 1, UMR EcoBio, 2009

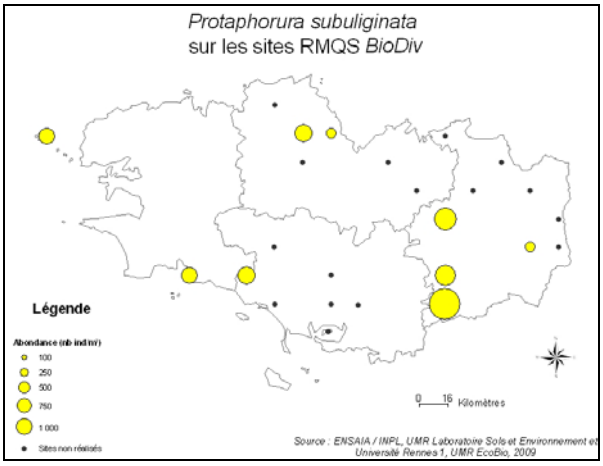

Mesaphorura macrochaeta
sur les sites RMQS BioDiv
Légende
Abondance (nb ind/m²)
100
500
1 000
5 000
10 000
Sites non réalisés
0 16 Kilomètres
Source : ENSAIA / INPL, UMR Laboratoire Sols et Environnement et Université Rennes 1, UMR EcoBio, 2009

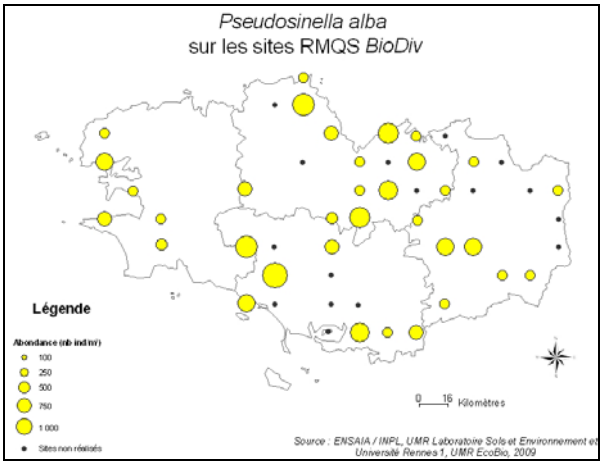

Neelus murinus
sur les sites RMQS BioDiv
Légende
Abondance (nb ind/m²)
100
250
500
750
1 000
Sites non réalisés
0 16 Kilomètres
Source : ENSAIA / INPL, UMR Laboratoire Sols et Environnement et Université Rennes 1, UMR EcoBio, 2009

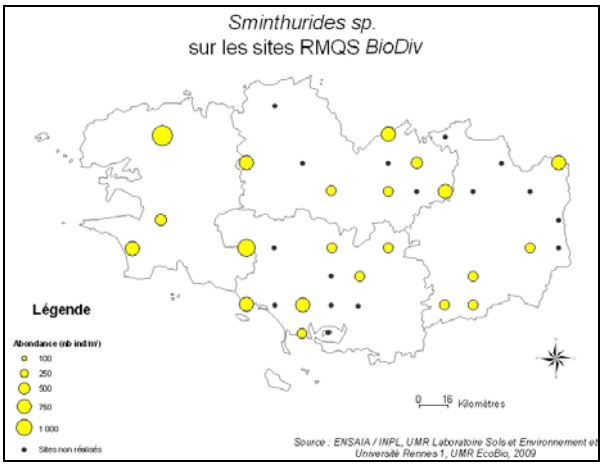

Orchesella sp.
sur les sites RMQS BioDiv
Légende
Abondance (nb ind/m²)
100
250
500
750
1 000
Sites non réalisés
0 16 Kilomètres
Source : ENSAIA / INPL, UMR Laboratoire Sols et Environnement et Université Rennes 1, UMR EcoBio, 2009

