RMQS *BioDiv* Bretagne

Rapport final

Février 2006 – Février 2009

Coordinateur scientifique : Daniel CLUZEAU [3]

Bellido[3] A., Boulonne[1] L., Cannavacciuolo[10] M., Chaussod[9] R., Cortet[5] J., Fargette[7] M., Giteau[11] 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[11] S., Velasquez[4] H., Villenave[7] 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, UR *Seq-Bio*
[8] Agrocampus - INRA Rennes, UMR INRA *Bio3P*
[9] INRA Dijon, UMR INRA MGS
[10] ESA Angers
[11] Chambre d'Agriculture de Bretagne

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

TOME 7 :

LOMBRICIENS

Contributeurs au rapport & prélèvements sur le terrain

Daniel Cluzeau, Guénola Pérès, Alain Bellido, Mario Cannavacciuolo,
Vincent Mercier, Laurence Rougé, Muriel Guernion, Denis Piron,
Roxane Grimaud, Guillaume Touati, Mickaël Moussay,

Table des matières

INTRODUCTION 1

MATERIELS & METHODES 5

Méthodes de prélèvement et paramètres étudiés 5

Nombre d'échantillons traités 6

Démarche d'exploitation des données 6

1. Exploration des données 9

1.1 Caractérisation globale des peuplements 9

1.1.1 Abondance lombricienne 9

1.1.2 Biomasse lombricienne 13

1.2 Caractérisation fonctionnelle par les catégories écologiques 15

1.3 Caractérisation taxonomique 17

1.3.1 Généralités sur la caractérisation taxonomique 17

1.3.2 Fréquence et abondance des taxons lombriciens 18

1.4 Caractérisation de la biodiversité 27

2. Approche spatiale 29

2.1 Structuration spatiale des paramètres lombriciens 29

2.2 Structuration spatiale des taxons lombriciens 34

2.3 Etude spatiale de la structure des communautés lombriciennes 35

3. Lombriciens et variables explicatives 37

3.1 Paramètres lombriciens en lien avec les variables explicatives 37

3.1.1 Paramètres lombriciens et paramètres physico-chimiques 39

3.1.2 Paramètres lombriciens et occupation des sols 40

3.1.3 Paramètres lombriciens et pratiques agricoles 50

3.1.4 Paramètres lombriciens et caractéristiques pédologiques 57

3.1.5 Paramètres lombriciens et année de prélèvement 60

3.1.6 Paramètres lombriciens et humidité des sols 62

3.2 Structure taxonomique des communautés lombriciennes 63

et variables explicatives 63

3.2.1 Structure des communautés lombriciennes et paramètres physico-chimiques 63

3.2.2 Structure des communautés lombriciennes et occupation des sols 65

3.2.3 Structure des communautés lombriciennes et pratiques agricoles 67

3.2.4 Structure des communautés lombriciennes et caractéristiques pédologiques 68

3.2.5 Structure des communautés lombriciennes et année de prélèvement 69

SYNTHESE 71

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 Mesures de la Qualité des Sols) dont le principal objectif est de mesurer périodiquement différentes variables afin d'être en mesure d'évaluer la qualité des sols et d'estimer leur évolution (Jolivet, 2006). Actuellement, les mesures réalisées sont exclusivement physiques (ex : densité apparente, etc.) ou chimiques (ex : teneur en éléments traces, etc.). Ainsi, contrairement à d'autres réseaux européens 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, car d'une part il constitue une expérience unique en France de mesure spatialisée de la diversité biologique des sols, et d'autre part, 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" dont le but est 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.

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

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

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

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

■ **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)

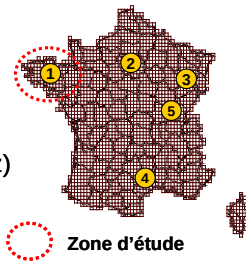


Figure 1 : Groupes biologiques étudiés et équipes partenaires du programme RMQS *BioDiv*

L'étude des paramètres lombriciens au regard des caractéristiques agro-environnementales des différents sites (pédologie, climat, localisation géographique, usage et gestion des sols) devra permettre de valider l'utilisation des lombriciens comme indicateurs de l'état et des usages des sols.

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

MATERIELS & METHODES

Méthodes de prélèvement et paramètres étudiés

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

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

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

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

Dans ce rapport, les résultats obtenus avec la méthode **Formol + Tri manuel** (FTM) et **Formol uniquement** (F) sont confrontés, afin d'évaluer l'apport du Tri manuel (plus couteux en temps) dans la qualité de l'information. Pour obtenir les données Formol + Tri manuel corrigé, les données Tri manuel (zone de 25 x 25 cm) ont été multipliées par 16 pour correspondre à 1m² et additionnées aux données Formol.

Nombre d'échantillons traités

Les prélèvements de lombriciens ont été réalisés sur **109 sites** RMQS *BioDiv.*

Notons que les sites 542 et 772 ont été échantillonnés deux fois. En effet, lors de la campagne de 2006, les prélèvements lombriciens ont été réalisés lors d'un premier passage ; or, pour le second passage des autres prélèvements biologiques la zone *BioDiv* avait été trop modifiée (fertilisation organique et labour). Il a donc été décidé de refaire ces sites en 2007. Seuls les prélèvements de l'année 2007 ont été utilisés dans les traitements de données afin de mieux les comparer avec les autres prélèvements biologiques.

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.).

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 des communautés lombriciennes, comme l'abondance, la biomasse, la richesse et la diversité taxonomiques. Ainsi, les valeurs moyenne, minimale, maximale et extrême[3] sont identifiées. Des transformations (box-cox[4]) 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.

[3] 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) [.

[4] La transformation box-cox permet de normaliser les 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 imposée ou optimisée 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.

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, 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 lombriciens a été testée par un test Join-Count (Dacey, 1968). Enfin, une ordination (ACP) sous contrainte spatiale[5] (Wartenberg, 1985) est réalisée pour l'analyse spatiale de la structure des communautés.

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). Le lien entre la structure des communautés et les variables explicatives est évalué par analyse de co-inertie (Dolédec & Chessel, 1994).

[5] Fonction multispati avec le logiciel R

1. Exploration des données

1.1 Caractérisation globale des peuplements

1.1.1 Abondance lombricienne

a) Formol + Tri manuel (FTM)

Les sols des sites RMQS *BioDiv* Bretagne présentent, en moyenne, des abondances lombriciennes de 260 ± 232 individus par mètre carré, les valeurs s'étendant de 3 à 1332 ind/m² (Figure 2). L'hétérogénéité des valeurs est confirmée par le coefficient de variation qui est de 0,8 (Figure 2.1).

Au-delà de 650 ind/m², les valeurs d'abondances lombriciennes sont considérées statistiquement comme extrêmes. Ce type de valeurs particulièrement élevées, est observé sur 5 sites (n° 484, 365, 428, 605, 670 et 727) (Figure 3). Il s'agit de trois prairies permanentes, une prairie temporaire et deux « grandes cultures ».

Les données brutes ne suivent pas une distribution normale. Une transformation *racine carrée* ou *box-cox* (lambda = 0,344) des données des 109 sites permet de respecter la condition de normalité.

b) Formol uniquement (F)

En prenant en compte uniquement les données issues du formol, l'abondance lombricienne moyenne sur les sites RMQS *BioDiv* est de 96 ± 82 ind/m². Les valeurs varient de 0,3 à 344 ind/m². Trois sites prairiaux, différents des précédents, (n° 365, 420 et 540) présentent des abondances considérées statistiquement comme extrêmes (supérieures à 290 ind/m²). Là aussi, la transformation *box-cox* (lambda = 0,345) permet de respecter la condition de normalité des données (Figure 2.2).

Le « tri manuel » représente en moyenne 56,2 ± 21,9 % d'individus de l'abondance lombricienne totale (FTM). L'apport du tri manuel peut constituer jusqu'à 94 % de

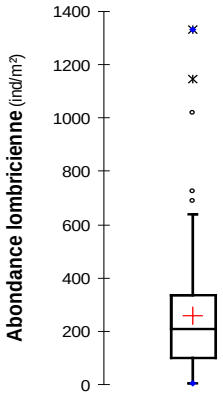
l'abondance d'un site (n° 362). Sept sites ne comptent pas d'individus récoltés au tri manuel. De manière générale, l'apport du Tri manuel est faible sous forêt (Figure 4).

2.1 : Abondance lombricienne (formol + tri manuel)

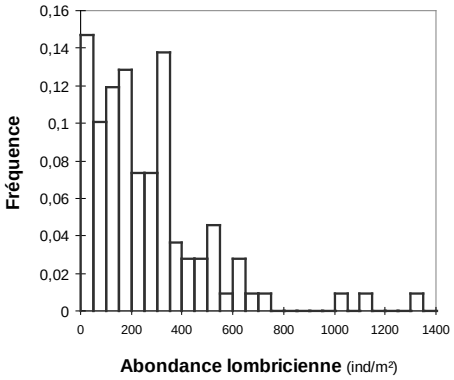
a)

Statistique	AB/m²
Nb. d'observations	109
Moyenne	259,46
Ecart-type (n-1)	232,30
Minimum	3
1er Quartile	101
Médiane	209,33
3ème Quartile	334,67
Maximum	1332,33
Amplitude	1329,33
Coefficient de variation	0,891

b)



c)

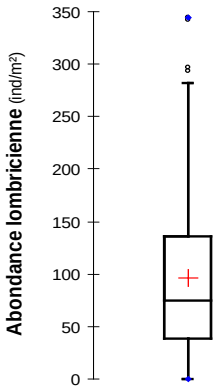


2.2 : Abondance lombricienne (formol uniquement)

a)

Statistique	AB/m²
Nb. d'observations	109
Moyenne	96,47
Ecart-type (n-1)	81,72
Minimum	0,33
1er Quartile	39,00
Médiane	75,00
3ème Quartile	136,33
Maximum	344,33
Amplitude	344,00
Coefficient de variation	0,843

b)



c)

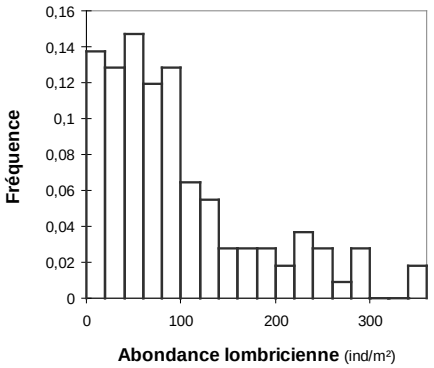


Figure 2 : Statistiques descriptives (a), boîtes à moustaches (b) et histogramme (c) de l'abondance lombricienne sur les sites RMQS *BioDiv*

Ces données (N=109) sont exprimées en nombre d'individus par mètre carré.
(+ : la moyenne ; barre du milieu : la médiane ; ° et * : les valeurs extrêmes ; ● : valeur minimale et maximale)

Les résultats obtenus dans le cadre du programme RMQS *BioDiv* sont en accord avec la littérature en contexte agricole breton (Annexe I).

Ci-après, sont représentés la contribution du tri manuel et du formol à l'abondance totale absolue et relative.

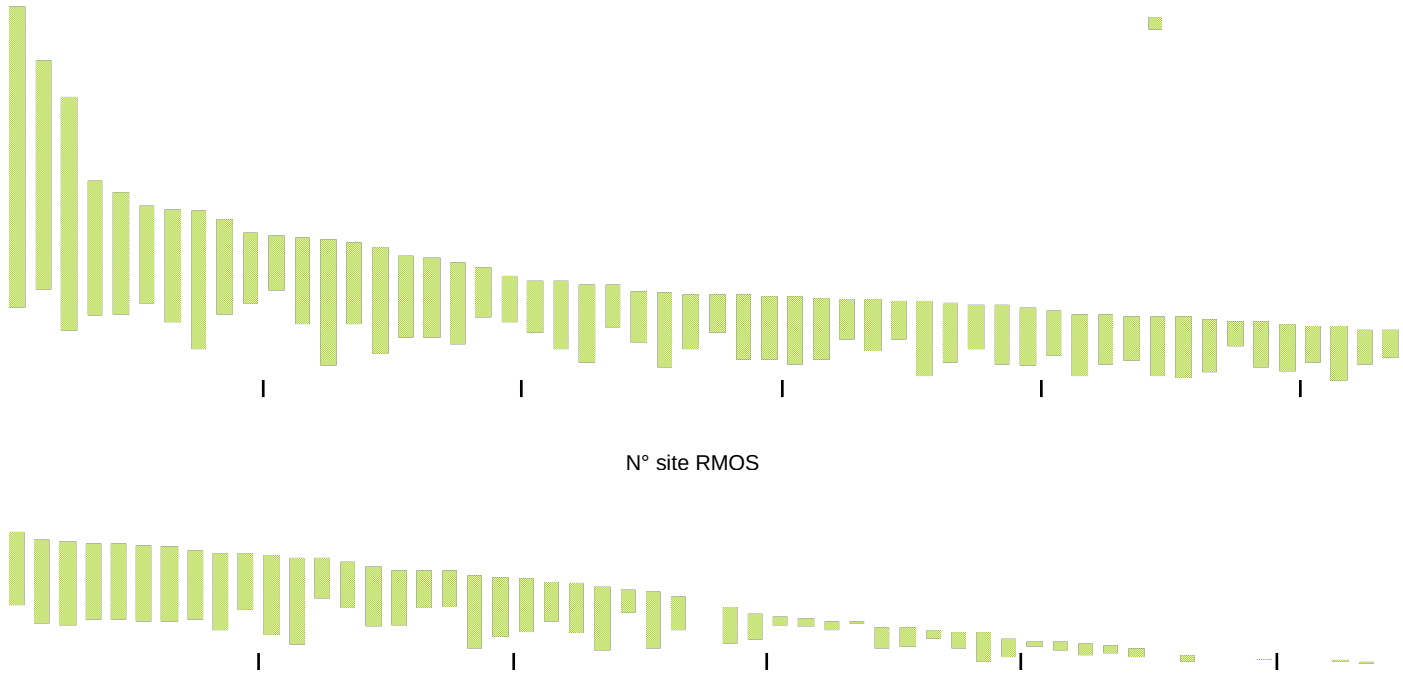


Figure 3 : Abondance lombricienne moyenne (nb ind/m²) sur les 109 sites RMQS *BioDiv* *obtenues à l'extraction formol et au tri manuel*

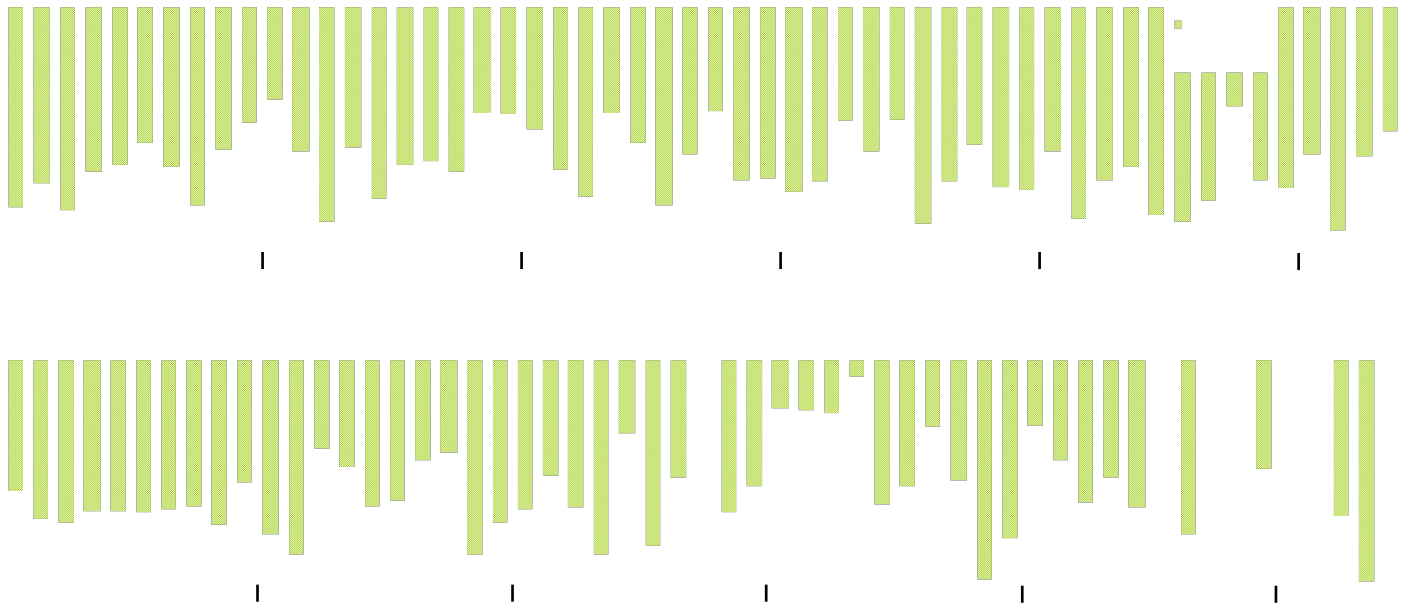


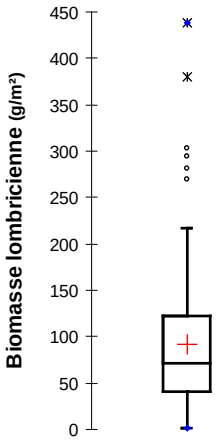
Figure 4 : Contribution du formol et du tri manuel (%) dans l'abondance lombricienne totale (FTM)

5.1 : Biomasse lombricienne (formol + tri manuel)

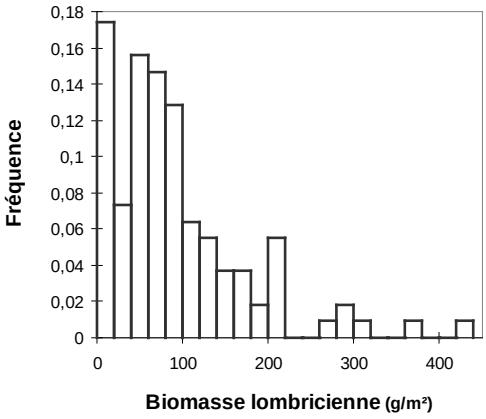
a)

Statistique	BIO/m²
Nb. d'observations	109
Moyenne	91,47
Ecart-type (n-1)	81,10
Minimum	0,92
1er Quartile	40,17
Médiane	70,94
3ème Quartile	122,20
Maximum	438,25
Amplitude	437,33
Coefficient de variation	0,883

b)



c)

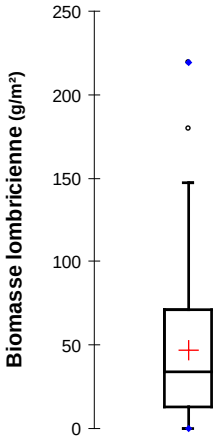


5.2 : Biomasse lombricienne (formol uniquement)

a)

Statistique	BIO/m²
Nb. d'observations	109
Moyenne	47,18
Ecart-type (n-1)	44,22
Minimum	0,36
1er Quartile	13,21
Médiane	33,60
3ème Quartile	71,26
Maximum	219,45
Amplitude	219,09
Coefficient de variation	0,933

b)



c)

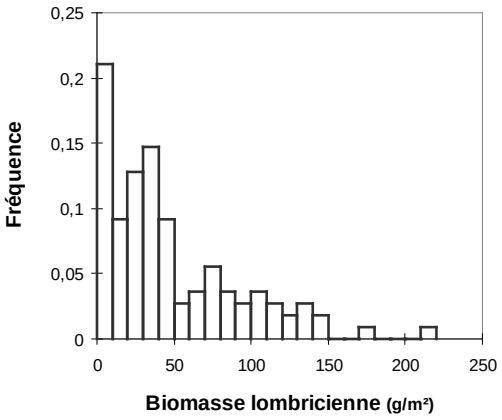


Figure 5 : Statistiques descriptives (a), boîtes à moustaches (b) et histogramme (c) de la biomasse lombricienne sur les sites RMQS *BioDiv*

Ces données (N=109) sont exprimées en grammes de poids frais par mètre carré.
(+ : la moyenne ; barre du milieu : la médiane ; ° et * : les valeurs extrêmes ; ● : valeur minimale et maximale)

1.1.2 Biomasse lombricienne

a) Formol + Tri manuel (FTM)

Les sols des sites RMQS *BioDiv* présentent, en moyenne, des biomasses lombriciennes de 91 ± 81 grammes par mètre carré. Les valeurs s'étendent de 0,92 à 438 g/m² (Figure 5). L'hétérogénéité des valeurs est mise en évidence par un coefficient de variation 0,9 (Figure 5.1).

Les biomasses au delà de 220 g/m² sont considérées statistiquement comme extrêmes. Ce type de valeurs élevées est observé sur 6 sites (site n° 605, 428, 671, 490, 484, 365). Il s'agit de sites prairiaux : 3 prairies temporaires et 3 prairies permanentes.

Les données brutes ne suivent pas une distribution normale ; par conséquent des transformations *racine carrée* ou *box-cox* (lambda = 0,362) peuvent être utilisées pour permettre de respecter la condition de normalité.

b) Formol uniquement (F)

En prenant en compte uniquement les données issues du formol, la biomasse lombricienne sur les sites RMQS *BioDiv* passe alors en moyenne à 47 ± 44 g/m². Deux sites prairiaux (site n° 605 et 490) présentent des biomasses considérées statistiquement comme extrêmes (supérieures à 150 g/m²). La transformation *box-cox* (lambda = 0,312) permet de respecter la condition de normalité des données (Figure 5.2).

Les valeurs observées sont en accord avec la littérature en contexte agricole breton (Annexe I).

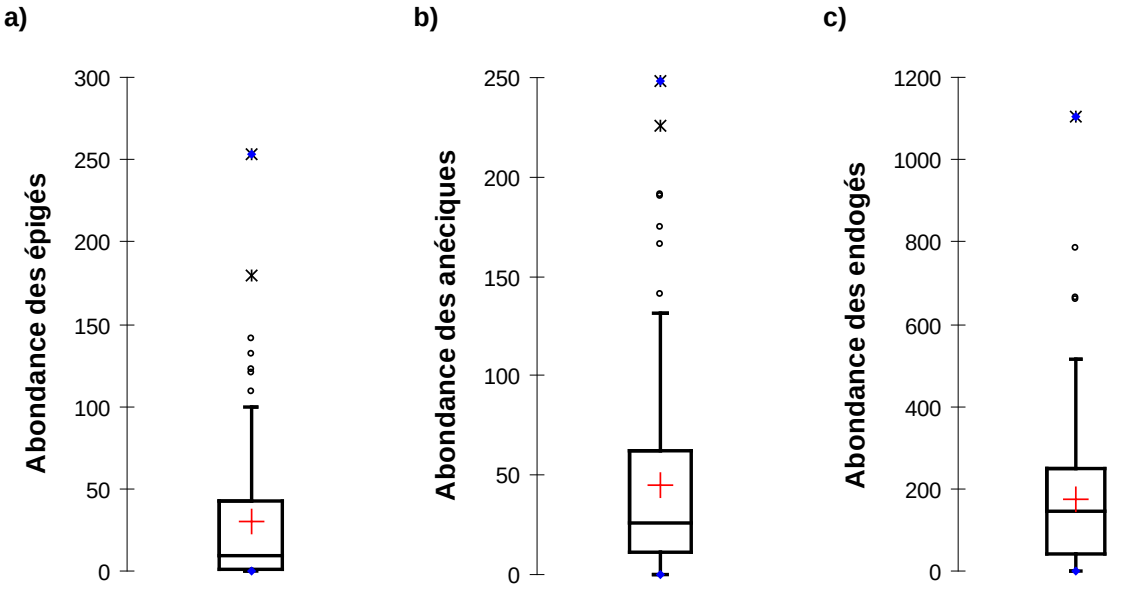


Figure 6 : Boîtes à moustaches de l'abondance des trois catégories écologiques lombriciennes
a) épigés, **b)** anéciques, **c)** endogés
Données FTM exprimées en nombre d'individus par mètre carré ; (N=109)
(+ : la moyenne ; barre du milieu : la médiane ; ° et * : les valeurs extrêmes ; ● : valeur minimale et maximale)

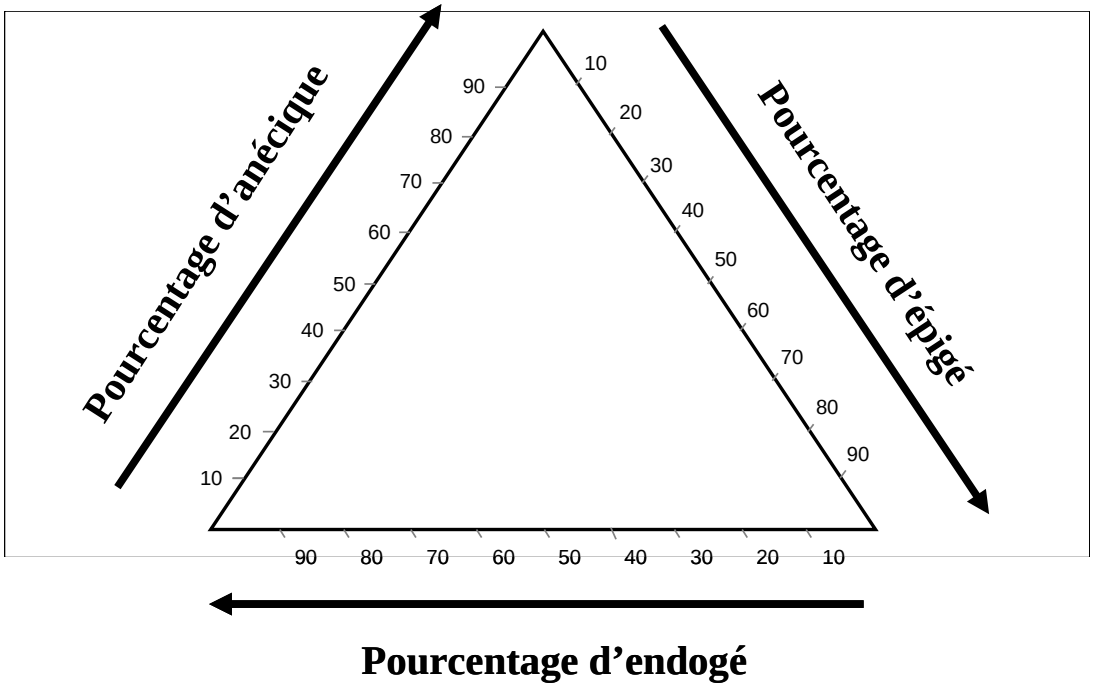


Figure 7 : Répartition des 109 sites RMQS *BioDiv* dans le triangle des catégories écologiques
La position de chaque site dans le triangle dépend de la proportion en abondance des catégories écologiques
Données FTM ; (N=109) ; Inspiré du *Simplex design proportions* (Sheehan, 2007)

1.2 Caractérisation fonctionnelle par les catégories écologiques

La caractérisation des peuplements est aussi réalisée via les trois **catégories écologiques : épigée, anécique, endogée** (Bouché, 1977). Elles sont définies selon cet auteur, par leur localisation dans le sol, leur régime alimentaire, la formation ou non d'un réseau de galeries, leur stratégie de reproduction, le temps de génération, le comportement estival … Les principales caractéristiques des trois catégories écologiques lombriciennes (Bouché, 1972) sont résumées dans le Tableau 1. Ce type d'information permet d'appréhender une structure fonctionnelle des peuplements.