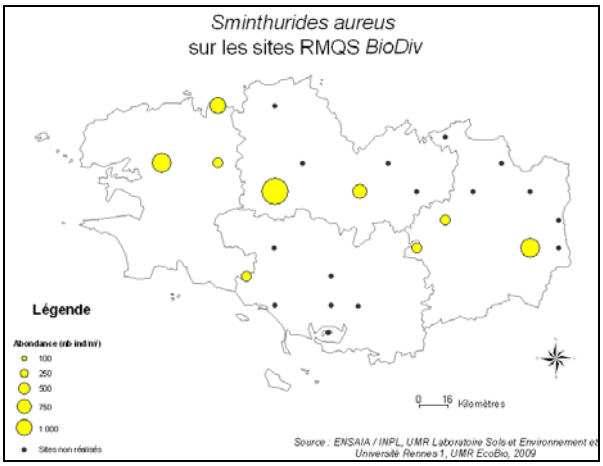

Parisotoma notabilis
sur les sites RMQS BioDiv
Légende
Abondance (nb ind/m²)
100
500
1 000
5 000
10 000
Sites non réalisés
0 16 Kilomètres
Source : ENSAIA / INPL, UMR Laboratoire Sols et Environnement et Université Rennes 1, UMR EcoBio, 2009

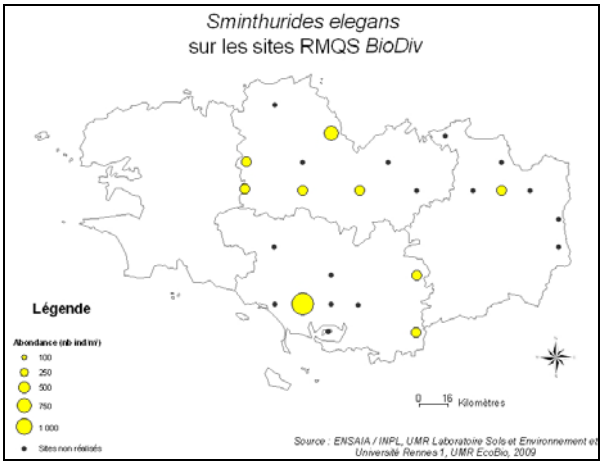

Protaphorura armata
sur les sites RMQS BioDiv
Légende
Abondance (nb ind/m²)
100
250
500
750
1 000
Sites non réalisés
0 16 Kilomètres
Source : ENSAIA / INPL, UMR Laboratoire Sols et Environnement et Université Rennes 1, UMR EcoBio, 2009

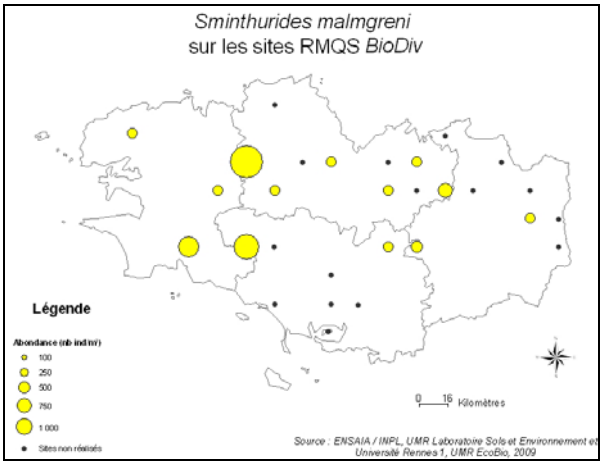

Protaphorura subuliginata
sur les sites RMQS BioDiv
Légende
Abondance (nb ind/m²)
100
250
500
750
1 000
Sites non réalisés
0 16 Kilomètres
Source : ENSAIA / INPL, UMR Laboratoire Sols et Environnement et Université Rennes 1, UMR EcoBio, 2009