Compte tenu de la forte disparité des biomasses entre les catégories écologiques (un anécique adulte peut représenter jusqu'à 5 fois le poids d'un endogé et 10 fois celui d'un épigé), la caractérisation fonctionnelle porte principalement sur les variabilités d'abondances numériques des catégories écologiques. Les biomasses lombriciennes par catégories écologiques sont données uniquement à titre informatif (Annexe II).

Les sols des sites RMQS *BioDiv* présentent des **abondances absolues** en endogés quatre fois supérieures aux deux autres catégories écologiques, soit en moyenne, respectivement 174, 45 et 30 ind/m² endogés, anéciques et épigés (Figure 6). En **abondance relative**, les endogés représentent (67%), les anéciques (18%) et les épigés (11%) (Annexe II). Il est également intéressant d'analyser la variation de proportion de chacune de ces catégories écologiques. Quelques sites sont caractérisés par des peuplements exclusivement composés d'épigés : ce sont les sites forestiers. De la même manière, deux sites maraîchers (Nord-Finistère) présentent de faible abondance lombricienne, composée uniquement d'anécique (Figure 7).

Tableau 1 : Principales caractéristiques des trois catégories écologiques lombriciennes

	Catégories écologiques		
	Epigés	**Anéciques**	**Endogés**
Localisation	En surface du sol, dans les accumulations organiques (litière, déjections animales, cadavre, …)	Prospection de toute la hauteur du profil du sol Déplacements nocturnes en surface	Localisation permanente dans le sol sans remonter à la surface (horizon organo-minéral et minéral)
Taille	Petite : 4–5 à 8–10 cm	Grande : 15–25 cm	Moyenne : 10-20cm
Effort de reproduction	Important (lié à une mortalité élevée)	Moyen	Faible
Qualité de la ressource trophique	Très énergétique	Moyennement énergétique	Faiblement énergétique
Nature des ingestats	Matière organique	Mélange Mat org et organo-minéral	Matière minérale essentiellement
Comportement alimentaire	Mésophages Alimentation en surface	Macrophages Prélèvements de nourriture en surface suivis d'une migration en profondeur	Microphages et géophages Alimentation au sein des horizons minéraux plus ou moins enrichis en matière organique Espèces géophages
Activité mécanique	Faible (pas de rôle fouisseur)	Intense : - Creusement de larges galeries subverticales profondes - Brassage organo-minéral des horizons - Rejet de fèces en surface (turricules)	Intense : Creusement de galeries sub-horizontales (diamètre moyen - 4 mm)
Biomasse en prairie, régions tempérées	Environ 5%	De 55 à 75%	De 20 à 40%
Intérêt agronomique	Faible	Majeur	Important
Espèces types	*Eisenia fetida (ver de fumier)* *Lumbricus castaneus* *Dendrobaena mammalis*	*Lumbricus terrestris* *Nicodrilus giardi* *Nicodrilus longa*	*Allolobophora icterica* *Nicodrilus caliginosa* *Allolobophora chlorotica*

1.3 Caractérisation taxonomique

1.3.1 Généralités sur la caractérisation taxonomique

À l'issue de la détermination, 29 taxons lombriciens ont été identifiés sur les 109 sites RMQS *BioDiv* Bretagne. Cette détermination a pu être effectuée à des niveaux infra-spécifiques (sous-espèce et variété). La liste des 29 taxons et leurs codes sont présentés dans le tableau 2 ci-dessous.

Tableau 2 : Liste des 29 taxons lombriciens présents sur les sites RMQS *BioDiv*

CATEG ECO	GENRE	SPECIES	SS_SPECIES	VARIETE	COD_TAXON	
	Dendrobaena	attemsi			**DA**	Michaelsen, 1901
	Dendrobaena	mammalis			**DM**	Savigny, 1926
	Dendrobaena	octaedra			**DO**	Savigny, 1926
	Dendrobaena	pygmea	cognettii		**DPC**	Michaelson, 1903
Epigé	Dendrobaena	rubida	rubida		**DRR**	Savigny, 1926
	Eisenia	eiseni			**EE**	Levinsen, 1884
	Eiseniella	tetraedra			**ET**	Savigny, 1926
	Lumbricus	castaneus			**LC**	Savigny, 1926
	Lumbricus	rubellus	castanoides		**LRC**	Bouché, 1972
	Lumbricus	rubellus	rubellus		**LRR**	Hoffmeister, 1843
	Lumbricus	friendi			**LFR**	Cognetti, 1904
	Lumbricus	terrestris			**LT**	Linné, 1758
	Lumbricus	centralis			**LCE**	Bouché, 1972
Anécique	Lumbricus	festivus			**LFE**	Savigny, 1926
	Nicodrilus	giardi			**NG**	Savigny, 1926
	Nicodrilus	longus	longus		**NLL**	Ude, 1886
	Nicodrilus	nocturnus			**NN**	Evans, 1946
	Nicodrilus	caliginosus	meridionalis		**NCM**	Bouché, 1992
	Allolobophora	chlorotica	chlorotica	albinica	**ACCA**	Savigny, 1926
	Allolobophora	chlorotica	chlorotica	typica	**ACCT**	Savigny, 1926
	Allolobophora	chlorotica	postepheba		**ACPX**	Bouché, 1972
	Allolobophora	icteria			**AI**	Savigny, 1926
	Allolobophora	minima			**AM**	Muldi, 1952
Endogé	Allolobophora	rosea	rosea		**ARR**	Savigny, 1926
	Nicodrilus	caliginosus	caliginosus	trapezoides	**NCCR**	Savigny, 1926
	Nicodrilus	caliginosus	caliginosus	typica	**NCCT**	Savigny, 1926
	Nicodrilus	caliginosus	tuberculata		**NCU**	Cernosvitov, 1935
	Octolasium	cyaneum			**OC**	Savigny, 1926
	Octolasium	lacteum	lacteum		**OLL**	Oerley, 1885

Selon Bouché (1972) et Qiu (1998)

1.3.2 Fréquence et abondance des taxons lombriciens

Les *statistiques descriptives* (moyenne, écart-type, médiane, maximum et coefficient de variation) des abondances des taxons lombriciens ainsi que leurs statuts en termes de fréquence de présence sur les sites RMQS *BioDiv* sont présentés en Annexe III.

1.3.2.1 Fréquence des taxons lombriciens sur les sites RMQS

Les taxons lombriciens peuvent être distingués en fonction de leur fréquence d'apparition sur les sites RMQS *BioDiv*. Ainsi, les ruptures de pentes observées (Figure 8) permettent de différencier les taxons en trois catégories :

- **taxons ubiquistes** : fréquence d'apparition sur les sites supérieure à 50 %
- **taxons intermédiaires** : fréquence entre 10 et 50 %
- **taxons rares** : fréquence inférieure à 10%

En termes de fréquence, les données « formol uniquement » sont très peu différentes des donnés « formol + tri manuel ».

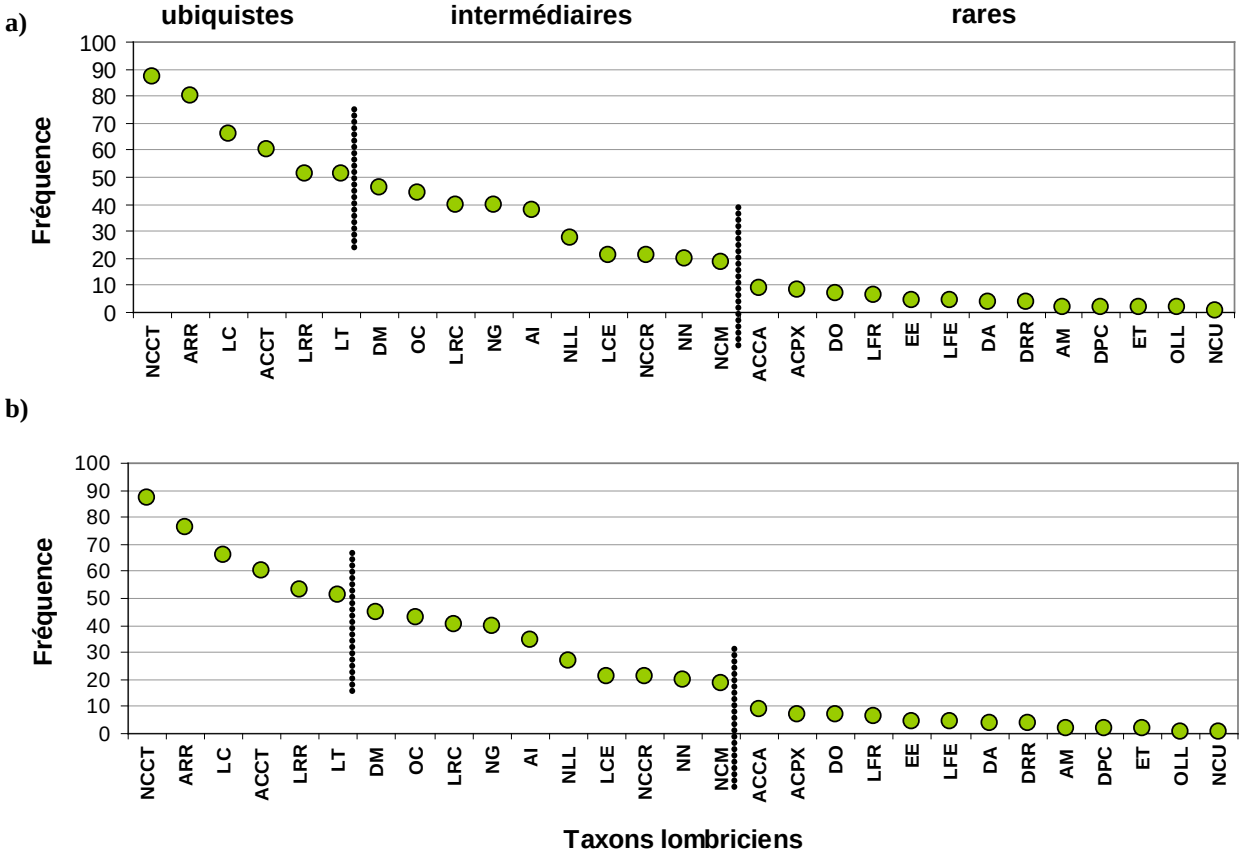


Figure 8 : Fréquence d'apparition des taxons lombriciens sur les sites RMQS *BioDiv*
a) formol + tri manuel **b)** formol uniquement

Six taxons sont présents sur plus de 50 % des sites : ce sont des taxons **ubiquistes**. Il s'agit de *Nicodrilus caliginosus caliginosus typica (*NCCT), *Allolobophora rosea rosea* (ARR), *Allolobophora chlorotica chlorotica* (ACCT), *Lumbricus castaneus* (LC), *Lumbricus rubellus rubellus* (LRR) *et Lumbricus terrestris* (LT).

Les taxons **intermédiaires,** avec une fréquence d'apparition comprise entre 10 et 50% concernent 10 taxons : *Dendrobaena mammalis* (DM), *Lumbricus rubellus castanoides* (LRC) et *L. centralis* (LCE), *Nicodrilus giardi* (NG), *N. longus longus* (NLL), *N. nocturnus* (NN), *N. caliginosus meridionalis* (NCM), *N. caliginosus caliginosus trapezoides* (NCCR), *Allolobophora icterica* (AI) et *Octolasium cyaneum* (OC).

Les taxons rares, en dessous d'une fréquence d'apparition de 10 %, concernent 13 taxons, illustrés dans la Figure 9.

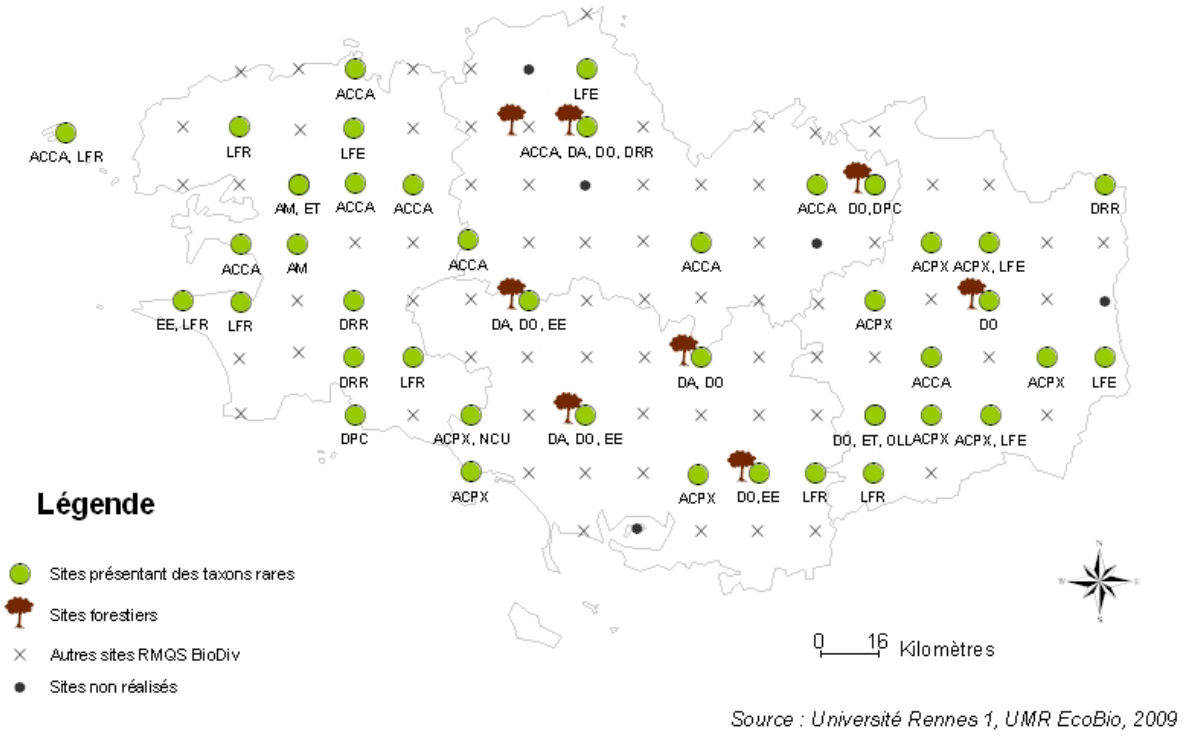


Figure 9 : Répartition des taxons lombriciens « rares » sur les sites RMQS *BioDiv*

Il s'agit en particulier, de taxons forestiers tels que *Dendrobaena octaedra* (DO), *Dendrobaena attemsi* (DA), *Eisenia eiseni* (EE) et *Octolasium lacteum* (OLL). Cela s'explique par le fait que seules 8 forêts ont été échantillonnées au cours de ce

programme, ces quatre taxons ont été qualifiés de rares au sein de notre échantillon bien qu'ils soient présents dans plus de la moitié des sites forestiers.

Les 9 autres taxons rares sont :

Espèces épigées

- *Eiseniella tetraedra* (ET) est présente uniquement sur deux sites dont une bande enherbée à proximité de cours d'eau (724) et une prairie à forte hydromorphie (482). Il n'existe pas de proximité spatiale pour cette espèce car elle est retrouvée dans un site au sud de l'Ille-et-Vilaine (724) et un autre au nord du Finistère (482). Ce taxon avait précédemment été rencontré sur une lande mésophile à proximité de Paimpont (Cluzeau, 1992). Selon Bouché (1972), il s'agit d'une espèce typiquement ripicole qui présente un intérêt particulier en raison de son aptitude à vivre dans le milieu organique des bords de rivière.
- *Dendrobaena pygmea cognettii* (DPC) est présent sur un site forestier à l'est des Côtes d'Armor (492) et une prairie permanente (715) au sud Finistère.
- *Dendrobaena rubida* (DRR) est présent sur 3 sites de culture (496, 600 et 658) et un site forestier (427) qui ne présentent pas de proximité spatiale (départements 35, 22 et 29[6]).

Espèces anéciques

- *Lumbricus festivus* (LFE) présent sur 5 sites prairiaux (368, 423, 552, 671 et 726) de trois départements différents (départements 29, 22 et 35).
- *Lumbricus friendi* (LFR) présent sur 7 sites (418, 421, 597, 598, 659, 778 et 779) dont 4 sites prairiaux et 3 sites cultivés. Il est à noter que parmi ces 7 sites, 5 sites sont dans le Finistère (dont en particulier l'île d'Ouessant) et 2 en limite Morbihan – Ille-et-Vilaine. Ce taxon avait précédemment été rencontré sur un site à proximité de Quimper (Binet, 1993 ; Pérès, 2003).

Espèces et sous-espèces endogées

- *Nicodrilus caliginosus tuberculata* (NCU) n'est présent que sur 1 prairie du sud-Finistère (717). Notons que cette espèce a également été retrouvée au centre de ce département (542 lors du premier passage en 2006).
- *Allolobophora minima* (AM) est présent sur deux sites prairiaux du Finistère (482 et 540) distant de 16 Km. Cette espèce est normalement caractéristique des sols calcaires, cas très peu fréquemment rencontré en Bretagne.
- *Allolobophora chlorotica postepheba* (ACPX) est présent sur 9 sites RMQS *BioDiv* dont 4 cultures (670, 725, 772 et 776), 4 prairies (552, 609, 717 et 726) et 1 friche. Ce taxon n'est rencontré que sur les départements Ille et Vilaine (35) et Morbihan (56). Bouché qualifie également ce taxon comme « rare » et l'a rencontré uniquement dans le bassin de la Loire et le

[6] **22** : Côtes d'Armor ; **29** : Finistère ; **35** : Ille-et-Vilaine ; **56** : Morbihan

haut Bassin Rhodanien (Bouché, 1972). Une étude précédente avait également identifié ce taxon sur une parcelle de Le Rheu (35) (Binet, 1993).

- *Allolobophora chlorotica albinica* (ACCA) est présent sur 10 sites RMQS *BioDiv* (364, 418, 427, 483, 484, 491, 539, 543, 547, 668), divers en termes d'occupation du sol (4 prairies permanentes, 2 prairies temporaires, 3 cultures et 1 forêt). Ce taxon est retrouvé principalement dans la moitié nord de la Bretagne dans les départements 29, 22 et 35. Les formes ACCA et ACCT peuvent être présents sur un même site (cas de 3 sites RMQS). La forme albinique (leucotypique) présente un caractère nettement plus calcicole que la forme typique (ACCT) (Bouché, 1972). Ce taxon avait également été retrouvé sur une parcelle proche de Quimper (29) (Binet, 1993 ; Pérès, 2004) et une de Le Rheu (Binet, 1993).

1.3.2.2 Abondance relative des taxons

Les peuplements lombriciens sur les sites RMQS *BioDiv* sont très largement dominés par les endogés dont notamment *Nicodrilus caliginosus caliginosus typica* – NCCT (39 %) et *Allolobophora chlorotica chlorotica typica* – ACCT (18 %). Les autres taxons relativement abondants sont *Allolobophora rosea rosea – ARR* (8 %), *Lumbricus castaneus – LC* (8 %) *et Nicodrilus giardi – NG* (6 %) (Figure 10).

Les taxons endogés ACCT, NCCT, AI, ARR sont présents en moindre proportion dans les données « formol uniquement » car ce sont des taxons principalement retrouvés au tri manuel.

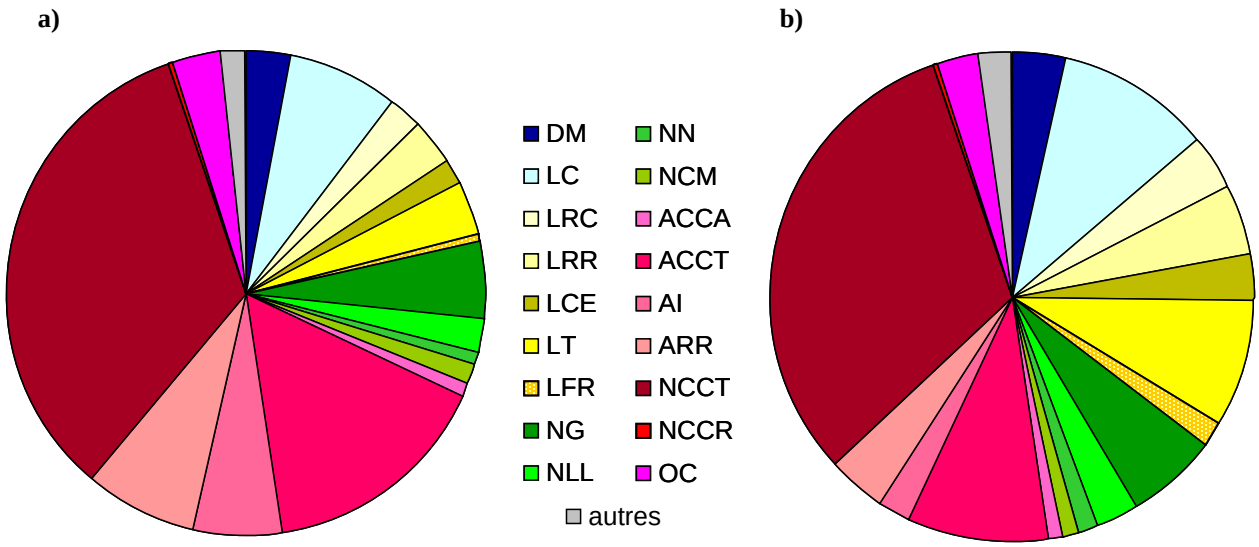
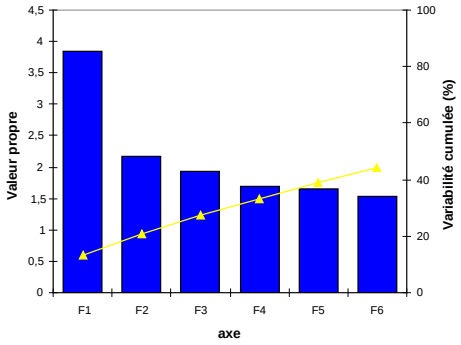
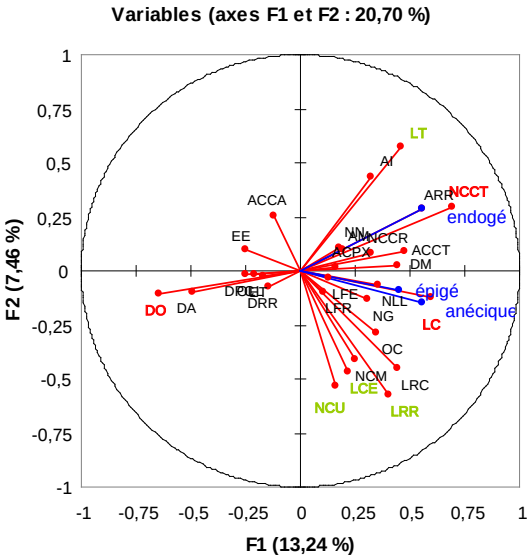
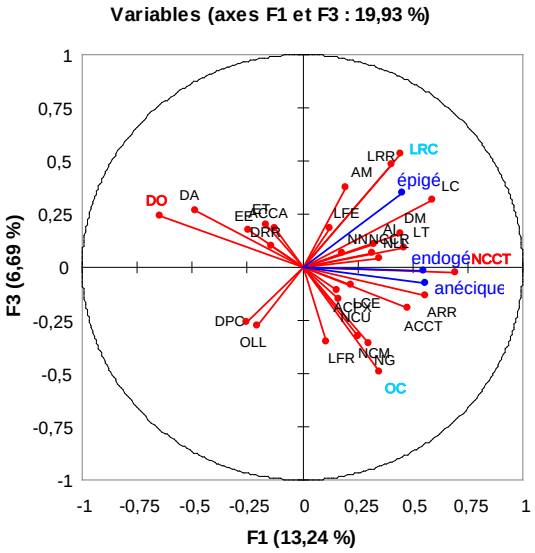
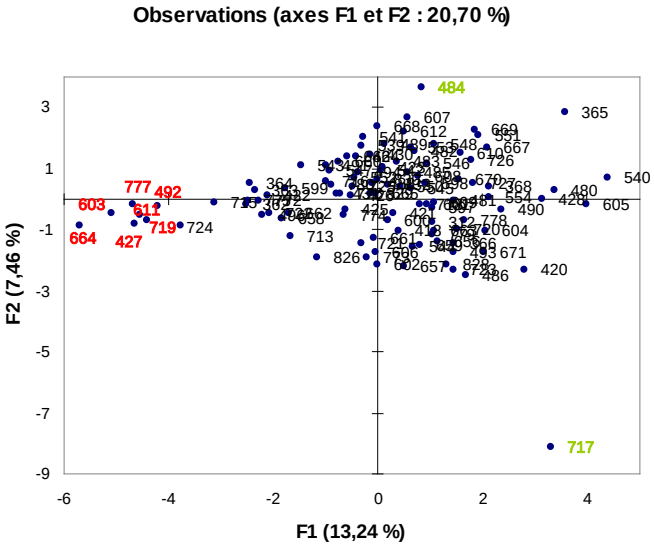


Figure 10 : Structure taxonomique moyenne des communautés sur l'ensemble des sites RMQS *BioDiv*
a) formol + tri manuel **b)** formol uniquement
Les épigés sont en bleu, les épi-anéciques en jaune, les anéciques en vert et les endogés en rose.