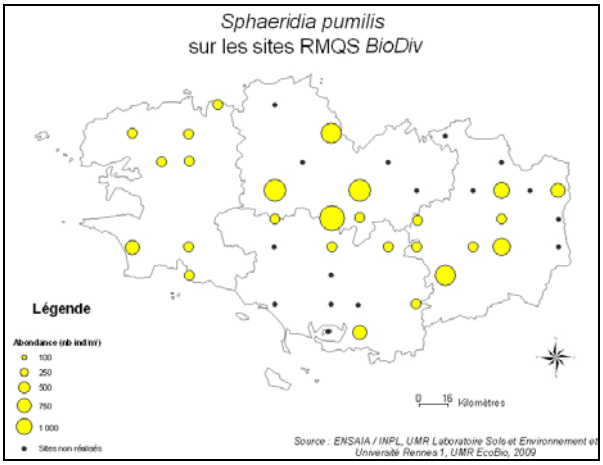

Pseudosinella alba
sur les sites RMQS BioDiv
Légende
Abondance (nb ind/m²)
100
250
500
750
1 000
Sites non réalisés
0 16 Kilomètres
Source : ENSAIA / INPL, UMR Laboratoire Sols et Environnement et Université Rennes 1, UMR EcoBio, 2009

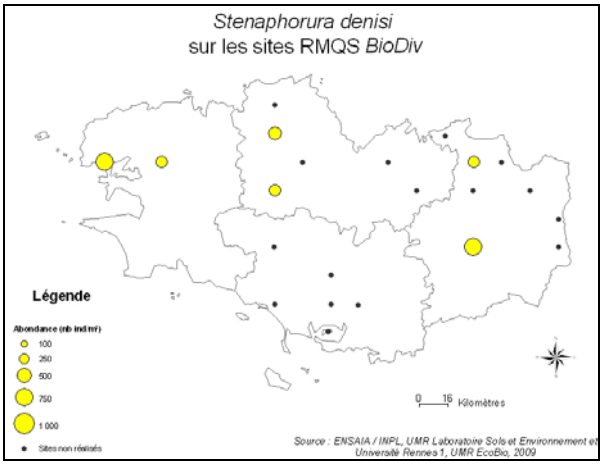

Sminthurides sp.
sur les sites RMQS BioDiv
Légende
Abondance (nb ind/m²)
100
250
500
750
1 000
Sites non réalisés
0 16 Kilomètres
Source : ENSAIA / INPL, UMR Laboratoire Sols et Environnement et Université Rennes 1, UMR EcoBio, 2009


Sminthurides aureus
sur les sites RMQS BioDiv
Légende
Abondance (nb ind/m²)
100
250
500
750
1 000
Sites non réalisés
0 16 Kilomètres
Source : ENSAIA / INPL, UMR Laboratoire Sols et Environnement et Université Rennes 1, UMR EcoBio, 2009


Sminthurides elegans
sur les sites RMQS BioDiv
Légende
Abondance (nb ind/m²)
100
250
500
750
1 000
Sites non réalisés
0 16 Kilomètres
Source : ENSAIA / INPL, UMR Laboratoire Sols et Environnement et Université Rennes 1, UMR EcoBio, 2009


Sminthurides malmgreni
sur les sites RMQS BioDiv
Légende
Abondance (nb ind/m²)
100
250
500
750
1 000
Sites non réalisés
0 16 Kilomètres
Source : ENSAIA / INPL, UMR Laboratoire Sols et Environnement et Université Rennes 1, UMR EcoBio, 2009


Sphaeridia pumilis
sur les sites RMQS BioDiv
Légende
Abondance (nb ind/m²)
100
250
500
750
1 000
Sites non réalisés
0 16 Kilomètres
Source : ENSAIA / INPL, UMR Laboratoire Sols et Environnement et Université Rennes 1, UMR EcoBio, 2009


Stenaphorura denisi
sur les sites RMQS BioDiv
Légende
Abondance (nb ind/m²)
100
250
500
750
1 000
Sites non réalisés
0 16 Kilomètres
Source : ENSAIA / INPL, UMR Laboratoire Sols et Environnement et Université Rennes 1, UMR EcoBio, 2009