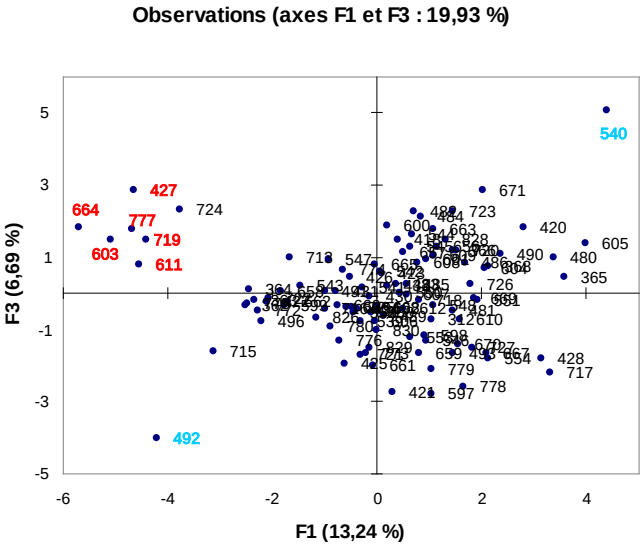


Figure 11 : Plans factoriels de l'ACP sur l'ensemble de la communauté lombricienne
Données Formol

1.3.3 Structure des communautés lombriciennes

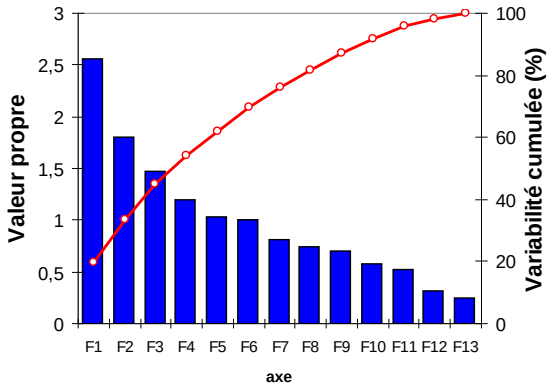
a) Analyse multivariée sur l'ensemble de la communauté lombricienne

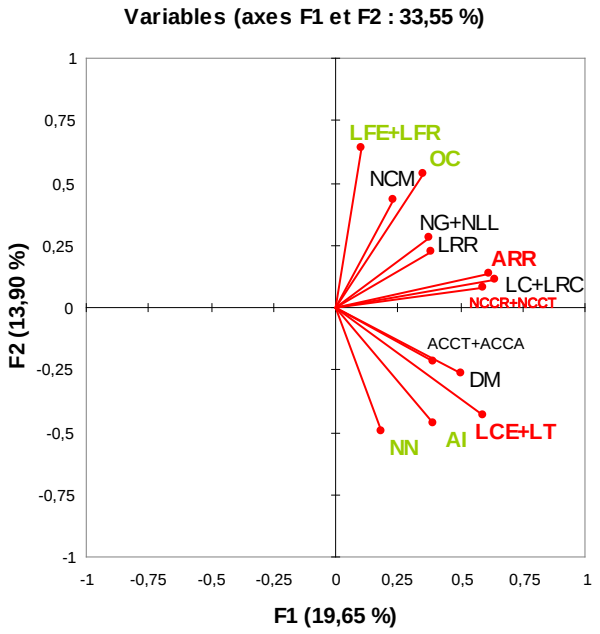
Une *analyse multivariée (ACP)* a été conduite dans un premier temps sur l'ensemble de la communauté lombricienne. Les données d'abondances de 29 taxons prélevés au formol sur les 109 sites RMQS *BioDiv* sont transformées en log (x + 1).

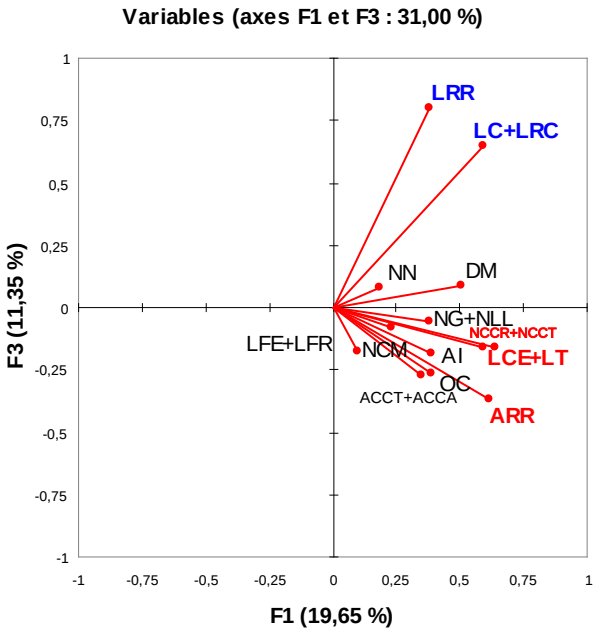
27 % de l'inertie totale de ce tableau est extraite par les trois premiers axes, respectivement 13 % pour l'axe 1, 8 % pour l'axe 2 et 7 % pour l'axe 3.

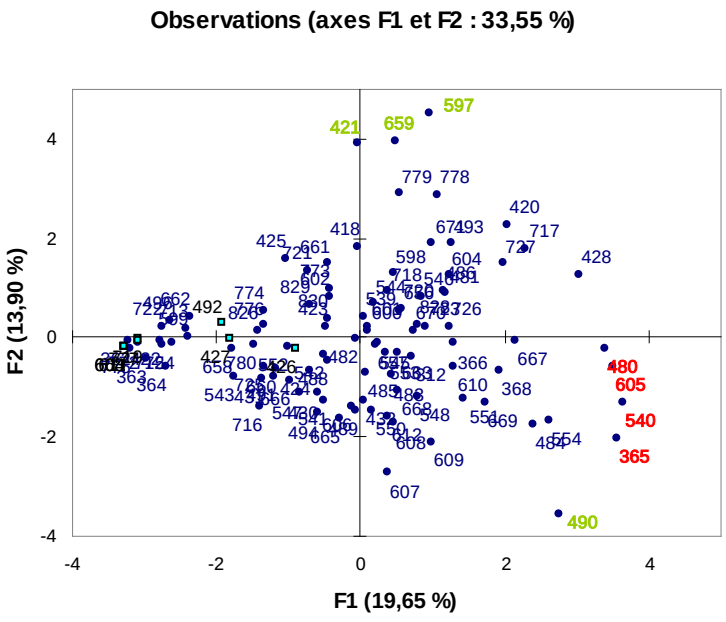
- L'***axe 1*** est "construit" principalement par l'opposition d'espèces « rares » forestières et d'espèces ubiquistes (NCCT et LC). Les sites forestiers (site n° 664, 603, 777, 427, 611, 719 et 492), de par leur faune spécifique, s'opposent aux sites agricoles. Ces milieux forestiers sont particuliers et ressortent très fortement dans cette première ACP.
- Sur l'***axe 2***, LT est opposé à LRR, LCE et NCU. Le site n° 484 s'oppose au site n° 717 (Figure 11).

Cette ACP n'explique que le fait que les communautés des forêts sont très différentes de celles des autres sites.









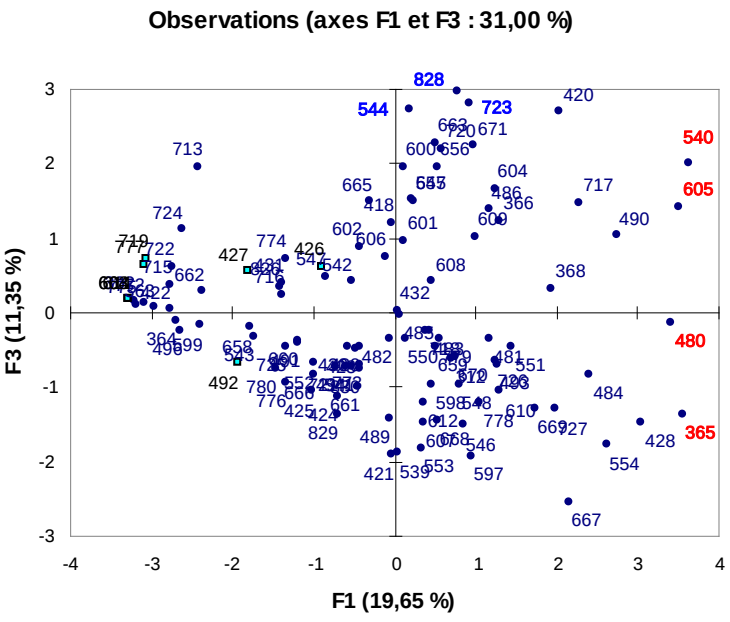


Figure 12 : Plans factoriels de l'ACP avec regroupement de certains taxons
Données Formol

b) Analyse multivariée sur les taxons dominants avec regroupement des taxons

Dans un second temps, le jeu de données a été restreint aux sites agricoles en gardant uniquement les taxons ubiquistes et intermédiaires. Ce résultat est présenté en Annexe IV.

Dans un troisième temps, certains taxons ont été regroupés selon des hypothèses de similarités fonctionnelles (Annexe III). Le tableau étudié comporte alors les abondances (log x+1 transformées) de 13 taxons sur 101 sites. Les taxons regroupés sont :

- *Lumbricus castaneus* (LC) *et rubellus castanoides* (LRC)
- *Lumbricus friendi* (LFR) *et festivus* (LFE)
- *Lumbricus centralis* (LCE) *et terrestris* (LT)
- *Aporrectodea giardi* (NG) *et longa* (NLL)
- *Allolobophora chlorotica chlorotica albinica* (ACCA) *et typica* (ACCT)
- *Nicodrilus caliginosus caliginosus typica (NCCT) et trapezoïdes (NCCR)*

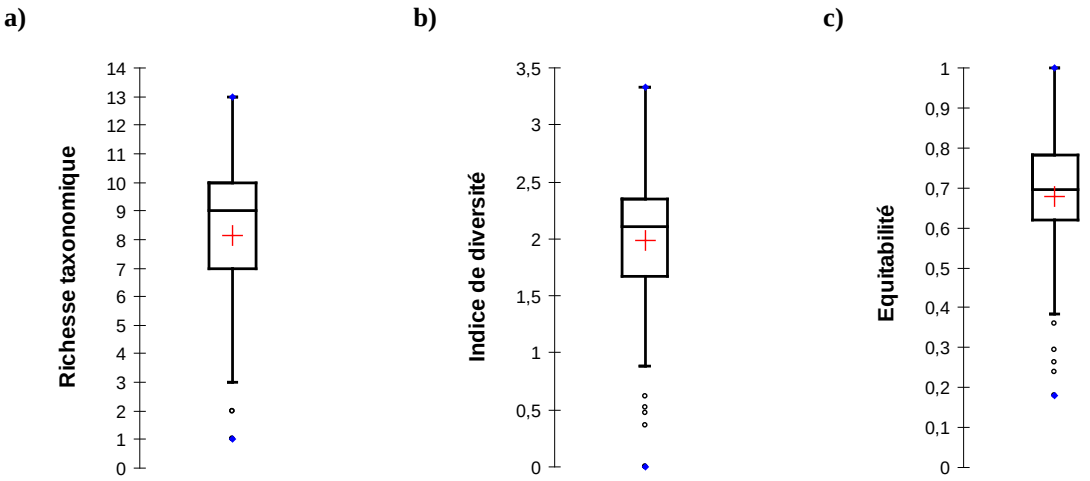
Un pourcentage d'inertie encore plus important est extrait par cette troisième analyse : Ainsi, 44 % de l'inertie totale du tableau est extraite par les trois premiers axes. L'axe 1 explique 20 %, l'axe 2 14 % et l'axe 3 11 % (Figure 12)

- Les deux taxons dominants (ARR et NCCT+NCCR) ainsi que le regroupement LCE+LT contribuent positivement à la construction de l'***axe 1*** et ne sont opposés à aucun taxon. Les sites associés n° 540, 365, 605 et 480 qui contribuent majoritairement à cet axe, sont strictement prairiaux.
- Sur l'***axe 2***, les taxons LFE+LFR et OC sont opposés aux taxons NN et AI. Ce qui correspond en termes de sites, à une opposition entre les sites 421(Mp), 597(AAM) et 659(MAA) au site 490(MAA)[7].
- Les taxons LRR et LC+LRC expliquent l'***axe 3***. Les sites (544, 723 et 828), qui contribuent fortement à cet axe, présentent de forte abondance pour ces taxons.

Pour aller plus loin dans l'interprétation de la structure des communautés lombricienne, cette ACP est complétée par des analyses complémentaires d'étude de structuration spatiale (partie 2.3) et de mise en relation avec les variables explicatives (partie 3.2).

[7] **AA** : Grande culture ; **AA/M** : Culture dans rotation grande culture-prairie ;
M/AA : Prairie dans rotation grande culture-prairie ; **Mp** : Prairie permanente

13.1 : Caractérisation de la biodiversité (FTM)



13.2 : Caractérisation de la biodiversité (F)

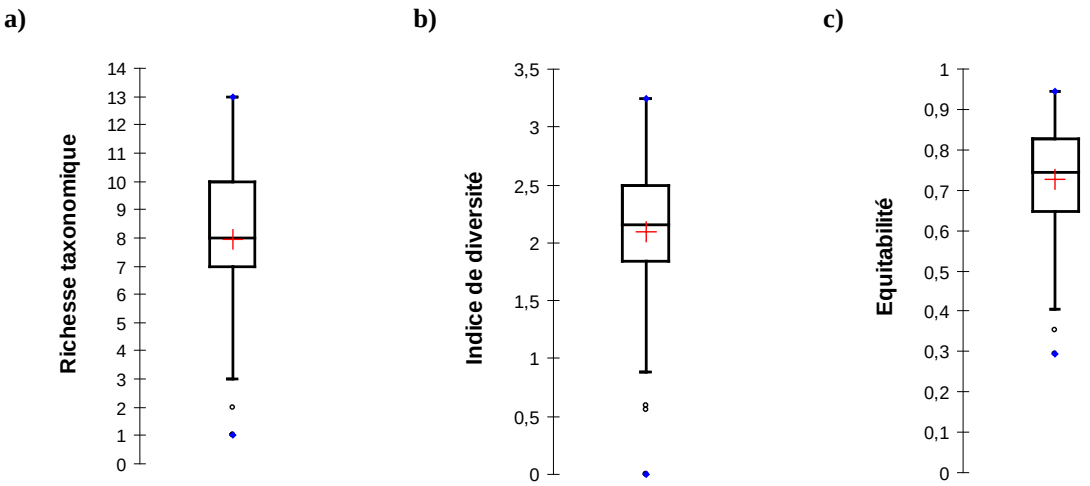


Figure 13 : Boîtes à moustaches des paramètres de caractérisation de la biodiversité
a) richesse taxonomique lombricienne**,**
b) indice de diversité (indice et Shannon)
c) équitabilité

1.4 Caractérisation de la biodiversité

À l'échelle de la Bretagne, la richesse taxonomique lombricienne (γ) est de **29 taxons** observés sur l'ensemble des sites RMQS *BioDiv* Bretagne. La détermination lombricienne a été effectuée à des niveaux infra-spécifiques (sous-espèce et variété). Lorsque ces sous-espèces et variétés sont regroupées, la **richesse spécifique est de 23**. Ce résultat est intéressant, car, avant cette étude, 21 espèces lombriciennes étaient connues en Bretagne (Binet, 1993 ; Cluzeau, 1992 ; Pérès, 2003). Trois nouvelles espèces (cf 1.3.2.1) ont été recensées grâce au RMQS *BioDiv* : *Dendrobaena pygmea cognettii* (DPC), *Lumbricus festivus* (LFE), *Allolobophora minima* (AM). En revanche, l'espèce *Eisenia fetida* (Savigny, 1826) était retrouvée dans des études précédentes (Cluzeau, 1992) mais cette espèce fortement, lié aux amas de déchets organiques agricoles et domestiques, n'a pas été observée dans ce programme. Ce qui porte à 24 le nombre d'espèces lombriciennes présentes en Bretagne.

Sur les sites RMQS *BioDiv*, 8 taxons sont présents en moyenne, le nombre minimum de taxons observés sur un même site étant de 1 et le nombre maximum de 13. L'indice de diversité de Shannon est en moyenne de 1,98 ± 0,6 avec des valeurs variant de 0 à 3,32. Les peuplements présentent une équitabilité assez élevée avec une moyenne de 0,7 (Figure 14).

Les informations « formol + tri manuel » et « formol uniquement » présentent des différences relativement minimes.

2. Approche spatiale

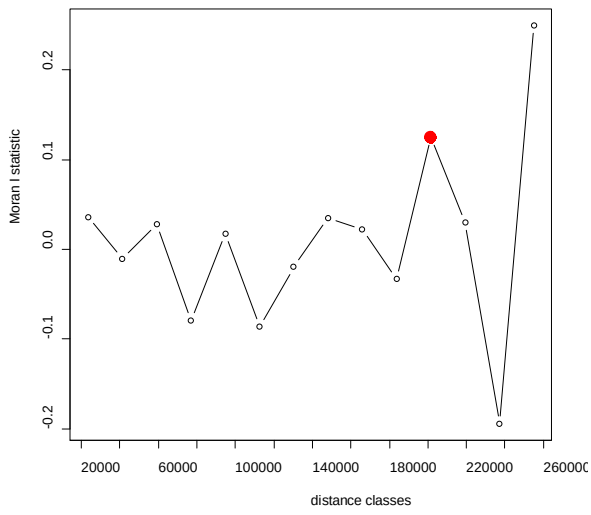
2.1 Structuration spatiale des paramètres lombriciens

Les paramètres lombriciens rassemblent des paramètres globaux (abondance et biomasse lombricienne), des paramètres fonctionnels (abondance et biomasse des catégories écologiques) et des paramètres de diversité (richesse taxonomique, indice de diversité et équitabilité). Ces données sont représentées spatialement sous forme de cartes (Figures 16, 17 et 18).

Les données *box-cox* transformées (Annexe V) sont utilisées pour réaliser les analyses de *géostatistiques (semi-variogramme)*, qui nécessitent une distribution normale des données. Le site insulaire d'Ouessant (n° 418) ne participe pas à ces analyses.

Pour une très grande majorité des paramètres lombriciens, aucune structuration spatiale à l'échelle régionale ne peut être mise en évidence (Tableau 3 et Annexe VI). Seules l'abondance lombricienne et l'abondance des anéciques présentent un corrélogramme significatif à forte distance (Figures 14 et 15). Ce résultat, malgré sa significativité, est toutefois à nuancer car il est fondé sur un faible nombre de couples de points existants à une distance de 200 kilomètres. Ce biais est lié à la forme géométrique de la Bretagne.

a)



b)

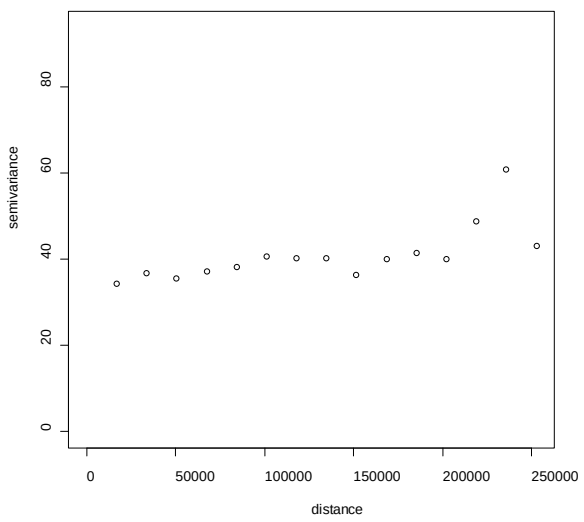
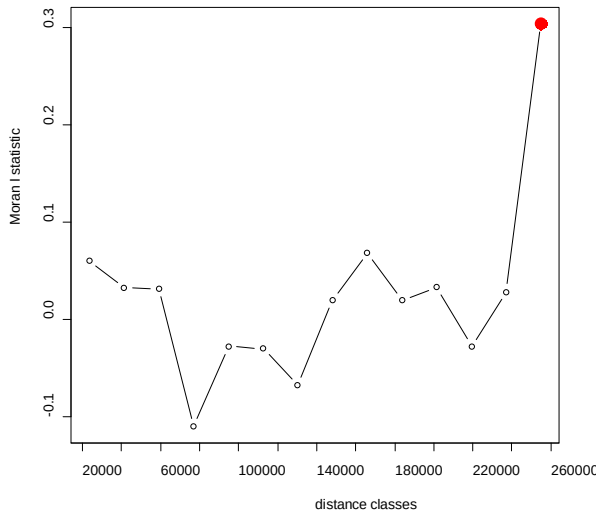


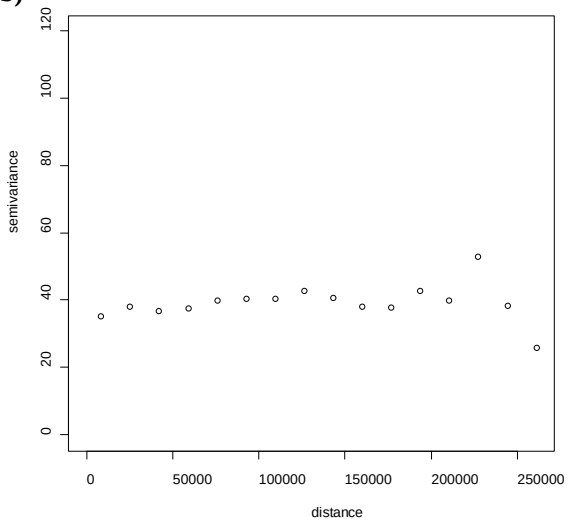
Tableau 3 : Synthèse des résultats d'analyses géostatistiques pour les paramètres lombriciens

Paramètres lombriciens	Indice de Moran	p.value	P value de permutation	Significativité du corrélogramme	Significativité du variogramme
Paramètres globaux					
Abondance lombricienne (FTM)	**0,1177**	**0,0246**	**0,0280**	**S**	ns
Abondance lombricienne (F)	0,924	0,0576	0,0640	ns	ns
Biomasse lombricienne (FTM)	0,061	0,1381	0,1421	ns	ns
Biomasse lombricienne (F)	0,773	0,0899	0,1051	ns	ns
Catégories écologiques (FTM)					
Abondance des épigés	- 0,0304	0,6147	0,6136	ns	ns
Abondance des anéciques	**0,117**	**0,0319**	**0,0250**	**S**	ns
Abondance des endogés	- 0,012	0,5115	0,4984	ns	ns
Biomasse des épigés	- 0,0272	0,5967	0,5995	ns	ns
Biomasse des anéciques	0,0744	0,0995	0,5995	ns	ns
Biomasse des endogés	0,0508	0,1811	0,1851	ns	ns
Paramètres de diversité (FTM)					
Richesse taxonomique					
Indice de diversité	- 0,0356	0,6558	0,6356	ns	ns
Equitabilité	- 0,0497	0,7315	0,7137	ns	ns

a)



b)



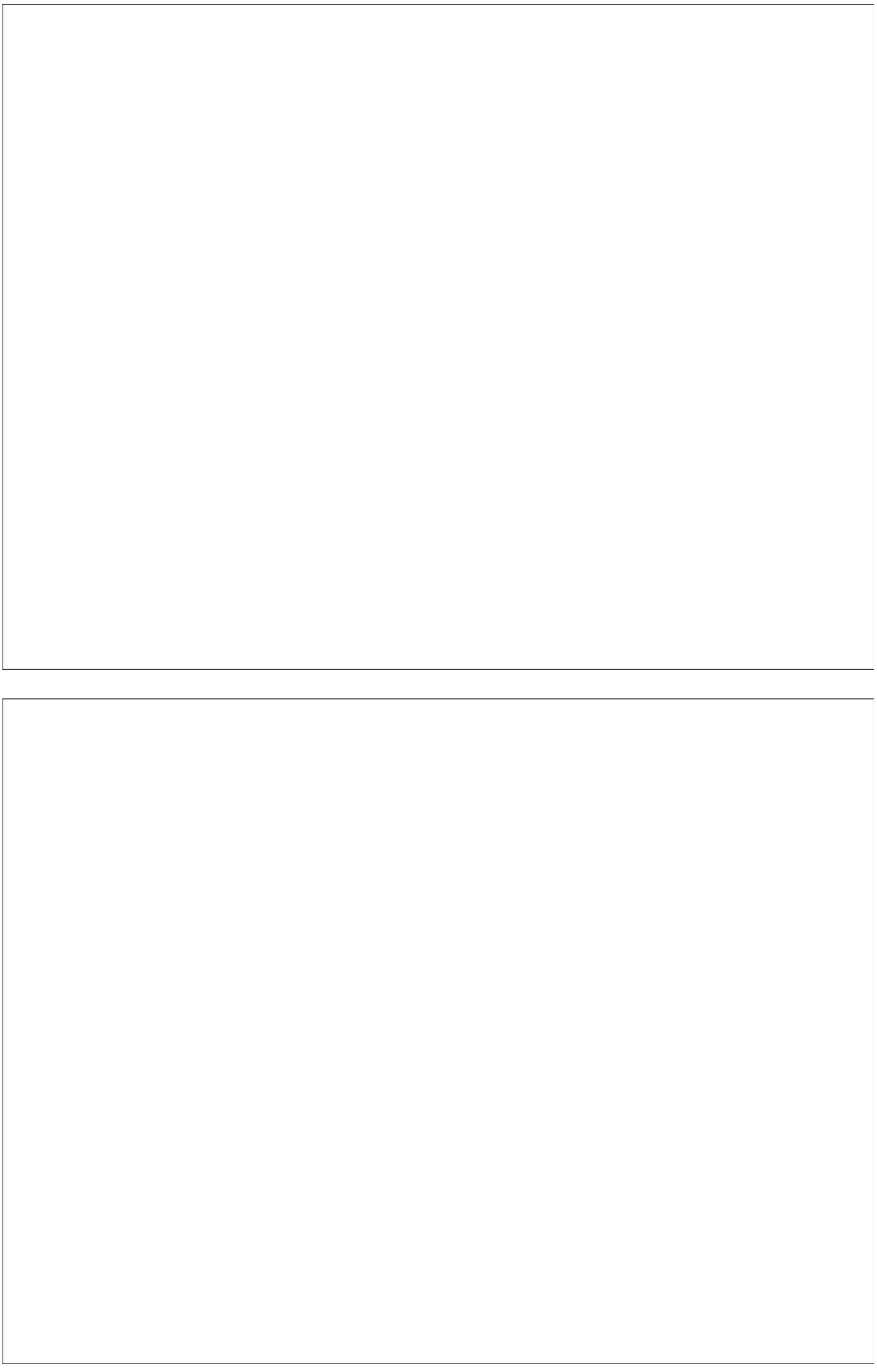
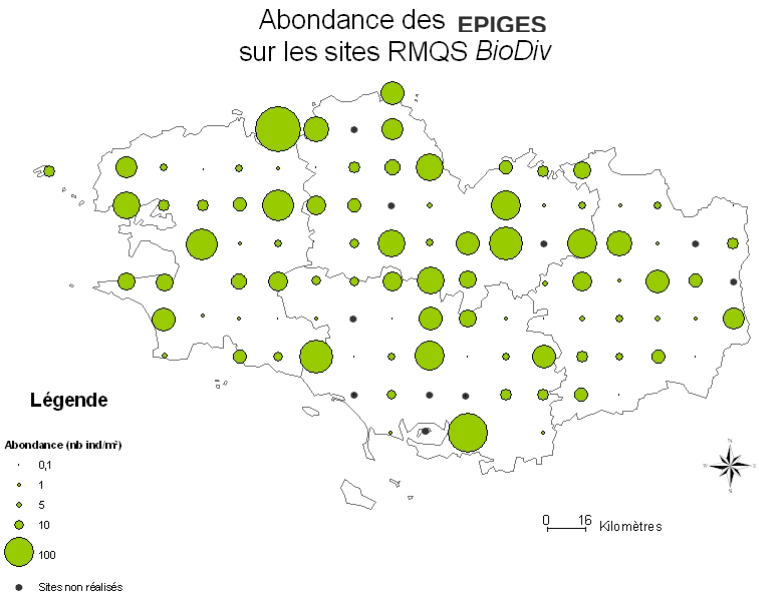
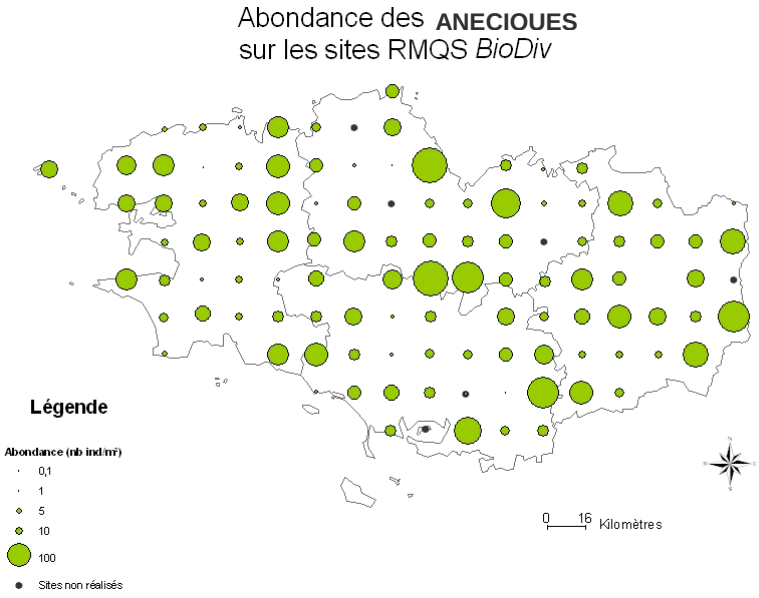


Figure 16 : Cartes de l'abondance (a) et de la biomasse (b) lombricienne sur les sites RMQS *BioDiv*
Données FTM
La taille du cercle est proportionnelle à la valeur observée sur le site

a)



b)



c)

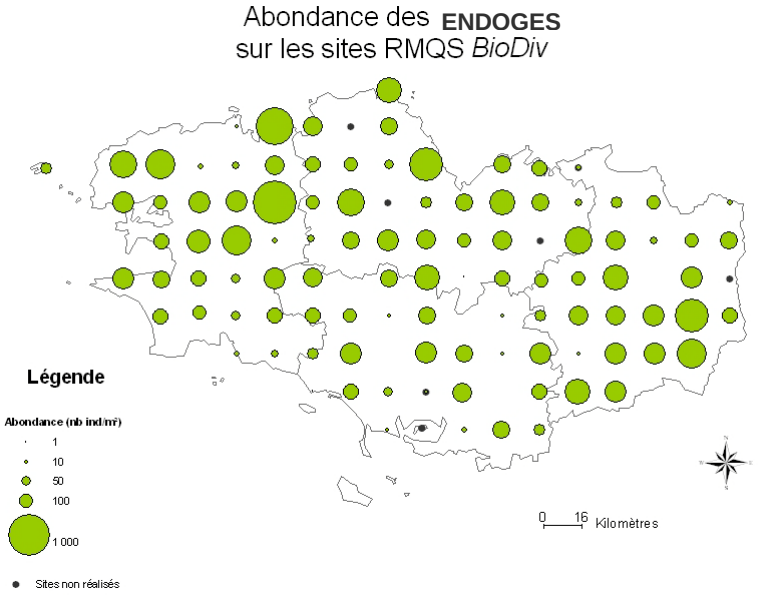


Figure 17 : Cartes de l'abondance des catégories écologiques sur les sites RMQS *BioDiv*
a) épigés, **b)** anéciques et **c)** endogés (Données FTM)
La taille du cercle est proportionnelle aux abondances observées sur les sites

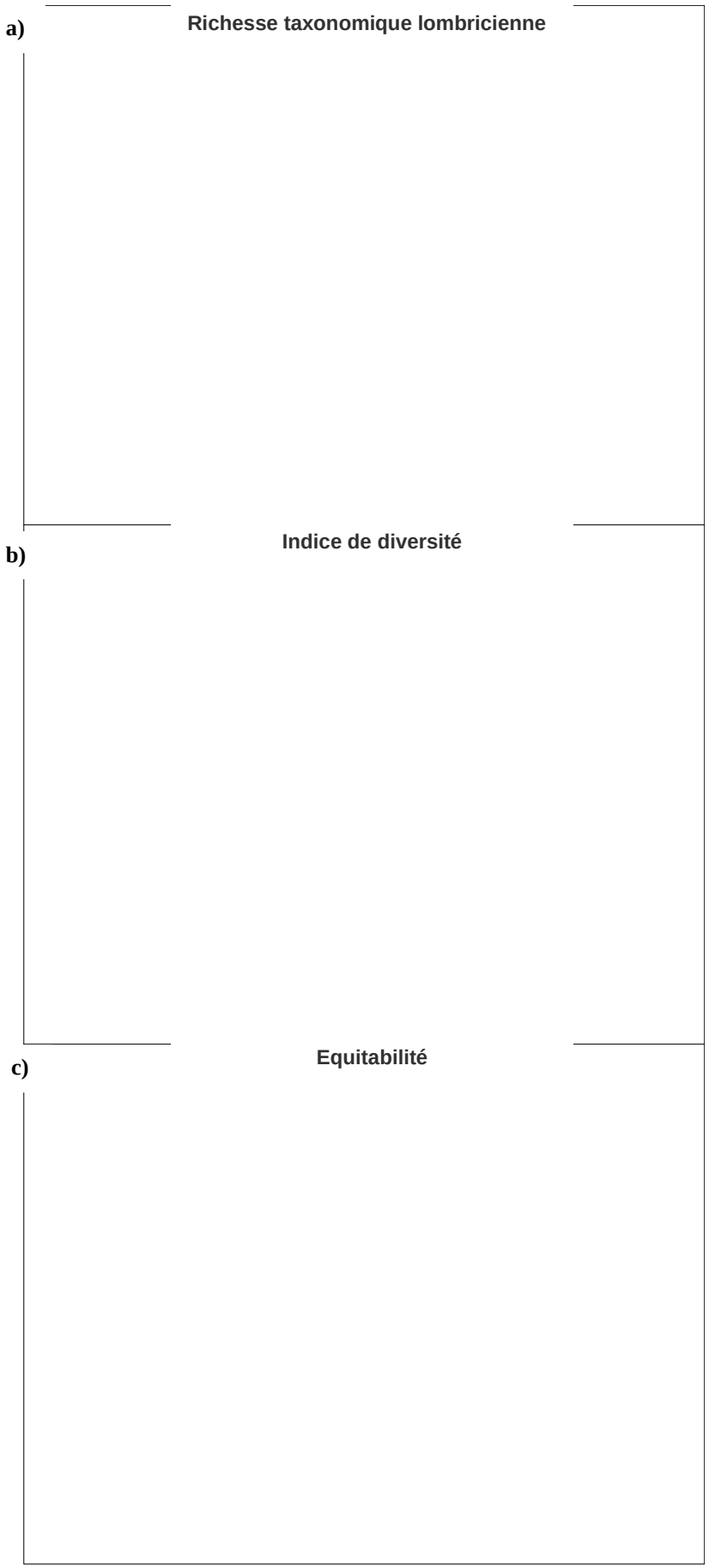


Figure 18 : Cartes des paramètres de diversité lombricienne sur les sites RMQS *BioDiv*
a) Richesse taxonomique lombricienne, **b)** Indice de diversité et **c)** Equitabilité (Données FTM)
Représentation par quartile.

2.2 Structuration spatiale des taxons lombriciens

Les abondances des principaux taxons lombriciens sont représentées spatialement sous forme de cartes (Annexe VII).

La présence d'autocorrélation spatiale des taxons lombriciens a été testée par un test *Join-Count*[8]. Pour ce test, l'information sur les taxons est codée en présence/absence.

Cinq taxons présentent des résultats significatifs d'autocorrélation spatiale. Il s'agit de *Nicodrilus nocturnus* (NN : z = 5,6), *Allolobophora icterica* (AI : z = 3,6), *Lumbricus terrestris* (LT : z = 3,6), *Lumbricus rubellus castanoïdes* (LRC : z = 2,4), *Nicodrilus giardi* (NG : z = 2,1) (Figure 19).

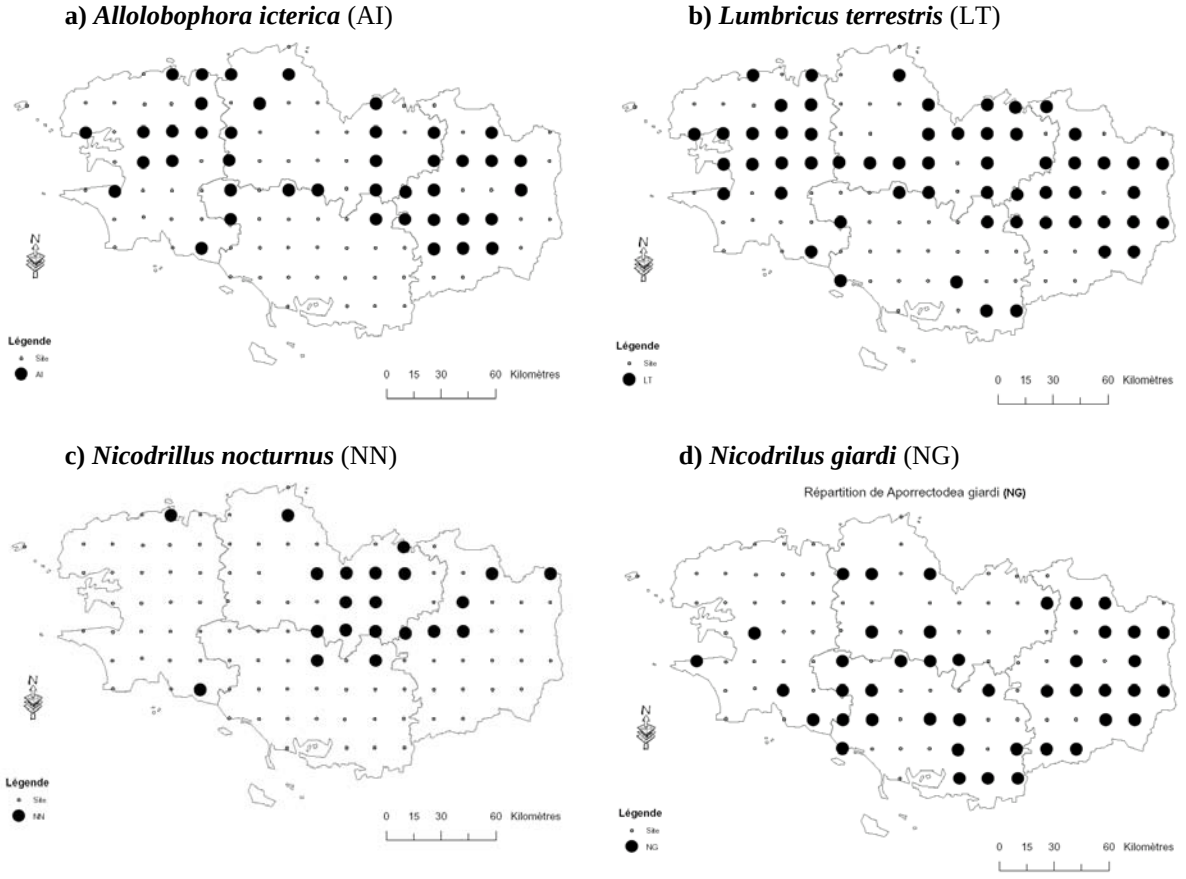


Figure 19 : Répartition de taxons lombriciens présentant une structuration spatiale

[8] 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 agrégats ou en « patches » : on a beaucoup de chances 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.

2.3 Etude spatiale de la structure des communautés lombriciennes

Pour l'analyse spatiale de la structure des communautés lombriciennes, une *ordination (ACP) sous contrainte spatiale* (Wartenberg, 1985) a été réalisée sur les abondances de 13 taxons lombriciens (Voir 1.3.3). Le principe de cette ACP particulière réside dans le fait qu'elle maximise l'autocorrélation spatiale mesurée par *l'Indice de Moran*. Une *analyse géostatistique* (semi-variogramme et krigeage) est par la suite effectuée sur les coordonnées principales de l'ACP.

L'axe 1 de l'ACP présente une structuration spatiale qui a été krigée (Figure 20). Des corrélations (*Spearman*) significatives ont été mises en évidence avec les variables potassium total ($R = 0,536$; $p < 0,0001$) et thallium total ($R = 0,467$; $p < 0,0001$) (Figure 21).

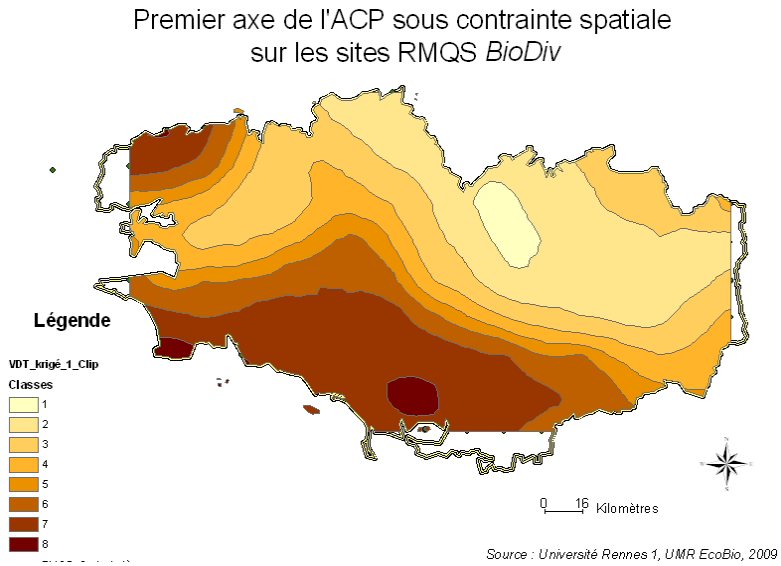


Figure 20 : Structuration spatiale du premier axe factoriel de l'ordination sous contrainte spatiale
Abondance de 13 taxons lombriciens avec regroupement (Données FTM)

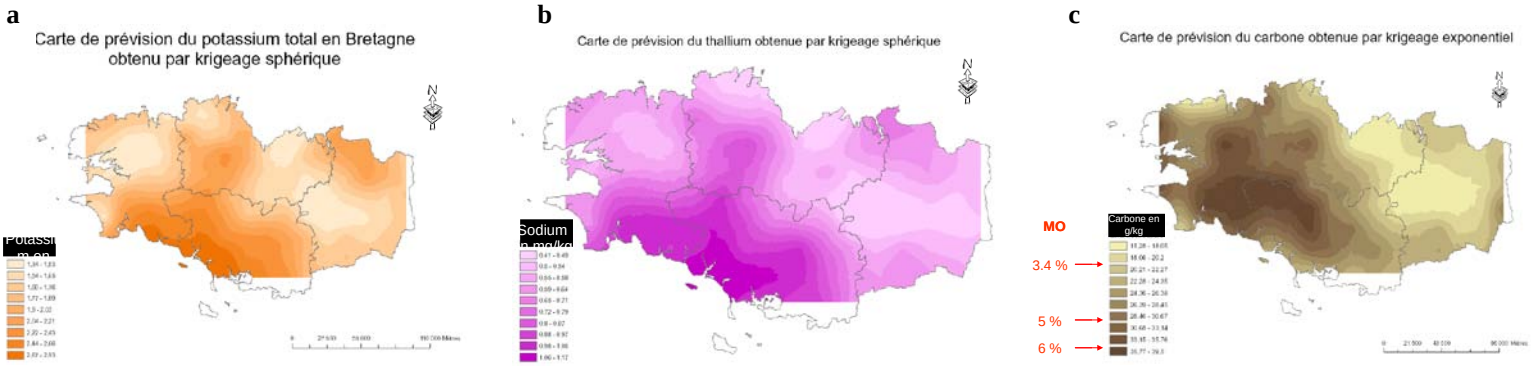


Figure 21 : Structuration spatiale des paramètres physico-chimiques potassium total (a), thallium total (b) et carbone (c)

3. Lombriciens et variables explicatives

3.1 Paramètres lombriciens en lien avec les variables explicatives

Les paramètres lombriciens rassemblent des paramètres globaux (abondance et biomasse lombricienne), des paramètres fonctionnels (abondance et biomasse des catégories écologiques) et des paramètres de diversité (richesse taxonomique, indice de diversité et équitabilité). Ces données sont mises en relation avec les variables explicatives, physico-chimie des sols, occupation des sols, pratiques agricoles, pédologiques, année de prélèvement et humidité des sols.

Des tests de *corrélation de Spearman* sont réalisés sur les variables quantitatives. Et des tests non-paramètriques (*Kruskal-Wallis et Mann Whitney*) sont réalisés sur les variables qualitatives.

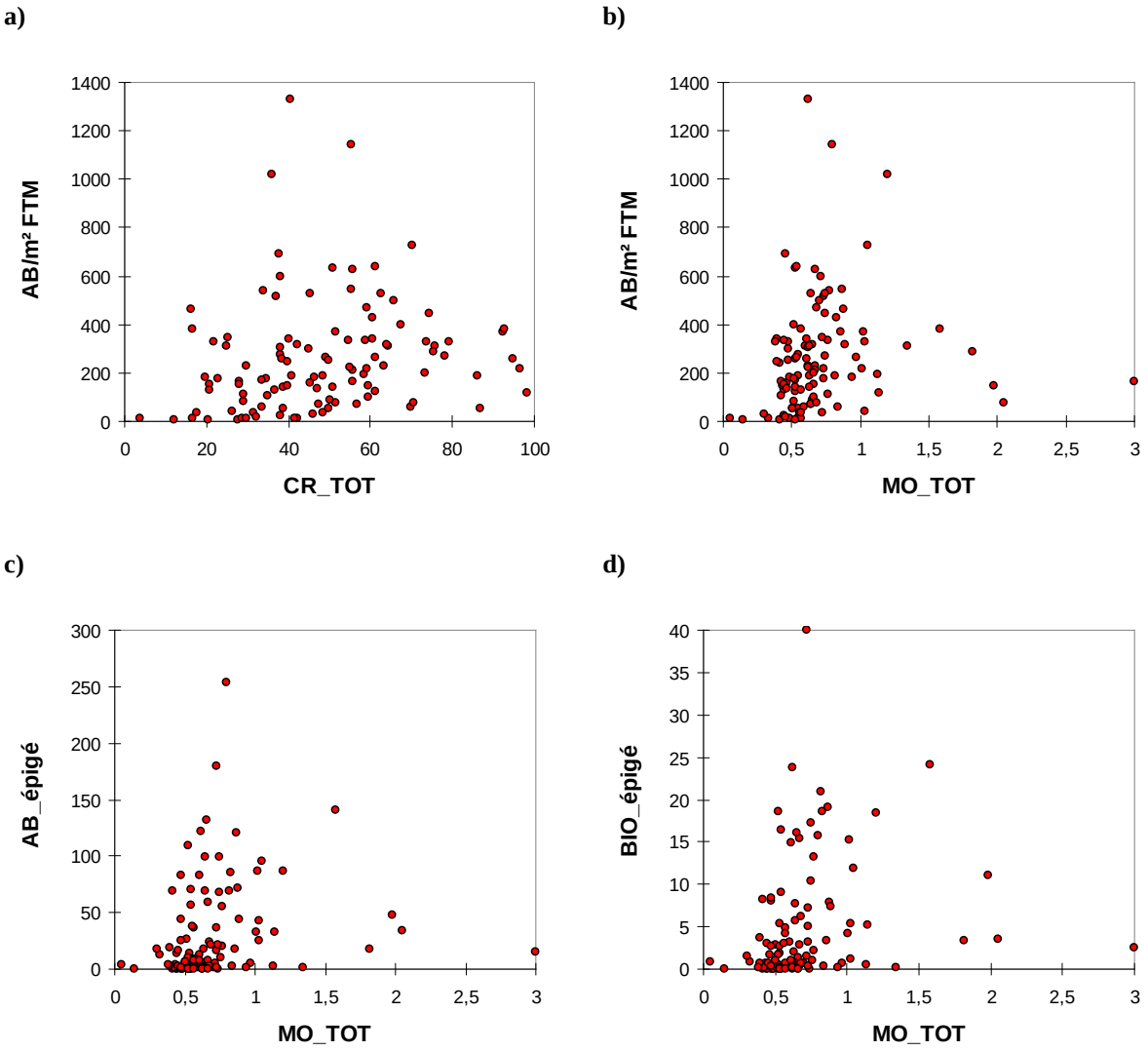


Figure 22 : Illustration des corrélations significatives entre les paramètres lombriciens et paramètres physico-chimiques

a) abondance totale lombricienne et chrome total ;
b) abondance totale lombricienne et mobyldène total ;
c) abondance des épigés et mobyldène total ;
d) biomasse des épigés et mobyldène total.

3.1.1 Paramètres lombriciens et paramètres physico-chimiques

Les paramètres lombriciens 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*.

L'abondance totale des lombriciens présente des *corrélations de Spearman* significatives (alpha = 0,001) avec le chrome et le molybdène total.

Les abondances et biomasses des épigés présentent quant à elles une corrélation significative uniquement avec le molybdène total. Les autres paramètres lombriciens ne présentent pas de corrélations significatives avec des paramètres physico-chimiques (Tableau 4 et Figure 22).

Tableau 4 : Corrélations significatives entre paramètres lombriciens et paramètres physico-chimiques

Abondance lombricienne

Variables	Rs	p
CR_TOT	0,320	0,001
MO_TOT	0,342	0,000

Abondance des épigés

Variables	Rs	p
MO_TOT	0,396	< 0,0001

Biomasse des épigés

Variables	Rs	p
MO_TOT	0,393	< 0,0001

Les valeurs sont significativement différentes de 0 à un niveau de signification alpha=0,001
CR_TOT : Chrome total ; MO_TOT : Molybdène total

3.1.2 Paramètres lombriciens et occupation des sols

3.1.2.1 Occupation du sol (premier niveau de partition = 3 classes)

Les sites RMQS *BioDiv* ont été classés dans un premier temps selon l'occupation du sol (culture, prairie, forêt) à laquelle ils appartiennent.

Des tests de *Kruskal-Wallis* sont effectués pour chaque paramètre en fonction des 3 occupations de sols. 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. Notons que ces tests sont réalisés sur 107 sites car la dune (713) et la friche (551) ne sont pas intégrées dans ces analyses.

Tous les tests de *Kruskal-Wallis* sont significatifs sauf pour l'équitabilité (Tableau 5). Certains paramètres biologiques discriminent parfaitement les trois systèmes (abondance et biomasse lombricienne totale, abondance et biomasse des anéciques, biomasse des endogés).

Tableau 5 : Synthèse des tests de Kruskal-Wallis avec la nature de l'occupation des sols – 1er niveau

Paramètres lombriciens	Valeur de H	p.value	significativité	C (N=52)	P (N=47)	F (N=8)
Paramètres globaux						
Abondance lombricienne	**19,94**	**< 0,0001**	**s**	**b**	**c**	**a**
Biomasse lombricienne	**38,42**	**< 0,0001**	**s**	**b**	**c**	**a**
Catégories écologiques						
Abondance des épigés	**12,54**	**0,002**	**s**	**a**	**b**	**b**
Abondance des anéciques	**31,05**	**< 0,0001**	**s**	**b**	**c**	**a**
Abondance des endogés	**15,44**	**0,000**	**s**	**b**	**b**	**a**
Biomasse des épigés	**12,30**	**0,002**	**s**	**a**	**b**	**b**
Biomasse des anéciques	**32,99**	**< 0,0001**	**s**	**b**	**c**	**a**
Biomasse des endogés	**24,12**	**< 0,0001**	**s**	**b**	**c**	**a**
Paramètre de diversité						
Richesse taxonomique	**29,00**	**< 0,0001**	**s**	**a**	**b**	**a**
Indice de diversité	**15,69**	**0,000**	**s**	**a**	**b**	**a**
Equitabilité	1,53	0,464	ns	a	a	a

Culture (N = 52) ; Prairie (N= 47) ; Forêt (N = 8)
NB : N = 107 car les sites dune (site n° 713) et friche (site n° 551) ont été exclus des analyses

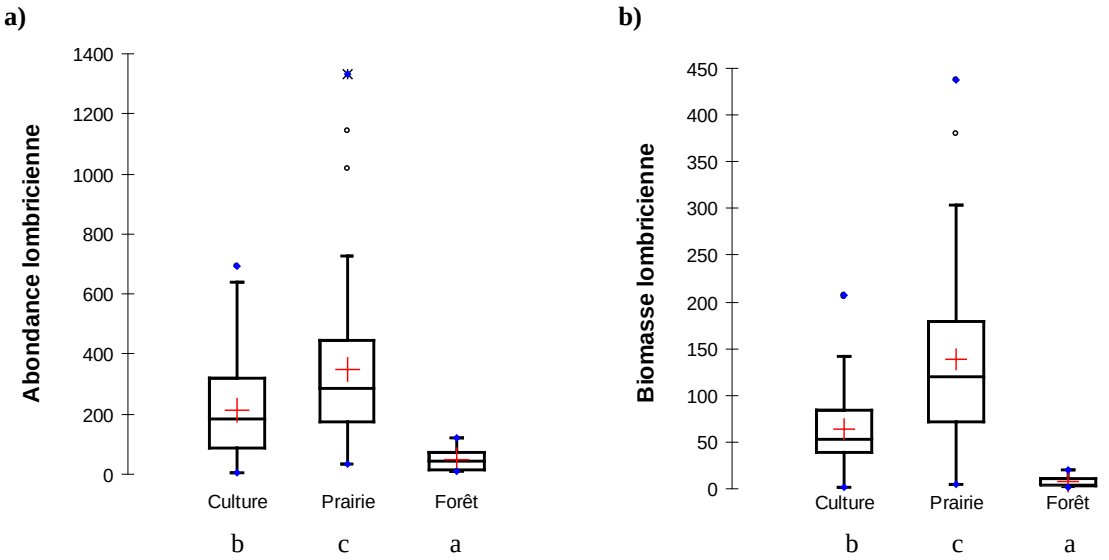


Figure 23 : Abondance et biomasse lombricienne par occupation du sol - 1er niveau
Ces données sont exprimées en ind/m² pour l'abondance (**a**) et en g/m² pour la biomasse (**b**)
Culture (N = 52) ; Prairie (N= 47) ; Forêt (N = 8)

L'abondance et la biomasse lombriciennes totales discriminent significativement les trois systèmes avec des valeurs plus importantes sous prairie, intermédiaires sous culture et faibles sous forêt. En moyenne, 350 ind/m² sont retrouvés en prairie, 215 en culture et 50 en forêt. La biomasse lombricienne est caractérisée par 138 g/m² en prairie, 63 en culture et 8 en forêt (Figure 23). Comme attendu, l'écosystème prairial en zone tempérée est le milieu qui permet le développement optimum des communautés lombriciennes (Lee, 1985 ; Cluzeau, 1992 ; Binet, 1993).

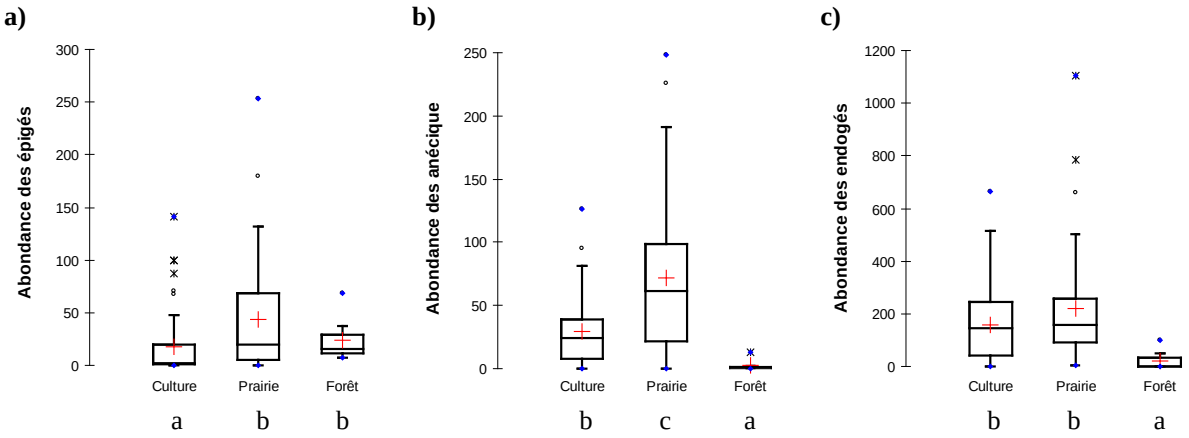


Figure 24 : Abondance absolue des catégories écologiques par occupation du sol - 1er niveau
Abondance des épigés (a), des anéciques (b) et des endogés(c)
Ces données sont exprimées en ind/m²
Culture (N = 52) ; Prairie (N= 47) ; Forêt (N = 8)

L'abondance des épigés est significativement plus faible en systèmes cultivés (18 ind/m²); par rapport aux systèmes prairiaux (43 ind/m²) et forestiers (24 ind/m²). L'abondance et la biomasse des anéciques discriminent significativement les trois systèmes avec des valeurs plus importantes sous prairie (72 ind/m²), intermédiaires sous culture (30 ind/m²) et faible en forêt (2 ind/m²). L'abondance des endogés est, quant à elle, significativement plus faible sous forêt (22 ind/m²) par rapport aux systèmes sous culture (160 ind/m²) et sous prairie (219 ind/m²)) (Figure 24).

En abondance relative, les endogés dominent très largement les peuplements en culture (74 %), leurs proportions diminuent en prairie (63 %) alors qu'ils ne sont plus majoritaires en forêt avec 45 %. Les épigés présentent des résultats inverses par rapport aux endogés. Ils ne représentent que 8 % en culture, 12 % en prairie mais sont majoritaires en forêt car ils constituent 47 % des peuplements. Les anéciques sont présents à 21 % en prairie, 14 % en culture et seulement 5 % en forêt. (Figure 27).

En système agricole (cultures et prairies), l'abondance lombricienne est principalement composée d'endogés, puis d'anéciques et enfin quelques épigés (Figure 25). Le triangle des catégories écologiques, qui représente chaque site en fonction des proportions des catégories (Figure 27), met en évidence que les sites sous culture et sous prairie se confondent.

En système forestier, les peuplements sont composés uniquement d'épigés et d'endogés présents en proportions quasiment égales, respectivement 24 et 22 ind/m² (Figure 25). Dans le triangle des catégories écologiques (Figure 27), les sites forestiers se positionnent plutôt à droite dans le triangle (ce qui signifie une proportion importante d'épigés), mais quelques sites se mêlent avec les sites cultivés et prairiaux.

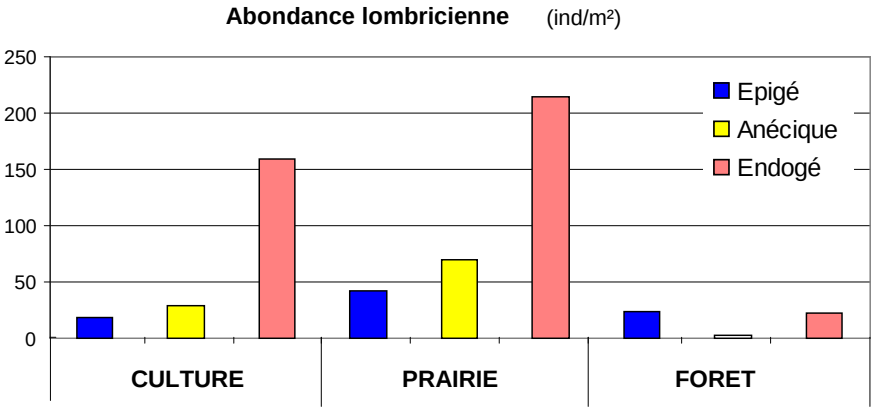


Figure 25 : Abondance absolue des catégories écologiques pour les 3 occupations du sol - 1er niveau
Culture (N = 52) ; Prairie (N= 47) ; Forêt (N = 8) ; Données FTM

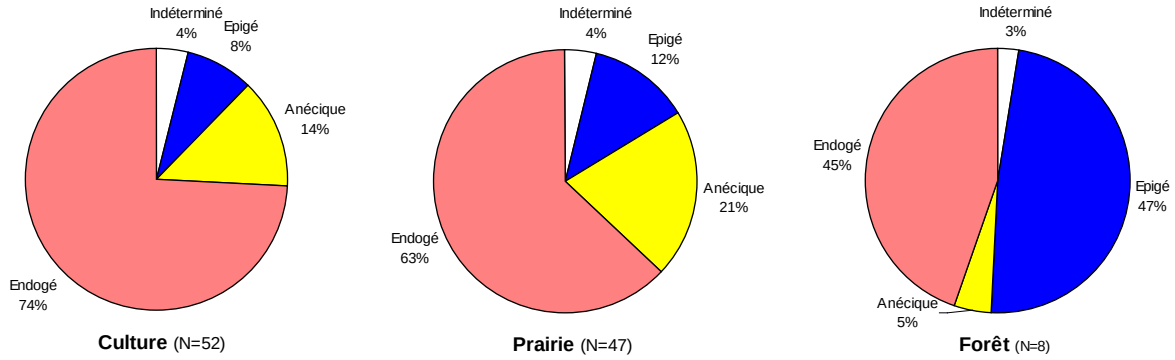


Figure 26 : Abondance relative des catégories écologiques par occupation du sol - 1er niveau
Culture (N = 52) ; Prairie (N= 47) ; Forêt (N = 8) ; Données FTM

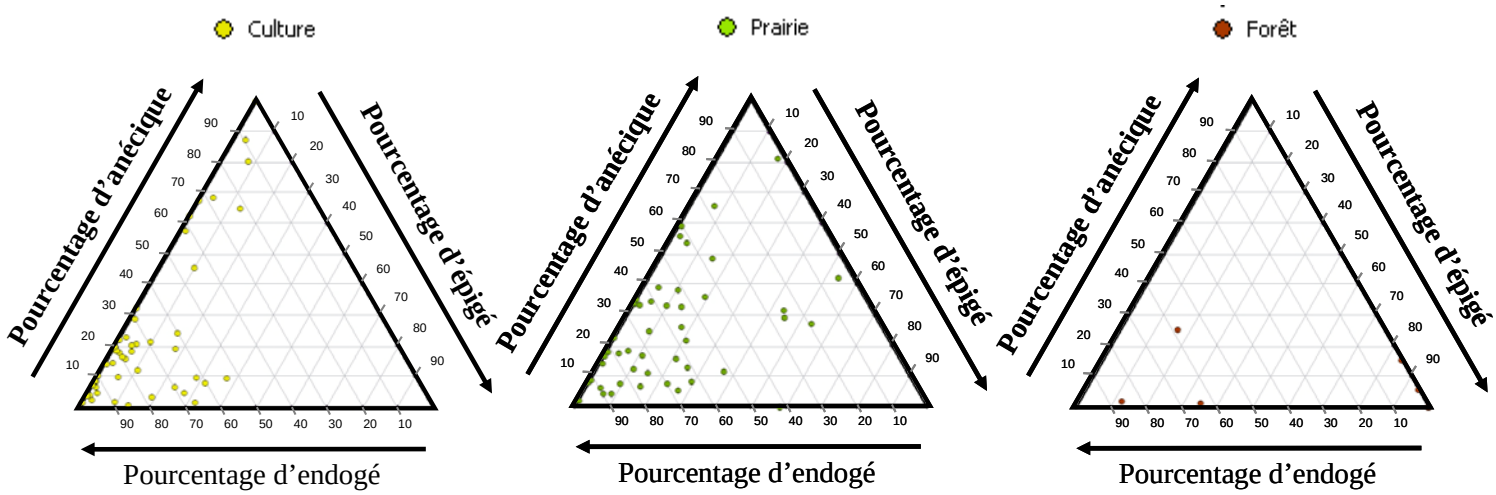


Figure 27 : Répartition des 109 sites RMQS *BioDiv* dans le triangle des catégories écologiques par occupation du sol – 1er niveau
La position de chaque site dans le triangle dépend de la proportion en abondance des catégories écologiques
Inspiré du *Simplex design proportions* (Sheehan, 2007)
Culture (N = 52) ; Prairie (N= 47) ; Forêt (N = 8) ; Données FTM

La richesse taxonomique et l'indice de diversité sont significativement plus élevés en système prairial qu'en systèmes cultivés et forestiers. La richesse taxonomique moyenne sous prairie est de 9,6 alors qu'elle n'est que de 7,4 sous culture et 5 sous forêt.

De même, l'indice de diversité est de 2,6 sous prairie, 1,8 sous culture et 1,4 sous forêt. Bien qu'elle soit calculée à partir de la richesse taxonomique et de l'indice de diversité, l'équitabilité des peuplements ne présente pas de différences significatives entre les trois systèmes. Une légère tendance similaire aux deux autres paramètres de diversité est malgré tout observée (Figure 28).

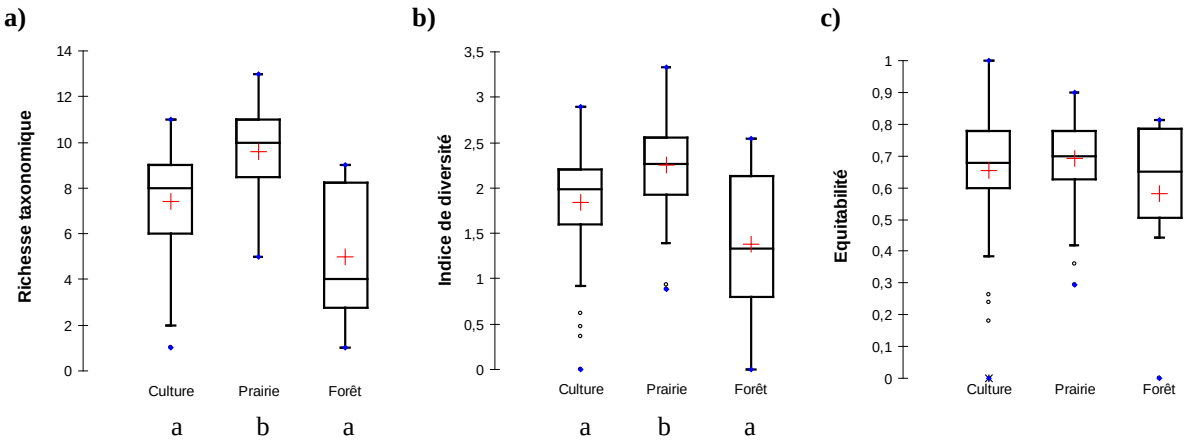


Figure 28 : Paramètres de diversité par occupation du sol – 1er niveau
a) Richesse taxonomique**, b)** Indice de diversité**, c)** Equitabilité
Culture (N = 52) ; Prairie (N= 47) ; Forêt (N = 8) ; Données FTM

3.1.2.2 Occupation du sol (deuxième niveau de partition = 5 classes)

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[9]. 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 que précédemment sont appliqués (test de *Kruskal-Wallis* et correction de *Bonferroni*).

Comme précédemment, les résultats sont significatifs pour la grande majorité des paramètres lombriciens. Seule l'équitabilité n'est pas affectée par l'occupation des sols (Tableau 6). Cependant, il est beaucoup plus difficile de discriminer les cinq modalités avec cette nouvelle classification.

L'abondance lombricienne est plus élevée en système prairial (Mp et M/AA) et en grande culture (AA) (Figure 29.a). La biomasse lombricienne présente un gradient distinguant les forêts (F), des grandes cultures (AA), des systèmes prairiaux (Mp et M/AA) (Figure 29.b).

C'est l'abondance des anéciques qui discrimine le mieux les milieux avec une distinction entre les forêts, les grandes cultures (AA) et les prairies (Mp) ; Les systèmes de rotation « grandes cultures-prairies » étant intermédiaires (AA/M et M/AA) (Figure 30). En effet, la mise en culture d'une prairie permanente, soit vers une rotation, soit vers une rotation sans prairie, entraîne une diminution des abondances et des biomasses lombriciennes (Binet, 1992 ; Pérès, 2003).
En abondance relative, les endogés dominent les peuplements surtout en rotation « grandes cultures-prairies » (80% en AA/M et 66% en M/AA) et en culture (73%). Les épigés présentent des abondances relatives inférieures à 10% en systèmes cultivés (9% en AA et 5% en AA/M) et supérieures à 10% en systèmes prairiaux

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

(12% pour M/AA et 13% pour Mp). L'abondance relative des anéciques est de l'ordre de 14% en systèmes cultivés (AA et AA/M) contre 19 et 22 % en systèmes prairiaux, respectivement pour M/AA et Mp (Figure 31).
Les sites RMQS *BioDiv* se confondent, malgré des différences d'occupation du sol, dans le triangle des catégories écologiques (Figure 33).

La richesse taxonomique est plus élevée en prairie permanente et plus faible sous forêt. La diversité est également plus élevée en prairie permanente mais plus faible en systèmes forestiers et cultivés (Figure 34).

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

Paramètres lombriciens	Valeur de H	p.value	significativité	AA (N=42)	AA/M (N=11)	M/AA (N=23)	Mp (N=23)	F (N=8)
Paramètres globaux								
Abondance lombricienne	**20,62**	**0,000**	**s**	**b**	**a,b**	**b**	**b**	**a**
Biomasse lombricienne	**39,62**	**< 0,0001**	**s**	**b**	**a,b**	**c**	**c**	**a**
Catégories écologiques								
Abondance des épigés	**14,49**	**0,006**	**s**	**a**	**a**	**a,b**	**b**	**a,b**
Abondance des anéciques	**33,47**	**<0,0001**	**s**	**b**	**a,b**	**b,c**	**c**	**a**
Abondance des endogés	**15,57**	**0,002**	**s**	**b**	**a,b**	**b**	**b**	**a**
Biomasse des épigés	**13,54**	**0,009**	**s**	**a**	**a**	**a,b**	**b**	**a,b**
Biomasse des anéciques	**34,10**	**< 0,0001**	**s**	**b**	**a,b**	**b**	**b**	**a**
Biomasse des endogés	**24,43**	**< 0,0001**	**s**	**b**	**b**	**b**	**b**	**a**
Paramètres de diversité								
Richesse taxonomique	**28,80**	**< 0,0001**	**s**	**a,b**	**a,b**	**b,c**	**c**	**a**
Indice de diversité	**21,04**	**0,000**	**s**	**a**	**a**	**a,b**	**b**	**a**
Equitabilité	6,10	0,192	ns	a	a	a	a	a

Données FTM
NB : N = 107 car les sites dune (site n° 713) et friche (site n° 551) sont exclues des analyses

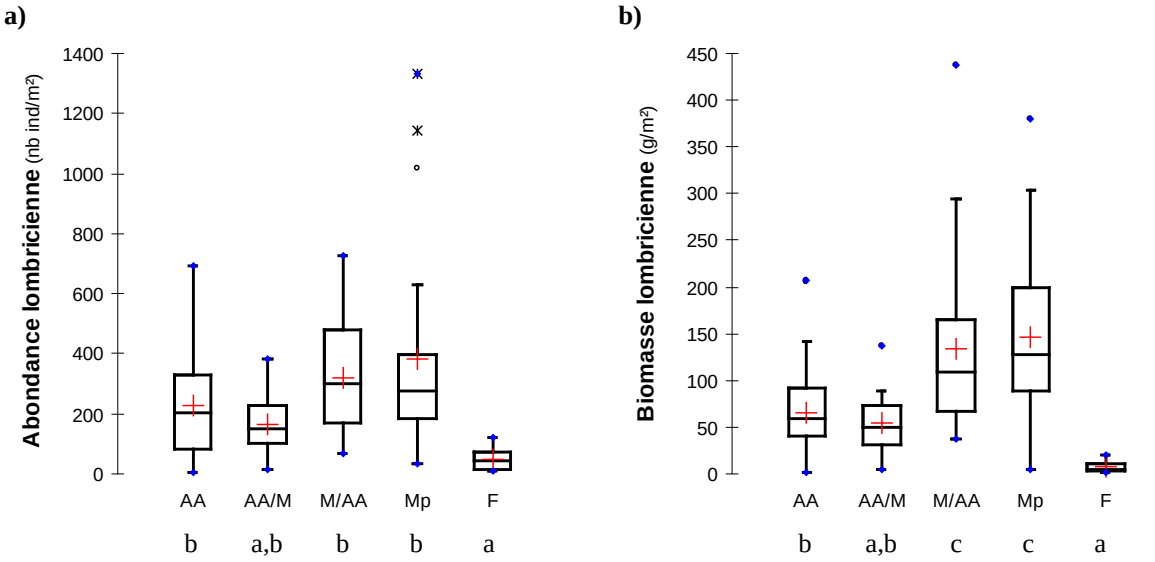


Figure 29 : Abondance et biomasse lombricienne par occupation du sol (avec les forêts)
AA : Grande culture (N = 42) ; **AA/M** : Culture dans rotation grande culture-prairie (N = 11) ; **M/AA** : Prairie dans rotation grande culture-prairie (N = 23) ; **Mp** : Prairie permanente (N = 23) ; **F** : Forêt (N=8)

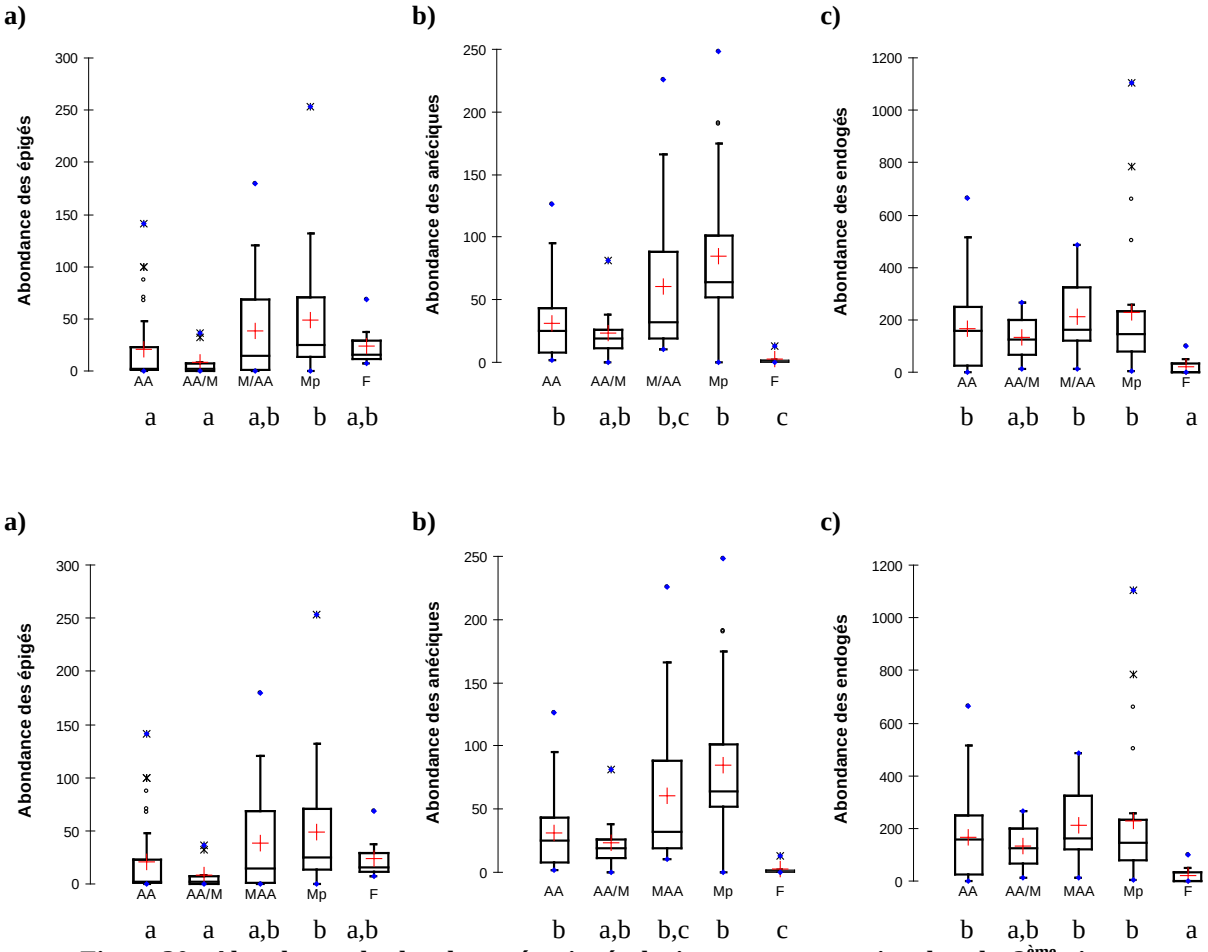


Figure 30 : Abondance absolue des catégories écologiques par occupation du sol – 2ème niveau
Abondance des épigés (a), des anéciques (b) et des endogés(c)
Ces données sont exprimées en ind/m²

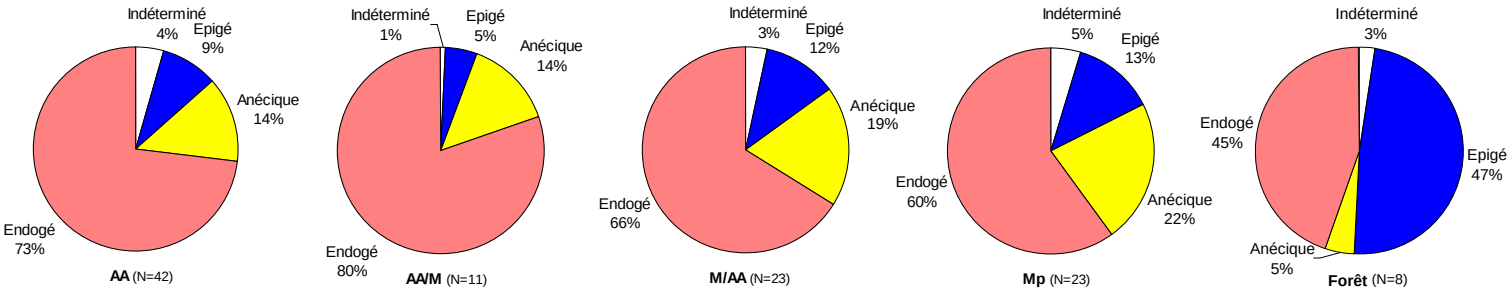


Figure 31 : Abondance relative des catégories écologiques par occupation du sol – 2ième niveau
Abondance des épigés (a), des anéciques (b) et des endogés(c)

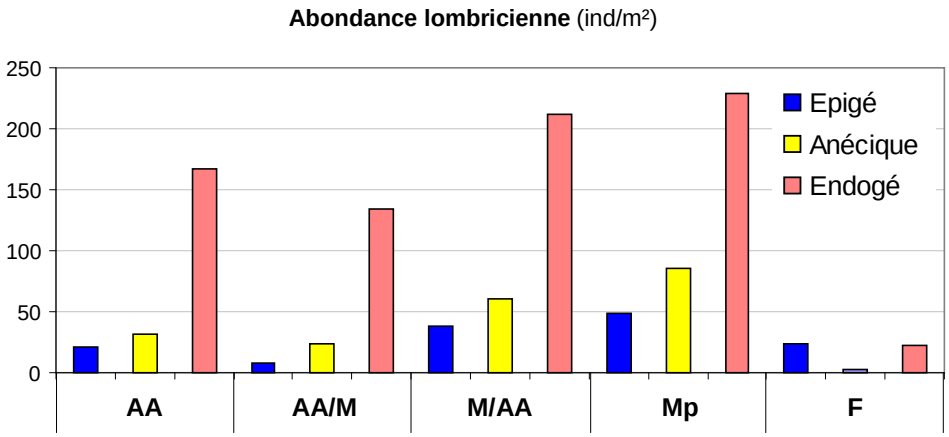


Figure 32 : Abondance absolue des catégories écologiques pour les 5 occupations du sol - 2ème niveau
AA : Grande culture (N = 42) ; **AA/M** : Culture dans rotation grande culture-prairie (N = 11) ;
M/AA : Prairie dans rotation grande culture-prairie (N = 23) ; **Mp** : Prairie permanente (N = 23) ; **F** : Forêt (N=8)

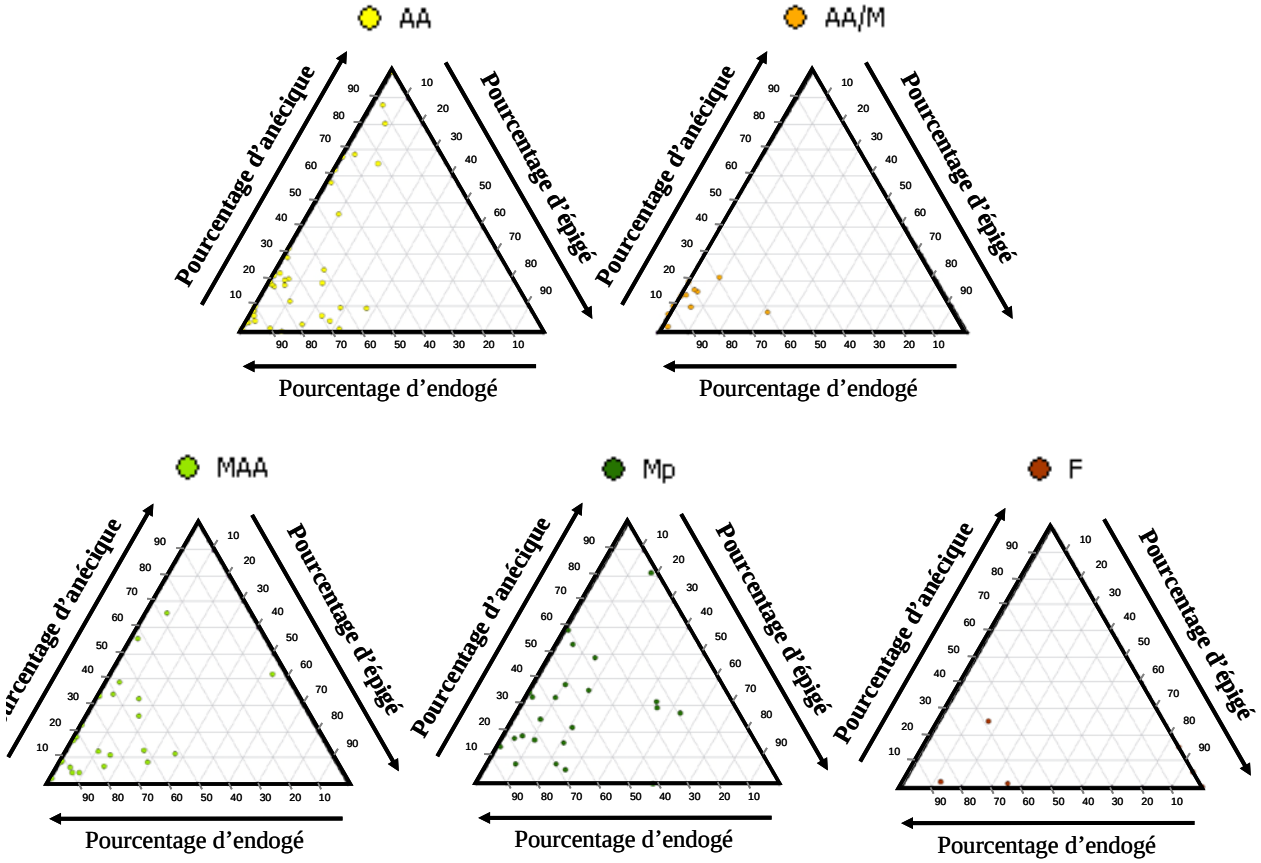


Figure 33 : Abondance des catégories écologiques par occupation du sol – 2ème niveau

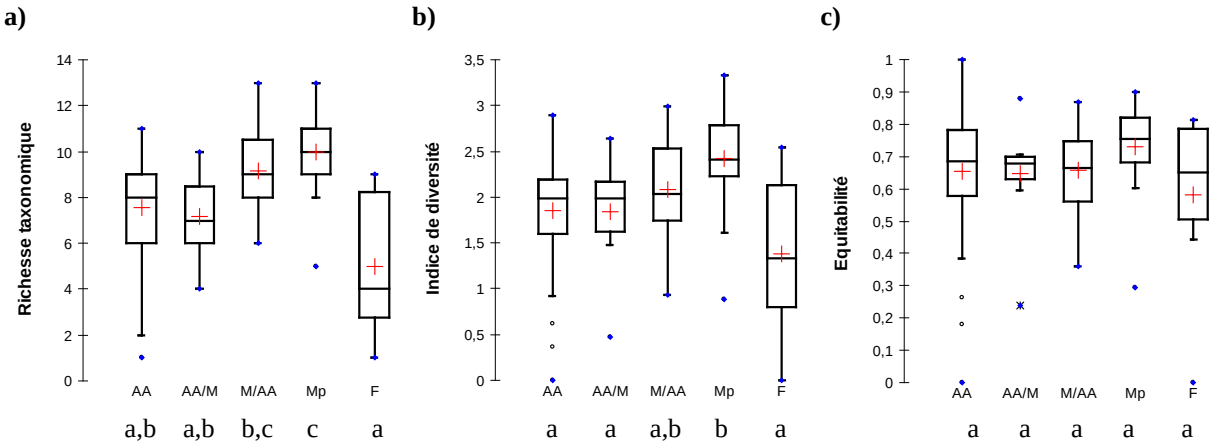


Figure 34 : Paramètres de diversité par occupation du sol – 2ème niveau
a) Richesse taxonomique**, b)** Indice de diversité**, c)** Equitabilité

3.1.3 Paramètres lombriciens et pratiques agricoles

Les pratiques agricoles étudiées, ici, sont :

- le type de fertilisation (pas de fertilisation (N=6), fertilisation minérale (N=19), organique (N=8), minérale et organique (N=66))
- la présence d'amendement et de fertilisation organique (aucun de paillage (N=26), non pailleux (lisier, fientes et purin ; N=24), pailleux (fumier ; N=28), mixte (fumier et lisier ; N=21))
- le travail du sol (pas de travail (N=18), travail sans labour (N=9), travail inférieur à 25 (N=35), travail supérieur à 25 (N=37))
- les traitements phytosanitaires (oui (N=81), non (N=18))

Les mêmes traitements statistiques que précédemment sont appliqués (*test de Kruskal-Wallis et correction de Bonferroni*) pour la majorité des variables. Un test de Mann-Whitney est réalisé pour la variable *présence ou absence de traitements phytosanitaires*. Ces analyses sont réalisées uniquement sur les sites agricoles (N=99).

a) Paramètres lombriciens et type de fertilisation

Les résultats sont significatifs pour la richesse taxonomique et l'indice de diversité avec le *« type de fertilisation »* (Tableau 7 et Figure 35). Cependant, la comparaison multiple ne permet pas de discriminer les 4 modalités de fertilisation significativement différentes les unes des autres. Malgré cela, une tendance de diminution de richesse taxonomique et d'indice de diversité est observée avec une augmentation des apports de fertilisation (pas de fertilisation, fertilisation minérale, fertilisation organique et fertilisation minérale et organique).

b) Paramètres lombriciens et amendement et fertilisation organique

Les paramètres de biodiversité et la biomasse des anéciques présentent des résultats significatifs avec la variable *« amendement et fertilisation organique »* (Tableau 8 et Figure 36). La biomasse des anéciques est plus élevée (77 g/m²) lorsque les amendements et fertilisations sont de type lisier (« non-pailleux ») et plus faible (30 g/m²) lorsque les amendements et fertilisations sont de type fumier (pailleux) (Figure 36.a). Les paramètres de biodiversité sont plus élevés lorsqu'il n'y a

pas d'amendement et de fertilisation organique. La moitié des sites sans amendement et fertilisation organique sont des prairies permanentes (13 sites), le reste étant constitué de prairies temporaires (6 sites), et de cultures (6 sites). L'indice de diversité et l'équitabilité sont plus faibles lorsque les amendements et fertilisations sont mixtes (fumier et lisier) alors que la richesse taxonomique est plus faible lorsque les amendements et fertilisation sont pailleux.

c) Paramètres lombriciens et travail du sol

La biomasse lombricienne, l'abondance et la biomasse des anéciques, la richesse taxonomique et l'indice de diversité présentent des résultats significatifs avec la variable *« travail du sol »* (Tableau 9, Figure 37).

La comparaison multiple ne permet pas de discriminer les 4 modalités de travail du sol significativement différentes les unes des autres. Néanmoins, la tendance observée est que la **biomasse lombricienne** est plus élevée lorsque le travail du sol est absent ou simplifié (69 et 76 g/m²) et plus faible en contexte de labour supérieur à 25 cm (38 g/m²) (Figure 37.c). Selon la littérature, le labour est reconnu comme ayant un effet négatif important sur l'abondance et la biomasse lombricienne (Curry *et al*., 1995). Une diminution de l'ordre de 50 % suite à un labour est régulièrement rapportée dans les études en grandes cultures. Des résultats significatifs sur l'**abondance totale** des lombriciens ne sont pas observés dans le cas du RMQS *BioDiv*.

Les travaux mécaniques influencent directement l'abondance et la biomasse des anéciques (Figure 37.a et b), confirmant ainsi les résultats obtenus pour la biomasse lombricienne globale (qui est influencée directement par la biomasse des anéciques). En effet, abondance et biomasse des anéciques présentent des valeurs significativement plus faibles lorsque le labour est profond (supérieur à 25 cm : 36 ind/m² ; 34 g/m²) par rapport à des travaux du sol absents (81 ind/m² ; 79 g/m²) ou simplifiés (TCL : 68 ind/m² ; 74 g/m²). Le labour inférieur à 25 cm présente des valeurs intermédiaires. Comme d'autres travaux (Wyss et Glassetetter, 1992), nous constatons que ce sont les ***anéciques*** qui sont le plus affectés par le labour. Cette diminution d'effectif est liée aux blessures plus ou moins mortelles infligées par les

outils et par la perturbation répétée des habitats et des réseaux de galeries de ces anéciques mais aussi par l'exposition aux oiseaux dont les lombriciens constituent une part de l'alimentation (Edwards et Lofty, 1978 ; Edwards, 1983 ; Guendet, 1983 ; Granval, 1988).

Pour les paramètres de diversité, les tests de Kruskal-Wallis sont significatifs pour la richesse taxonomique et l'indice de diversité (Figure 37.d). Bien qu'une tendance de biodiversité plus importante soit observée avec une réduction du travail du sol, les tests de comparaison multiples ne permettent pas de discriminer les modalités de *« travail du sol »* entres elles. Cependant, Tebrüge et Düring (1999) montrent une augmentation du nombre d'espèces lombriciennes en fonction de la réduction du travail du sol au cours d'une étude de longue durée (10 ans).

d) Paramètres lombriciens et traitements phytosanitaires

L'abondance des épigés, la biomasse des anéciques et les trois paramètres de biodiversité (richesse taxonomique, indice de diversité et équitabilité) présentent des résultats significatifs au test Mann-Whitney avec la variable *« traitements phytosanitaires »* (Tableau 10, Figure 38).
Quel que soit le paramètre lombricien cité, les valeurs sont significativement inférieures lorsque des traitements phytosanitaires sont effectués (Figure 38).

3.1.3.1 Paramètres lombriciens et type de fertilisation

Tableau 7 : Résultats des tests de Kruskal-Wallis avec la variable "type de fertilisation"

Fertilisation

Paramètres lombriciens	KW	p.value	significativité
Abondance lombricienne	1,83	0,61	ns
Biomasse lombricienne	1,94	0,58	ns
Abondance des épigés	3,96	0,27	ns
Abondance des anéciques	1,60	0,66	ns
Abondance des endogés	1,72	0,63	ns
Biomasse des épigés	3,55	0,31	ns
Biomasse des anéciques	1,94	0,59	ns
Biomasse des endogés	0,80	0,85	ns
a) Richesse taxonomique	**8,03**	**0,05**	**s**
b) Indice de diversité	**10,16**	**0,02**	**s**
Equitabilité	5,14	0,16	ns

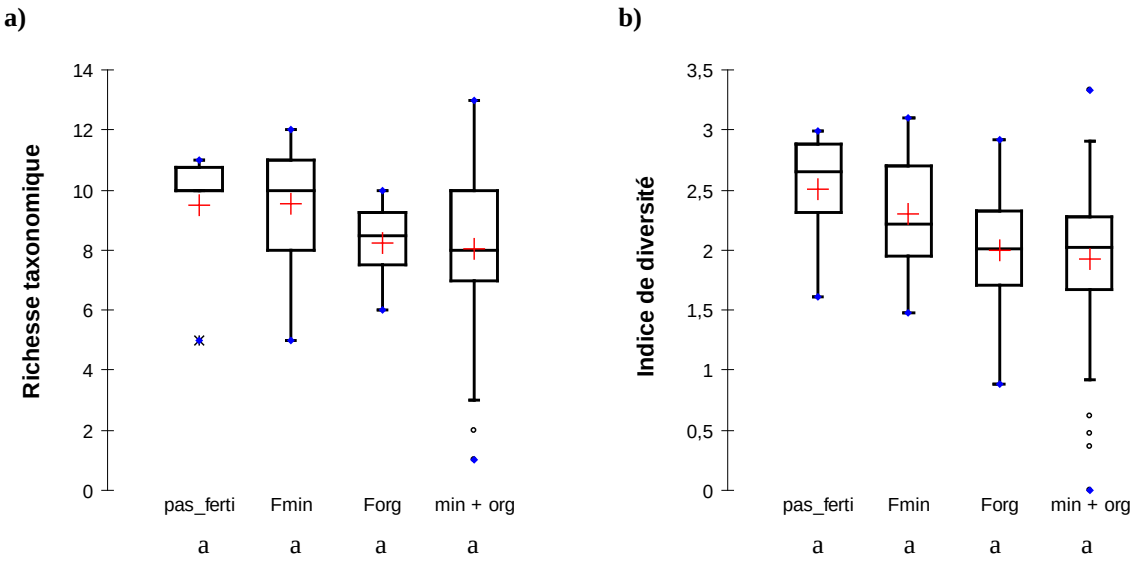


Figure 35 : Paramètres lombriciens par type de fertilisation
a) Richesse taxonomique **b)** Indice de diversité
pas de ferti : Pas de fertilisation (N = 6) ; **F min** : Fertilisation minérale (N = 19) ;
F org : Fertilisation organique (N = 8) ; **min + org** : Fertilisation minérale et organique (N = 66) ;

3.1.3.2 Paramètres lombriciens et amendement organique

Tableau 8 : Résultats des tests de Kruskal-Wallis avec la variable "amendement pailleux"

Amendement pailleux

Paramètres lombriciens	KW	p.value	significativité
Abondance lombricienne	2,35	0,50	ns
Biomasse lombricienne	7,13	0,07	ns
Abondance des épigés	4,90	0,18	ns
Abondance des anéciques	7,21	0,07	ns
Abondance des endogés	2,31	0,51	ns
Biomasse des épigés	5,40	0,14	ns
a) Biomasse des anéciques	**11,39**	**0,01**	**s**
Biomasse des endogés	1,77	0,62	ns
b) Richesse taxonomique	**10,50**	**0,01**	**s**
c) Indice de diversité	**16,70**	**0,00**	**s**
d) Equitabilité	**9,34**	**0,03**	**s**

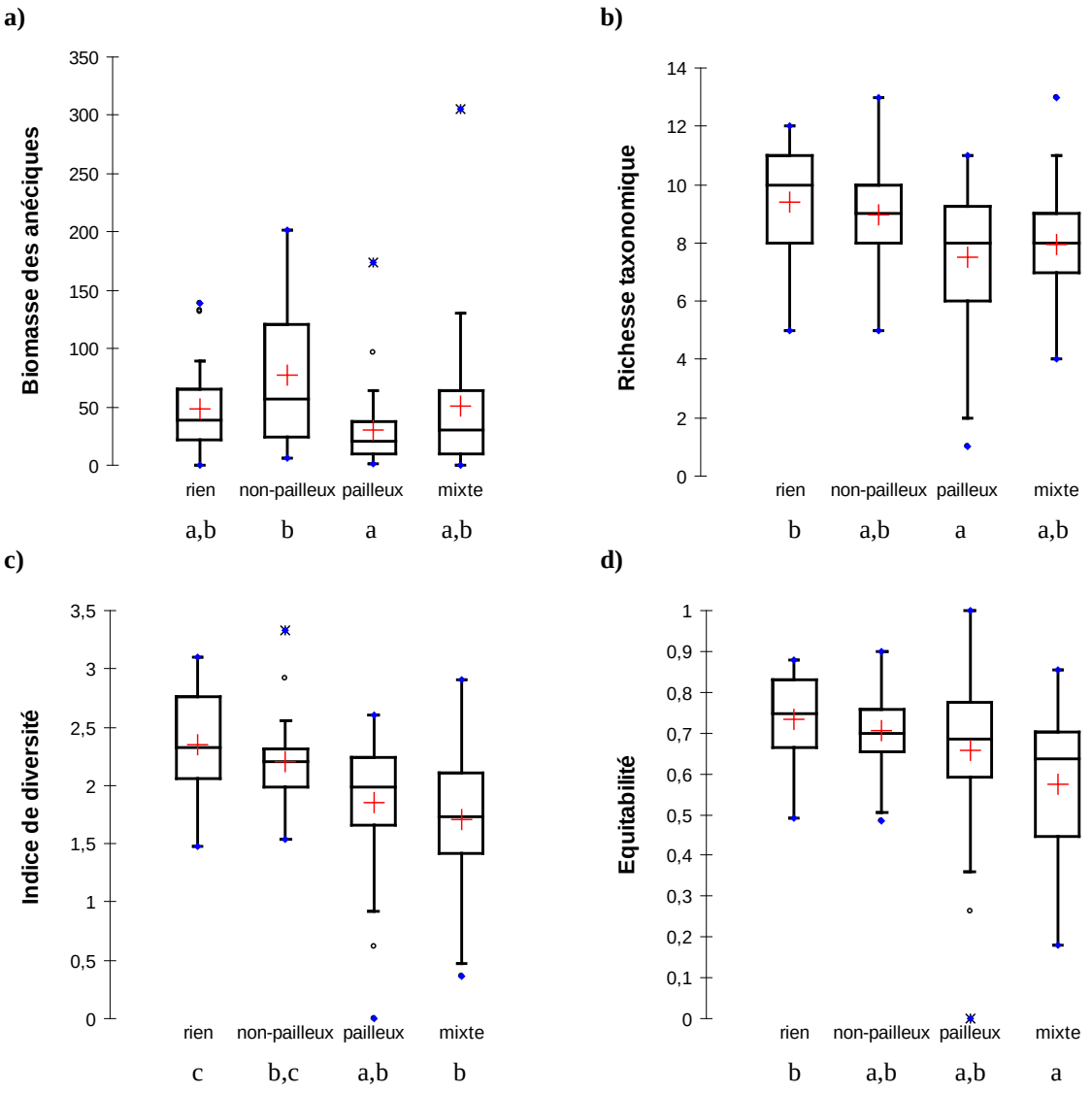


Figure 36 : Paramètres lombriciens par amendement et fertilisation organique
a) Biomasse des anéciques, **b)** Richesse taxonomique, **c)** Indice de diversité, **d)** Equitabilité
Rien : Pas de fertilisation et fertilisation minérale (N = 26) ; **Non pailleux** : lisier, fientes et purin (N = 24) ; **Pailleux** : fumier (N = 28) ; **Mixte** : fumier + lisier (N = 21)

3.1.3.3 Paramètres lombriciens et travail du sol

Tableau 9 : Résultats des tests de Kruskal-Wallis avec la variable "travail du sol"

Travail du sol

Paramètres lombriciens	KW	p.value	significativité
Abondance lombricienne	1,30	0,73	ns
c) Biomasse lombricienne	**8,30**	**0,04**	**s**
Abondance des épigés	5,77	0,12	ns
a) Abondance des anéciques	**12,80**	**0,01**	**s**
Abondance des endogés	0,36	0,95	ns
Biomasse des épigés	4,84	0,18	ns
b) Biomasse des anéciques	**12,78**	**0,01**	**s**
Biomasse des endogés	0,70	0,87	ns
Richesse taxonomique	**9,45**	**0,02**	**s**
d) Indice de diversité	**8,81**	**0,03**	**s**
Equitabilité	2,61	0,46	ns

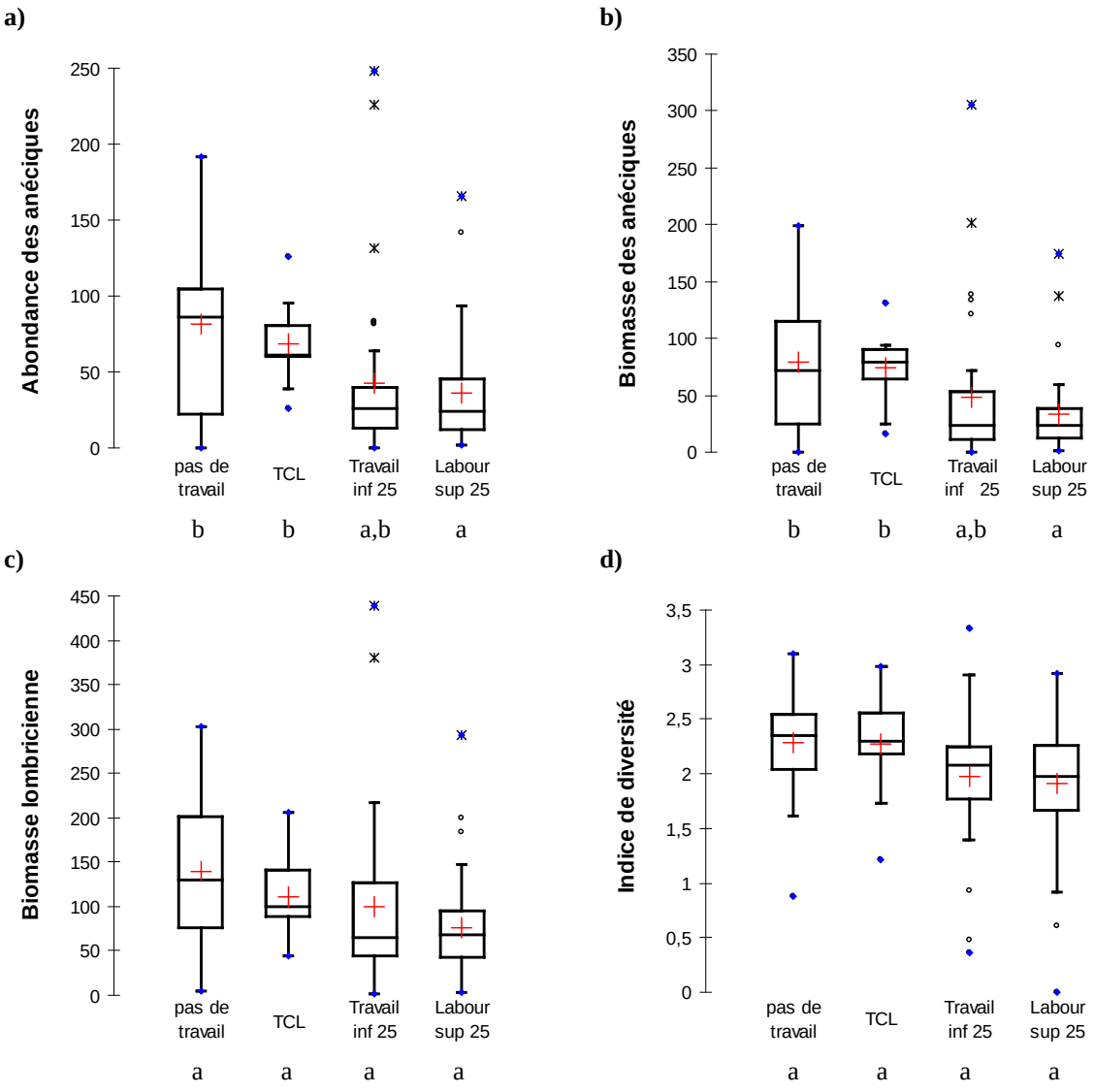


Figure 37 : Paramètres lombriciens par type de travail du sol
a) Abondance des anéciques, **b)** Biomasse des anéciques, **c)** Biomasse lombricienne, **d)** Indice de diversité
Pas de travail : Pas de travail du sol (N = 18) ; **TCL** : Technique sans labour (N = 9) ;
Travail inf 25 : travail inférieur à 25 cm (N = 35) ; **Labour sup 25** : labour sup ou égal à 25 (N = 37).

3.1.3.4 Paramètres lombriciens et traitement phytosanitaire

Tableau 10 : Résultats des tests de Mann-Whitney avec la variable « traitements phytosanitaires »

Traitement phytosanitaire

Paramètres lombriciens	MW	p.value	significativité
Abondance lombricienne	770,5	0,71	ns
Biomasse lombricienne	624	0,34	ns
a) Abondance des épigés	**493**	**0,03**	**s**
Abondance des anéciques	579	0,17	ns
Abondance des endogés	893,5	0,14	ns
Biomasse des épigés	528	0,07	ns
b) Biomasse des anéciques	**500**	**0,04**	**s**
Biomasse des endogés	851	0,27	ns
c) Richesse taxonomique	**479,5**	**0,02**	**s**
d) Indice de diversité	**260**	**< 0,0001**	**s**
e) Equitabilité	**320**	**0,00**	**s**

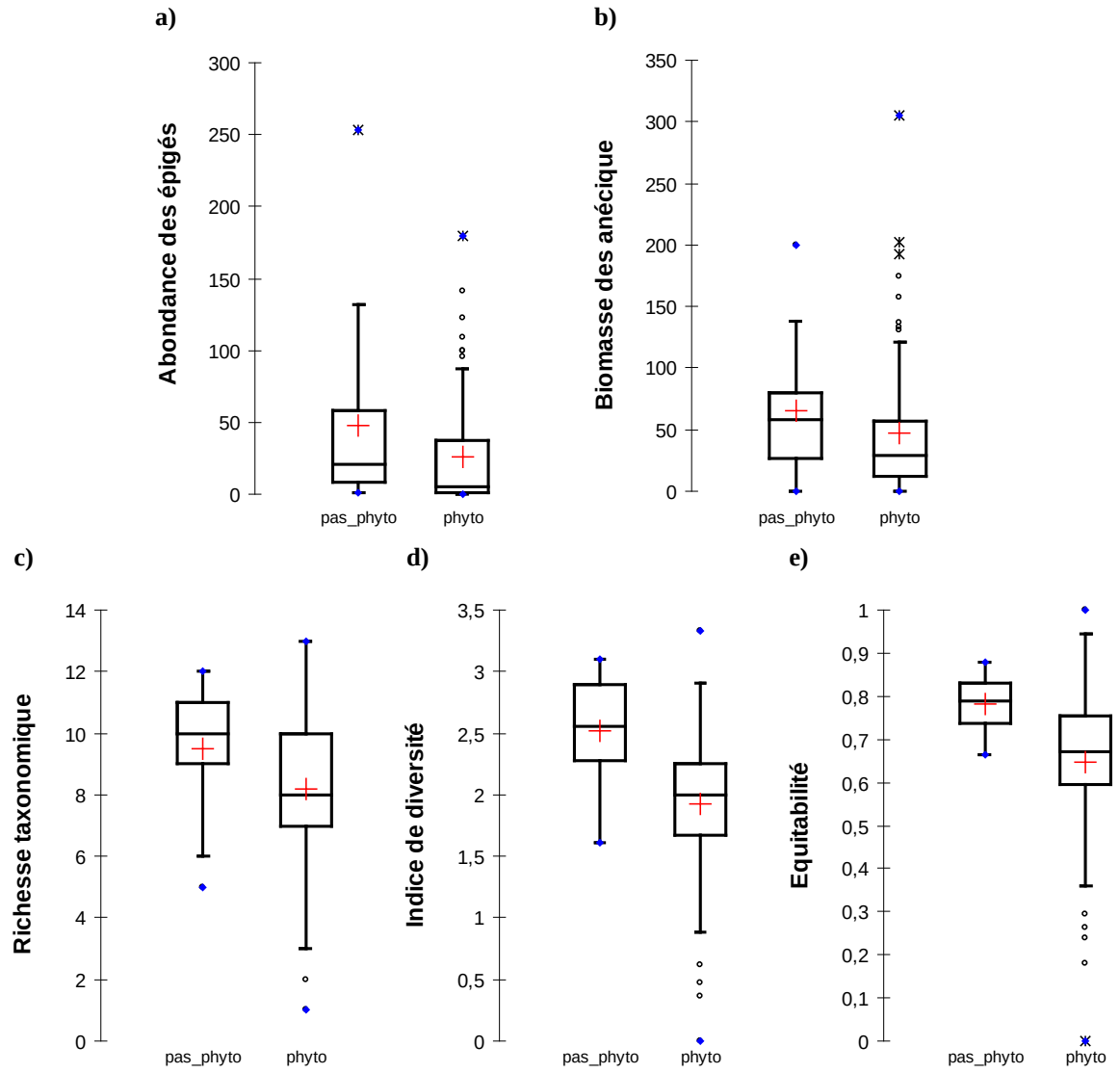


Figure 38 : Paramètres lombriciens et gestion phytosanitaire
a) abondance des épigés, **b)** biomasse des anéciques,
c) richesse taxonomique, **d)** indice de diversité et **e)** équitabilité
Pas de phyto : Abscence de traitements phytosanitaires (N = 18) ; **Phyto** : Traitements phytosanitaires (N = 81)

3.1.4 Paramètres lombriciens et caractéristiques pédologiques

a) Le code tarière

Les données pédologiques utilisées ici sont basées sur le code tarière (Rivière *et al*., 1992). Ce code synthétique rassemble des informations sur :

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

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

La seule relation significative entre lombriciens et variables pédologiques est trouvée entre la biomasse lombricienne (formol) et l'hydromorphie des sols (Tableau 11 et Figure 39). La biomasse passe par un optimum dans des conditions de faible hydromorphie (classe 1 et 2) et diminue fortement dans les sols d'hydromorphie importante (classe 5 et 6) où la biomasse est plus faible.
Selon Lee (1985), une humidité forte favorise, dans les sols, un déficit en oxygène saisonnier ou permanent et crée des conditions asphyxiantes peu propices au développement des lombriciens.

Les tableaux de résultats pour l'ensemble des variables pédologiques sont présentés en Annexe VIII).

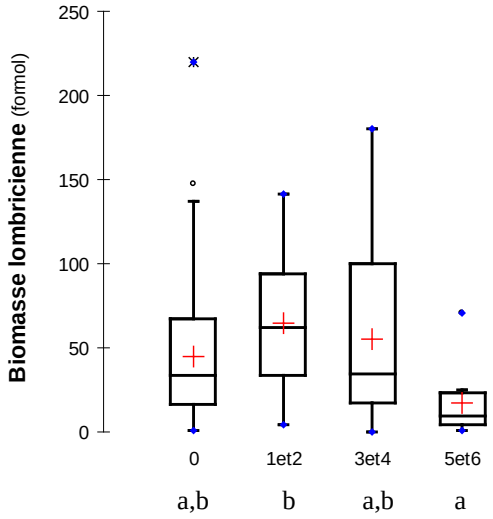


Figure 39 : Biomasse lombricienne par classe d'hydromorphie
0 : Absence d'hydromorphie (N = 62) ;
1 et 2 : taches d'oxydo-réduction à une prof sup à 80 cm (N = 12) ;
3 et 4 : taches d'oxydo reduction à une prof entre 40 et 80 cm (N = 25) ;
5 et 6 : taches d'oxydo reduction dès la surface (N = 10)

Tableau 11 : Résultats des tests de Kruskal-Wallis avec la variable pédologique « hydromorphie »

Hydromorphie

Paramètres lombriciens	MW	p.value	significativité
Abondance lombricienne (FTM)	3,47	0,32	ns
Biomasse lombricienne (FTM)	5,01	0,17	ns
Abondance lombricienne (F)	6,43	0,09	ns
Biomasse lombricienne (F)	**9,98**	**0,02**	**s**
Abondance des épigés	5,25	0,15	ns
Abondance des anéciques	2,10	0,55	ns
Abondance des endogés	3,11	0,37	ns
Biomasse des épigés	7,04	0,07	ns
Biomasse des anéciques	3,33	0,34	ns
Biomasse des endogés	3,37	0,34	ns
Richesse taxonomique	1,01	0,80	ns
Indice de diversité	1,42	0,70	ns
Equitabilité	2,57	0,46	ns

b) La texture

D'après Lee (1985), la texture du sol agit sur les lombriciens de deux façons, l'une directe et l'autre indirecte. D'une part, la taille et la rugosité des éléments grossiers du sol (sable) sont des barrières à l'ingestion, et d'autre part la texture du sol agit indirectement au travers des propriétés physico-chimiques qu'elles engendrent comme la capacité de rétention hydrique, ou les échanges cationiques (pH).

Sur les sites RMQS *BioDiv*, les endogés présentent de nombreuses *corrélations* avec les paramètres texturaux. L'abondance des endogés est corrélée positivement aux argiles et aux limons fins et leurs biomasses aux limons grossiers. Abondance et biomasse sont corrélées négativement aux sables grossiers (Tableau 12). Nordström et Rundgren (1974) ont également mis en évidence une corrélation positive significative entre la teneur en argile des sols et l'abondance des endogés ; ils attribuent ce fait essentiellement aux propriétés physico-chimiques du sol engendrées par la présence d'argile. L'abondance lombricienne présente des résultats similaires à ceux retrouvés pour l'abondance des endogés. En effet, ces derniers contribuent à 67 % à l'abondance lombricienne totale. Les épigés présentent une corrélation positive avec les limons fins (Tableau 12). Les autres paramètres lombriciens ne présentent pas de corrélations significatives avec les éléments de texture.

Tableau 12 : Corrélations significatives entre paramètres lombriciens et paramètres de texture

Abondance lombricienne

Variables	R	p
ARGILES	0,254	0,009
LIMONS_FINS	0,228	0,019
SABLES_GROSSIERS	-0,222	0,023

Abondance des endogés

Variables	R	p
ARGILES	0,209	0,032
LIMONS_FINS	0,201	0,039
SABLES_GROSSIERS	-0,254	0,009

Biomasse des endogés

Variables	R	p
LIMONS_GROSSIERS	0,216	0,026
SABLES_GROSSIERS	-0,210	0,031

Biomasse des épigés

Variables	R	p
LIMONS_FINS	0,197	0,043

3.1.5 Paramètres lombriciens 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= 46) dont 22 sites ont été réalisés en 2006 et 24 sites en 2007.

Les résultats montrent qu'il n'y a pas de différences significatives entre les prairies échantillonnées en 2006 et celle en 2007 pour une grande majorité de paramètres lombriciens (Tableau 13). Seules la biomasse et l'abondance des épigés présentent des différences significatives entre les valeurs des deux années en milieu prairial (Figure 40). Les abondances et les biomasses des épigés sont deux fois supérieures en 2006 par rapport aux valeurs obtenues en 2007 (respectivement 253 et 120 ind/m² et 40 et 19 g/m²).

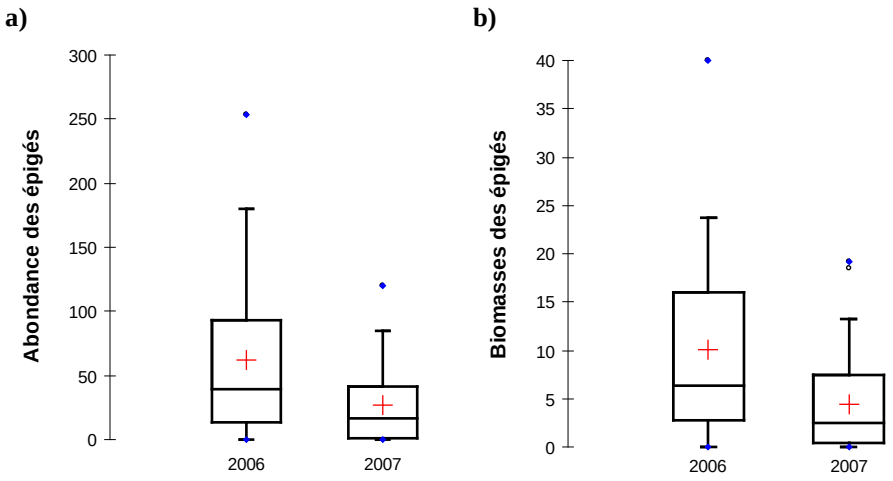


Figure 40 : Abondance et biomasse des épigés par année de prélèvement 2006-2007
Données FTM

Ce résultat montre que les épigés sont plus affectés par la variabilité interannuelle et interroge sur le fait d'en tenir compte lors de suivis (tous les 3 ans par exemple).

Tableau 13 : Synthèse des tests de Mann-Whitney sur la variable « année de prélèvement »

Paramètres lombriciens	Valeur de U	p.value	significativité
Paramètres globaux			
Abondance lombricienne	282	0,70	ns
Biomasse lombricienne	272	0,87	ns
Catégories écologiques			
Abondance des épigés	**363**	**0,03**	**s**
Abondance des anéciques	307,5	0,34	ns
Abondance des endogés	237,5	0,57	ns
Biomasse des épigés	**369,5**	**0,02**	**s**
Biomasse des anéciques	289	0,59	ns
Biomasse des endogés	224	0,39	ns
Paramètre de diversité			
Richesse taxonomique	301	0,41	ns
Indice de diversité	294	0,52	ns
Equitabilité	294	0,52	ns

Données FTM

3.1.6 Paramètres lombriciens et humidité des sols

L'humidité du sol des échantillons RMQS *BioDiv* a été mesurée par l'équipe de Montpellier. Pour identifier un lien entre l'humidité du sol et les paramètres lombriciens, des *tests de corrélation (Spearman)* ont été effectués.

Des corrélations significatives existent entre les abondances et biomasses des épigés et le pourcentage d'humidité des échantillons (Abondance des épigés : R = 0,258 ; p = 0,007 et Biomasse des épigés : R = 0,211 ; p = 0,028) (Figure 41). Les autres paramètres lombriciens ne présentent pas de corrélations avec l'humidité des sols.

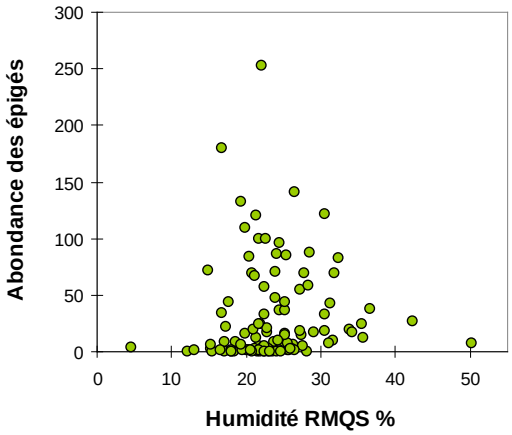


Figure 41 : Abondance des épigés en fonction de l'humidité des échantillons sur les 109 sites RMQS *BioDiv*

3.2 Structure taxonomique des communautés lombriciennes et variables explicatives

3.2.1 Structure des communautés lombriciennes et paramètres physico-chimiques

Le lien entre la structure des communautés lombriciennes et les paramètres physico-chimiques (profondeur 0-25 cm) est évalué par *analyse de co-inertie*. Pour cette analyse, une *ACP* est réalisée sur les données d'abondance des taxons lombriciens et une autre sur les données physico-chimiques, le principe étant d'étudier la structure commune existant entre ces deux jeux de données.

Une co-structure significative (RV = 0.275 ; p-value = 0.0009) existe entre les abondances des 29 taxons lombriciens et 24 paramètres physico-chimiques échangeables, assimilables et extractibles.

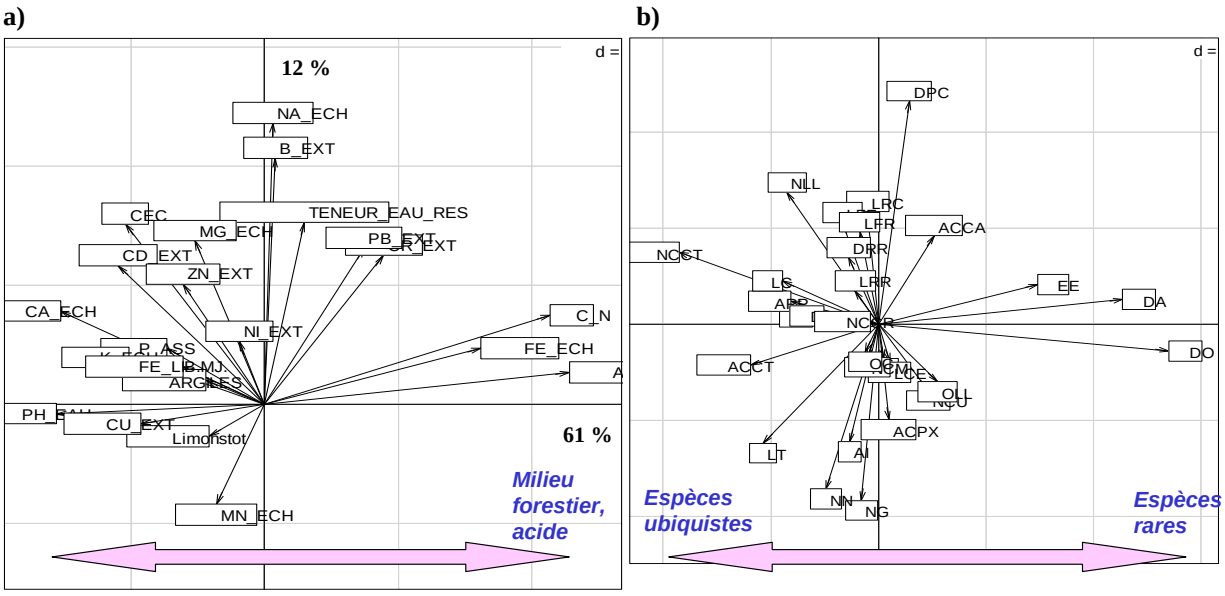


Figure 42 : Plan factoriel (1-2) de l'analyse de co-inertie entre les abondances des 29 taxons lombriciens et les paramètres physico-chimiques
a) position des paramètres physico-chimiques sur le premier plan factoriel de la co-inertie
b) position des 29 taxons lombriciens sur le premier plan factoriel de la co-inertie

- Sur l'***axe 1***, les espèces rares DO, DA et EE sont liées au fer et à l'aluminium échangeable élevé, rapport C/N élevé et pH faible. Ce résultat est lié aux sites forestiers qui présentent une faune spécifique associée à des conditions physico-chimiques particulières.

- Sur l'***axe 2***, DPC est lié au sodium échangeable et au bore extractible. Il semble que ce taxon soit présent principalement sur des sites côtiers mais il est difficile d'établir des conclusions, étant donné que ce taxon n'est retrouvé que sur deux sites. À l'opposé, les taxons NN et NG sont liés, quant à eux, au manganèse échangeable (Figure 42).

Lorsque les sites forestiers sont retirés des analyses, il n'existe pas de co-structure entre les abondances de taxons lombriciens et les paramètres physico-chimiques.

Une seconde co-structure significative (RV = 0.18 ; p-value = 0.0009) a été retrouvée entre les abondances de 13 taxons lombriciens (taxons regroupés) et 8 paramètres physico-chimiques sélectionnés[10]. Pour cette analyse, les 8 sites forestiers sont écartés.

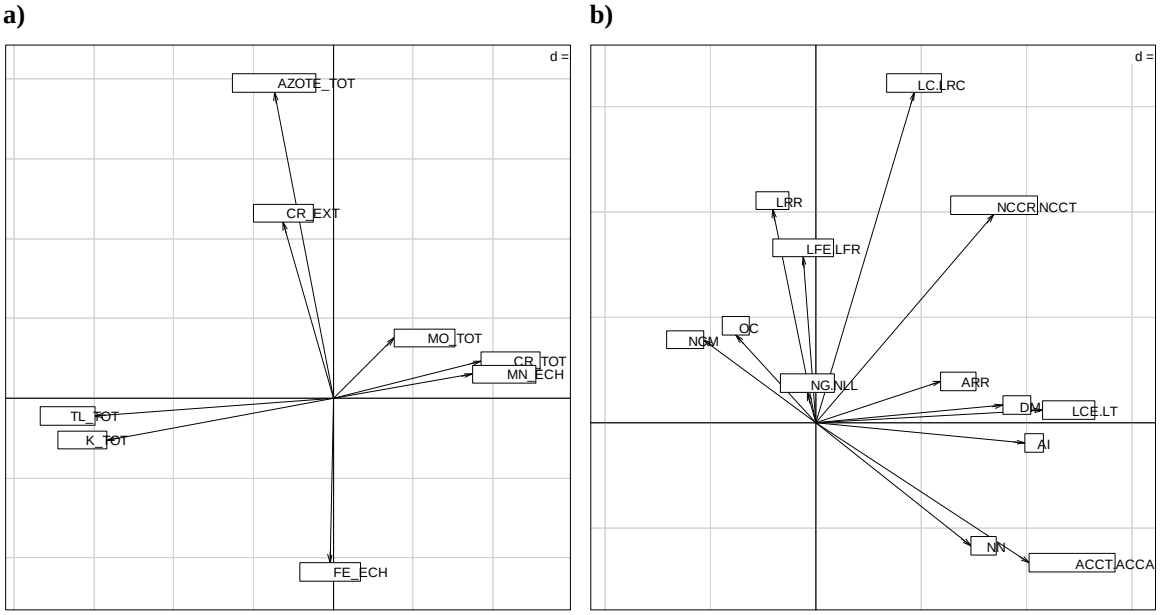


Figure 43 : Plan factoriel (1-2) de l'analyse de co-inertie entre les abondances de 13 taxons lombriciens et 8 paramètres physico-chimiques
a) position des 8 paramètres physico-chimiques sur le premier plan factoriel de la co-inertie
b) position des 13 taxons lombriciens sur le premier plan factoriel de la co-inertie

- Les taxons LCE+LT, ACCA+ACCT et AI contribuent fortement à l'***axe 1***. Les taxons DM et NCCR+NCCT contribuent, eux, moyennement à cet axe. Ils sont

[10] La sélection des 8 paramètres physico-chimiques a été effectuée en fonction de i) le résultat de la sélection progressive (pas à pas) des variables explicatives soumises au tableau multivarié d'abondance des taxons lombriciens (fonction forward.sel de la bibliothèque packfor pour le logiciel R), et ii) les paramètres physico-chimiques qui présentent des corrélations fortes avec les taxons lombriciens.

principalement liés à des teneurs faibles en thallium (pour LCE+LT, AI, ACCA+ACCT et DM) et le potassium total (pour LCE+LT, AI et NCCR+NCCT) et secondairement à des teneurs élevées en chrome total (pour ACCA+ACCT) et manganèse échangeable (pour AI).

- Le taxon LC+LRC contribue fortement alors que les taxons LRR et NCCR+NCCT contribuent moyennement, à l'***axe 2***. Ces taxons sont en lien avec l'azote total et le chrome extractible (pour LC+LRC) en opposition au fer échangeable (pour LRR). Notons que le taxon ACCA+ACCT est plutôt lié à de faibles teneurs en azote total (Figure 43).

3.2.2 Structure des communautés lombriciennes et occupation des sols

Afin d'étudier la structure des communautés lombricienne en relation avec les différentes variables explicatives, le plan factoriel des sites de l'ACP sur les abondances de 13 taxons lombriciens, présenté au paragraphe 1.3.3, est illustré en fonction des variables d'occupation du sol. Cette illustration permet d'effectuer une interprétation visuelle de groupes ou gradients liés à des modalités de variables explicatives. Les forêts, présentant une structuration particulière, ne sont pas prises en compte dans ces analyses.

Les plans factoriels de l'ACP confirment la discrimination entre les différents types d'usage des sols. Ainsi, le plan formé par les axes 1 et 3 permet de montrer la séparation entre les communautés lombriciennes sous prairies d'une part et celles sous cultures d'autre part. Le gradient prairie ←→ culture sur l'axe 1 est lié aux taxons abondants (NCCR+NCCT, ARR et LCE+LCT) très présents en prairie (Figure 44.a).

La codification d'occupation du sol 2ème niveau (cf. paragraphe 3.1.2.2) a été créée afin d'affiner l'information au niveau des cultures et des prairies. En se basant sur la codification FAO, 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 cultivés. De même, les prairies temporaires (M/AA) sont dissociées des prairies permanentes (Mp), pour les systèmes prairiaux. La structure des communautés lombriciennes discrimine moins aisément les milieux avec cette nouvelle codification (Figure 44.b).

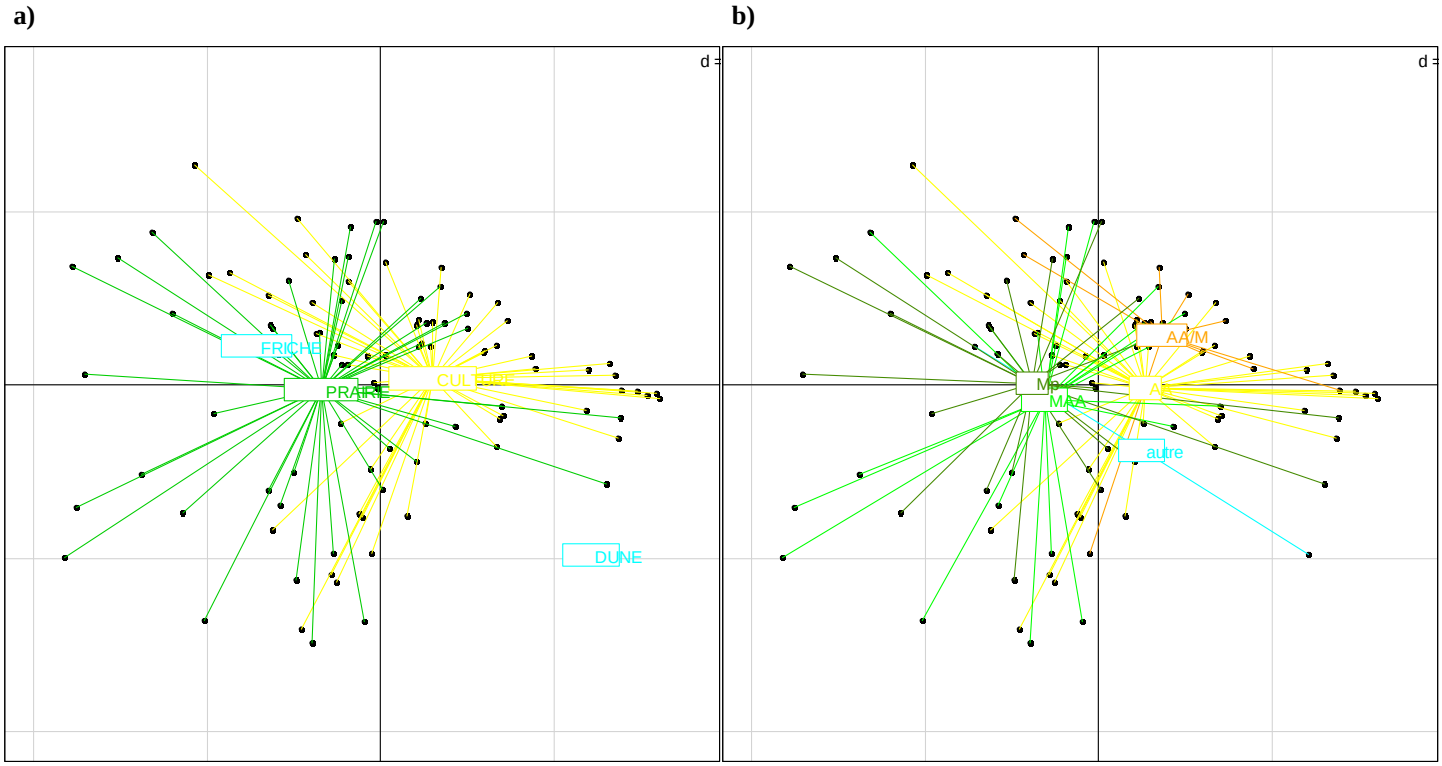


Figure 44 : Plan factoriel (1-3) des sites de l'ACP en fonction des variables d'occupation des sols
a) Occupation du sol 1er niveau : C : Culture (N = 47) ; P : Prairie (N = 42)
b) Occupation du sol 2ème niveau : AA (N=42) ; AA/M (N=11) ; M/AA (N=23) ; MP (N=23)

3.2.3 Structure des communautés lombriciennes et pratiques agricoles

Une différence ***absence ←→ présence*** de traitements phytosanitaires peut être distinguée sur l'axe 1. Cette observation est liée à des sites en prairies permanentes, qui présentent de fortes abondances en taxons lombriciens, et sur lesquelles il n'y a pas de traitements phytosanitaires (Figure 45). Aucun groupe de sites ou gradient ne sont observés pour les autres variables de pratiques agricoles (fertilisation, amendement et fertilisation organique et travail du sol). L'ensemble des illustrations de la structure des communautés lombriciennes en fonction des variables explicatives est présenté en Annexe IX.

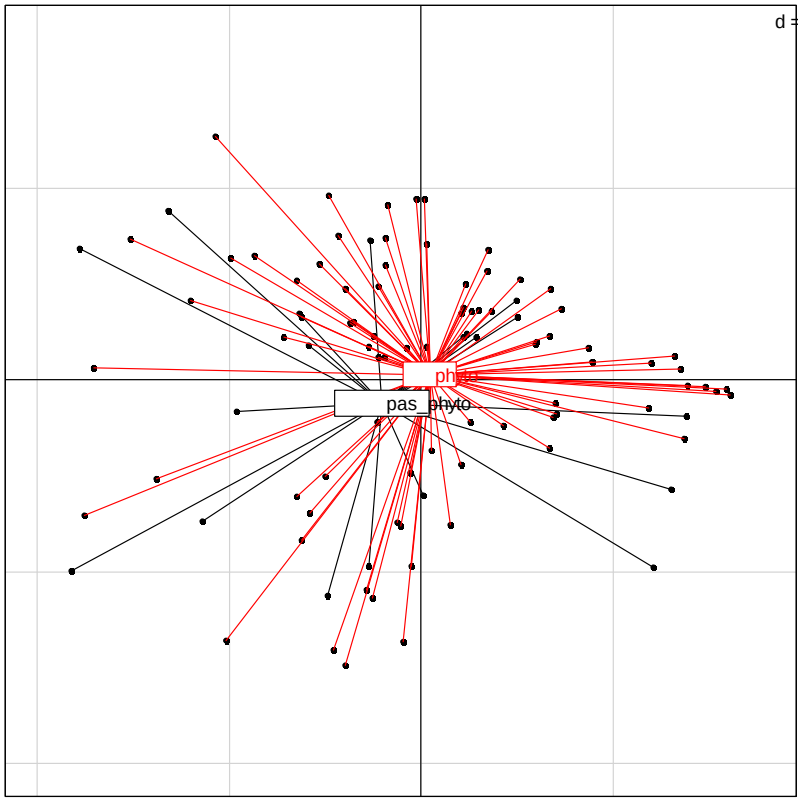


Figure 45 : Plan factoriel (1-3) des sites de l'ACP en fonction de la variable « traitement phytosanitaire »
Phyto (N=81) ; Pas de phyto (N=18)

3.2.4 Structure des communautés lombriciennes et caractéristiques pédologiques

Le profil de sol constitue une variable structurante de la communauté lombricienne. En effet, les groupes de sites A, B, C se distinguent sur l'axe 1. Les sols bruns et bruns faiblement lessivés supportent de plus fortes abondances des taxons lombriciens par rapport aux divers autres sols (Sol dégradé, lessivé faiblement dégradé, blanchi limoneux sous le labour, lessivé, minéral, brut, très superficiel, d'apport alluvial et colluvial) (Figure 46.a).

La profondeur de sol est également structurante pour la communauté lombricienne. Sur l'axe 2, les profondeurs les plus élevées (p_1) sont en lien avec les taxons AI et NN, opposés aux taxons LFE+LFR et OC présents sur des sites à profondeurs plus faibles (p_4et5) (Figure 46.b). Aucun groupe de sites ou gradient ne sont observés pour les variables « géologie » et « hydromorphie ». L'ensemble des illustrations de la structure des communautés lombriciennes en fonction des variables pédologiques est présenté dans l'Annexe IX.

a) **b)**

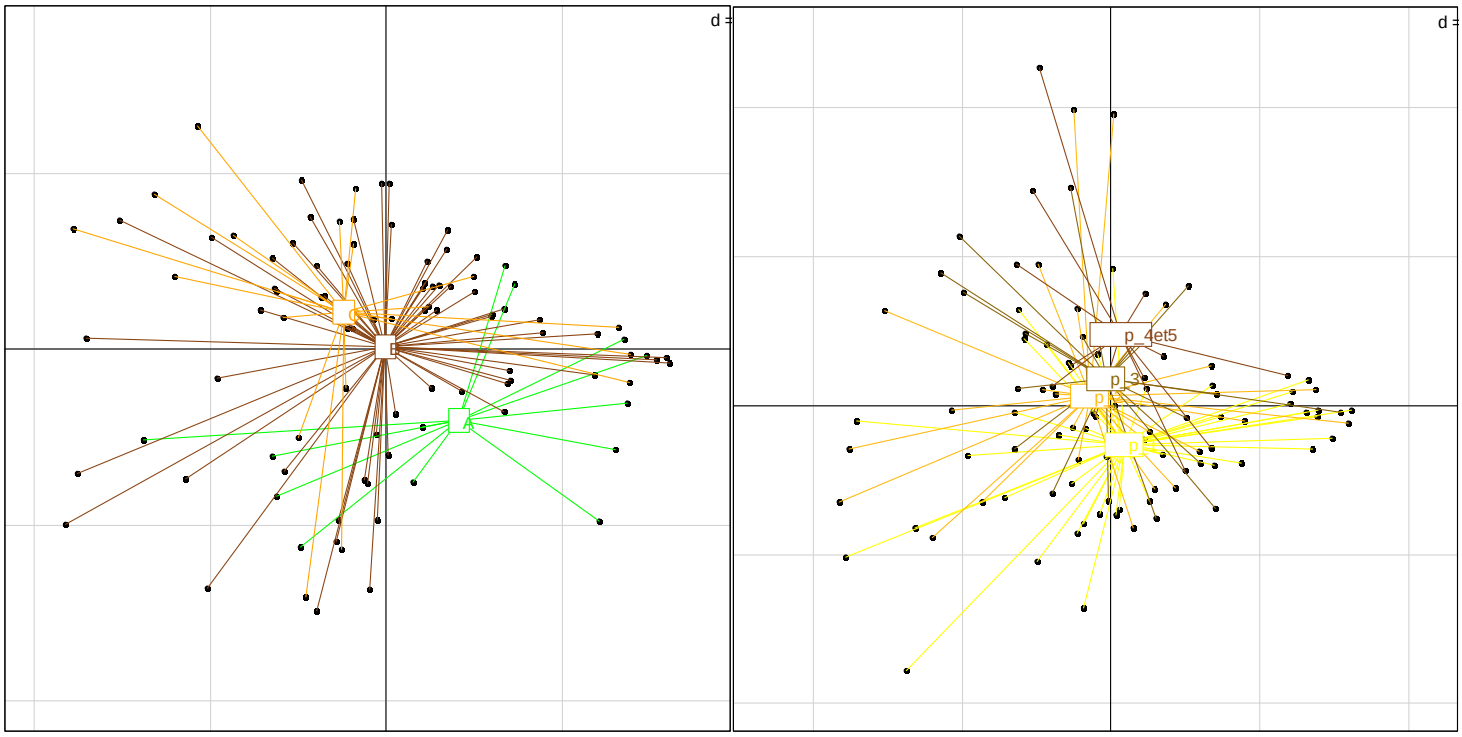


Figure 46 : Plan factoriel des sites de l'ACP en fonction des variables pédologiques
a) Plan factoriel 1-3 en fonction du profil de sol
B : Sol brun (N=69) ; C : Sol brun faiblement lessivé (N=21) ; A : Autres sols (N=14)
b) Plan factoriel 1-2 en fonction de la profondeur
p_1 : plus d'1 m (N=44) ; p_2 : 80 – 100 cm (N=26) ; p_3 : 60-80 cm (N=22) ; p_4et5 : 60-20 cm (N=12)

3.2.5 Structure des communautés lombriciennes et année de prélèvement

Un effet année est distingué sur la structure des communautés lombriciennes. Cet effet s'exprime sur le premier axe de l'ACP. Les sites de 2006 sont caractérisés par des abondances élevées des taxons NCCT+NCCR, ARR et LCE+LT (Figure 47). Ce résultat est à mettre en relation avec le fait qu'en 2006, 70% des 32 sites échantillonnés étaient des prairies.

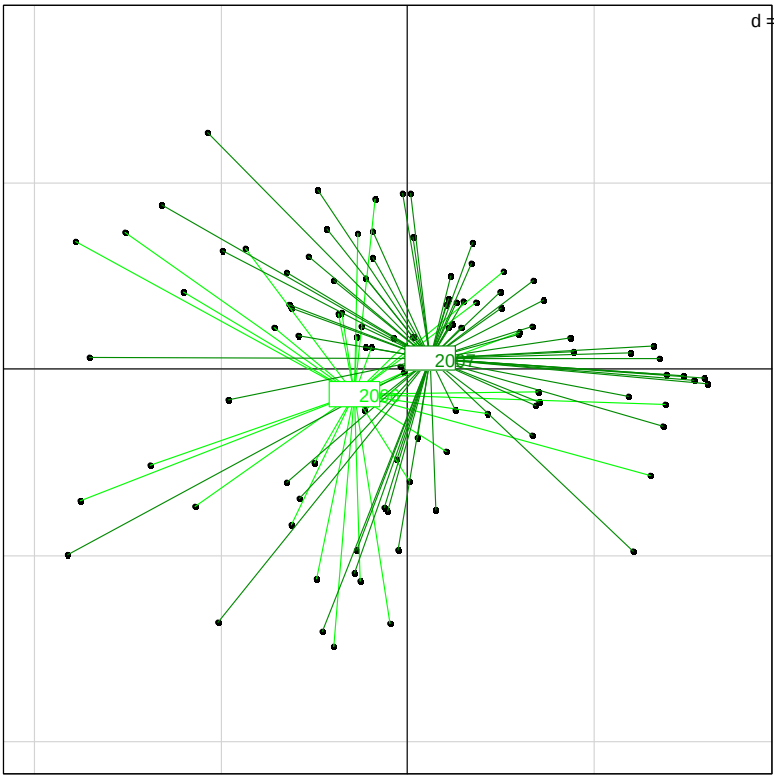


Figure 47 : Plan factoriel (1-3) des sites de l'ACP en fonction de l'année de réalisation des sites RMQS *BioDiv*
2006 (N = 32) ; 2007 (N = 77)

SYNTHESE

Caractérisation globale

Les sols des sites RMQS *BioDiv* Bretagne présentent, en moyenne, des abondances lombriciennes de 260 ind/m² et des biomasses de 91 g/m². Les abondances s'échelonnent de 3 à 1332 ind/m² et les biomasses de 0,92 à 438 g/m². Abondance et biomasse discriminent les trois systèmes d'occupation du sol avec des valeurs élevées en prairies (350 ind/m² ; 138 g/m²), moyennes en cultures (215 ind/m² ; 63 g/m²) et faibles en forêts (50 ind/m² ; 8 g/m²). Dans le cadre de ce programme, l'influence des variables de pratiques agricoles et pédologiques n'a pas pu être mise en évidence sur l'abondance lombricienne. En revanche, la biomasse lombricienne, liée à la biomasse des anéciques, varie significativement en fonction du travail du sol. En effet, elle est plus élevée lorsque le travail du sol est absent ou simplifié (TCL) et plus faible en contexte de labour supérieur à 25 cm.
Par ailleurs, des corrélations significatives sont retrouvées entre biomasse et le molydbène total.

Une réflexion a été menée pour répondre aux besoins de définitions de « baselines[11] » et « thresholds[12] » (valeurs de références et valeurs seuils). Fruit de cette réflexion, une première **proposition « à dire d'expert »** pouvant contribuer à définir des baselines est illustrée pour le paramètre d'abondance lombricienne (Figure 48).

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

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

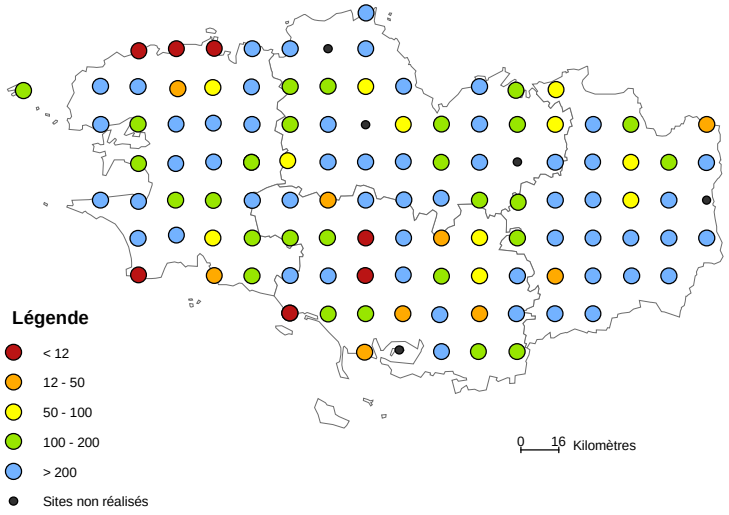


Figure 48 : Proposition de valeurs de références (baselines) pour l'abondance lombricienne
Données FTM

Caractérisation fonctionnelle

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

➢ Les **épigés** semblent constituer la catégorie écologique la plus sensible vis-à-vis des conditions au moment du prélèvement. En effet, une variabilité inter annuelle et une corrélation avec l'humidité des échantillons RMQS *BioDiv* sont trouvées pour l'abondance des épigés. L'abondance des épigés est également significativement plus faible en systèmes cultivés (18 ind/m²) par rapport aux systèmes prairiaux (43 ind/m²) et forestiers (24 ind/m²). En forêt, les épigés représentent la moitié des peuplements lombriciens. Leurs abondances sont, de plus, significativement plus faibles en présence de traitements phytosanitaires (Figure 49). Notons que les épigés sont corrélés avec le molybdène total.

➢ Les **anéciques** apparaissent particulièrement sensibles à l'occupation des sols et aux pratiques agricoles. Abondance et biomasse des anéciques discriminent significativement les trois systèmes avec des valeurs plus importantes sous prairie (72 ind/m²), intermédiaires sous culture (30 ind/m²) et faibles en forêt (2 ind/m²). Pour les pratiques agricoles, les anéciques présentent des résultats significatifs avec les variables « travail du sol », « amendement et fertilisation organique », et « présence

de traitements phytosanitaires ». L'abondance et la biomasse des anéciques sont significativement plus faibles lorsque le labour est profond (supérieur à 25 cm) par rapport à un travail du sol absent ou simplifié. La biomasse des anéciques est plus élevée lorsque les amendements sont de type lisier (« non-pailleux ») et plus faible lorsque les amendements sont de type fumier (pailleux). La biomasse des anéciques, contrairement à leur abondance, est significativement inférieure en présence de traitements phytosanitaires (Figure 49).

➢ Les **endogés** ne présentent pas de relations significatives avec les variables de pratiques agricoles et pédologiques. L'abondance des endogés est élevée sous cultures (160 ind/m²) et sous prairies (219 ind/m²) mais significativement plus faible sous forêts (22 ind/m²) (Figure 49).

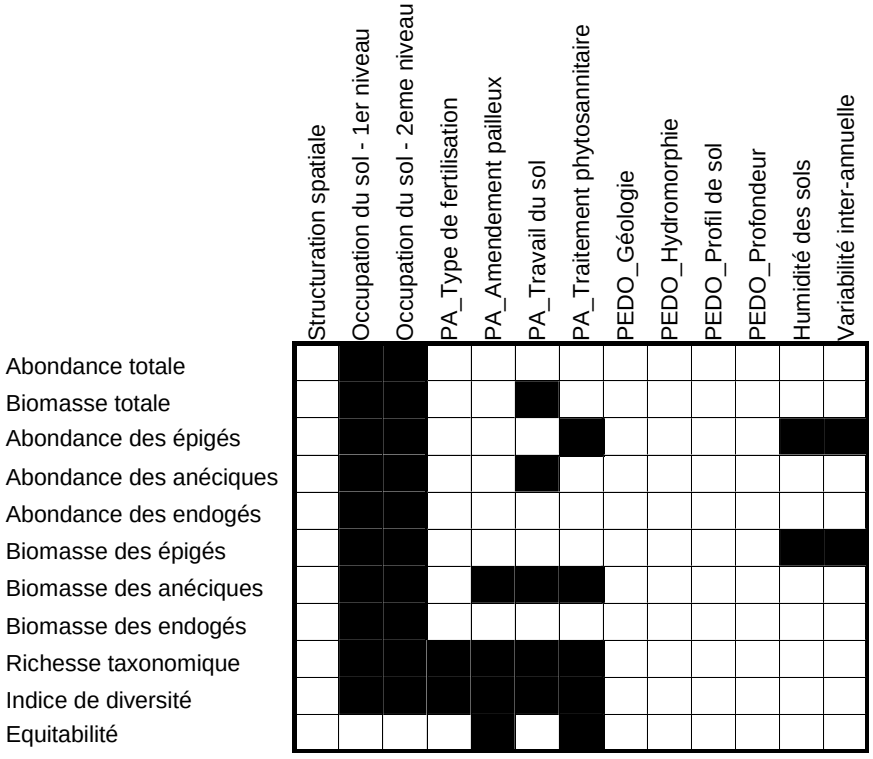


Figure 49 : Présentation synthétique des résultats significatifs des liens entre les paramètres lombriciens et les variables explicatives
Données FTM

Caractérisation taxonomique

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

Paramètres de biodiversité

Sur les sites RMQS *BioDiv*, en moyenne 8 taxons sont présents. Le nombre minimum de taxons observé sur un même site est de 1 et le nombre maximum de 13. La ***richesse taxonomique*** discrimine significativement les sites prairiaux, avec des richesses plus importantes (9,6 taxons en moyenne), des sites cultivés et forestiers qui présentent des richesses moindres, respectivement 7,4 et 5. La richesse taxonomique varie significativement en fonction de variables de pratiques agricoles (fertilisation et traitements phytosanitaires). En effet, elle est plus faible lors d'apport de fumier (7,3), intermédiaire lors d'apport de lisier (8,8) et plus élevée (9) lorsqu'il n'y a pas d'apport. La richesse taxonomique est également significativement plus élevée en absence de traitements phytosanitaires (9,5) qu'en leur présence (8). L'***indice de diversité*** de Shannon est en moyenne de 1,98 ± 0,6 avec des valeurs variant de 0 à 3,32. L'indice de diversité présente les mêmes résultats avec les variables explicatives que la richesse taxonomique. Les peuplements présentent une ***équitabilité*** assez élevée avec une moyenne de 0,7. L'équitabilité lombricienne présente est significativement influencée par les variables de pratiques agricoles : « amendement et fertilisation organique » et « traitement phytosanitaires ».

Structure des communautés lombriciennes

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

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

* * *

De manière générale, les valeurs obtenues dans le cadre du programme RMQS *BioDiv* sont en accord avec la littérature en contexte agricole breton (Cluzeau, 1992 ; Binet, 1993 ; Cannavacciuolo, 1998 ; Pérès, 2003 ; Piron, 2008) et la complète judicieusement.
De la même façon que démontré par certains de ces auteurs, l'**occupation du sol** joue un rôle prépondérant sur le peuplement lombricien : les systèmes prairiaux, comparés aux systèmes cultivés, offrent des conditions plus favorables au développement lombricien (abondance, biomasse et diversité). Certaines pratiques agricoles influencent les peuplements lombriciens, par exemple le travail du sol sur les abondances et biomasses des anéciques. Les caractéristiques pédologiques sont peu structurantes pour les peuplements lombriciens. Les paramètres lombriciens (globaux, fonctionnels et de diversité) ne présentent pas de structuration spatiale à l'échelle de la Bretagne.

Table des illustrations

Figure 1 : Groupes biologiques étudiés et équipes partenaires associées du programme RMQS BioDiv 2
Figure 2 : Statistiques descriptives (a), boîtes à moustaches (b) et histogramme (c) de l'abondance lombricienne ... 10
Figure 3 : Abondance lombricienne moyenne (nb ind/m²) sur les 109 sites RMQS BioDiv 11
Figure 4 : Contribution du formol et du tri manuel (%) dans l'abondance lombricienne totale (FTM) 11
Figure 5 : Statistiques descriptives (a), boîtes à moustaches (b) et histogramme (c) de la biomasse lombricienne ... 12
Figure 6 : Boîtes à moustaches de l'abondance des trois catégories écologiques lombriciennes 14
Figure 7 : Répartition des 109 sites RMQS BioDiv dans le triangle des catégories écologiques 14
Figure 8 : Fréquence d'apparition des taxons lombriciens sur les sites RMQS BioDiv 18
Figure 9 : Répartition des taxons lombriciens « rares » sur les sites RMQS BioDiv 19
Figure 10 : Structure taxonomique moyenne des communautés sur l'ensemble des sites RMQS BioDiv 21
Figure 11 : Plans factoriels de l'ACP sur l'ensemble de la communauté lombricienne 22
Figure 12 : Plans factoriels de l'ACP avec regroupement de certains taxons 24
Figure 13 : Boîtes à moustaches des paramètres de caractérisation de la biodiversité 26
Figure 14 : Corrélogramme (a) et variogramme (b) de l'abondance lombricienne (FTM) 29
Figure 15 : Corrélogramme (a) et variogramme (b) de l'abondance des anéciques (FTM) 30
Figure 16 : Cartes de l'abondance (a) et la biomasse (b) lombricienne sur les sites RMQS BioDiv 31
Figure 17 : Cartes de l'abondance des catégories écologiques sur les sites RMQS BioDiv 32
Figure 18 : Cartes des paramètres de diversité lombricienne sur les sites RMQS BioDiv 33
Figure 19 : Répartition de taxons lombriciens présentant une structuration spatiale 34
Figure 20 : Structuration spatiale du premier axe factoriel de l'ordination sous contrainte spatiale 35
Figure 21 : Structuration spatiale des paramètres physico-chimiques 35
Figure 22 : Illustration des corrélations significatives 38
Figure 23 : Abondance et biomasse lombricienne par occupation du sol - 1er niveau 41
Figure 24 : Abondance absolue des catégories écologiques par occupation du sol - 1er niveau 41
Figure 25 : Abondance absolue des catégories écologiques pour les 3 occupations du sol - 1er niveau 43
Figure 26 : Abondance relative des catégories écologiques par occupation du sol - 1er niveau 43
Figure 27 : Répartition des 109 sites RMQS BioDiv dans le triangle des catégories écologiques 43
Figure 28 : Paramètres de diversité par occupation du sol – 1er niveau 44
Figure 29 : Abondance et biomasse lombricienne par occupation du sol (avec les forêts) 47
Figure 30 : Abondance absolue des catégories écologiques par occupation du sol – 2ème niveau 47
Figure 31 : Abondance relative des catégories écologiques par occupation du sol - 1er niveau 48
Figure 32 : Abondance absolue des catégories écologiques pour les 5 occupations du sol - 2ème niveau 48
Figure 33 : Abondance des catégories écologiques par occupation du sol – 2ème niveau 48
Figure 34 : Paramètres de diversité par occupation du sol – 2ème niveau 49
Figure 35 : Paramètres lombriciens par type de fertilisation 53
Figure 36 : Paramètres lombriciens par amendement pailleux 54
Figure 37 : Paramètres lombriciens par type de travail du sol 55
Figure 38 : Paramètres lombriciens et gestion phytosanitaire 56
Figure 39 : Biomasse lombricienne par classe d'hydromorphie 58
Figure 40 : Abondance et biomasse des épigés par année de prélèvement 2006-2007 60
Figure 41 : Abondance des épigés en fonction de l'humidité des échantillons sur les 109 sites RMQS BioDiv 62
Figure 42 : Plan factoriel (1-2) de l'analyse de co-inertie 63
Figure 43 : Plan factoriel (1-2) de l'analyse de co-inertie 64
Figure 44 : Plan factoriel (1-3) des sites de l'ACP en fonction des variables d'occupation des sols 66
Figure 45 : Plan factoriel (1-3) des sites de l'ACP en fonction de la variable « traitement phytosanitaire » 67
Figure 46 : Plan factoriel des sites de l'ACP en fonction des variables pédologiques 68
Figure 47 : Plan factoriel (1-3) des sites de l'ACP en fonction de l'année de réalisation des sites RMQS BioDiv 69
Figure 48 : Proposition de valeurs de références (baselines) pour l'abondance lombricienne 72
Figure 49 : Présentation synthétique des résultats significatifs des liens 73

Tableau 1 : Principales caractéristiques des trois catégories écologiques lombriciennes 16
Tableau 2 : Liste des 29 taxons lombriciens présents sur les sites RMQS BioDiv 17
Tableau 3 : Synthèse des résultats d'analyses géostatistiques pour les paramètres lombriciens 30
Tableau 4 : Corrélations significatives entre paramètres lombriciens et paramètres physico-chimiques 39
Tableau 5 : Synthèse des tests de Kruskal-Wallis par système d'occupation des sols – 1er niveau 43
Tableau 6 : Synthèse des tests de Kruskal-Wallis par système d'occupation des sols – 2ème niveau 46
Tableau 7 : Résultats des tests de Kruskal-Wallis avec la variable "type de fertilisation" 53
Tableau 8 : Résultats des tests de Kruskal-Wallis avec la variable "amendement pailleux" 54
Tableau 9 : Résultats des tests de Kruskal-Wallis avec la variable "travail du sol" 55
Tableau 10 : Résultats des tests de Mann-Whitney avec la variable « traitement phytosanitaire » 56
Tableau 11 : Résultats des tests de Kruskal-Wallis avec les variables pédologiques 58
Tableau 12 : Corrélations significatives entre paramètres lombriciens et paramètres de texture 59
Tableau 13 : Synthèse des tests de Mann-Whitney par année de prélèvement 61

Bibliographie

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

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

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

Bouché M.B., 1977 - Stratégies lombriciennes. *Bull. Ecol*., Paris, 25: 122-132.

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

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

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

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

Cuendet G., 1983 - Predation on earthworms by the Black-headed gull (Larus ridibundus L.). In : Satchell J.E. (Ed.). Earthworm Ecology : from Darwin to vermiculture. Chapmann & Hall, London, p 415-424.

Curry J.P., Byrne D., Boyle K.E., 1995 - The earthworm population of a winter cereal field and its effects on soil and nitrogen turnover. *Biology and Fertility of Soil*, 19: 166-172.

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.

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

Edwards C.A., 1983 - Earthworm ecology in cultivated soils. In J.E. Satchell (Ed), Earthorm ecology from Darwin to Vermiculture. Chapman and Hall, Londres. Pp. 123-137.

Edwards C.A., Lofty J.R., 1978 – The influence of arthropods and earthworms upon root growth of direct drilled cereals. *Journal of Applied Ecology*, 19: 723-724.

Granval P., 1988 - Approche écologique de la gestion de l'espace rural : des besoins de la Bécasse (Scolopax rusticola L.) à la qualité des milieux. Thèse de Doctorat, Université de Rennes 1, 199p.

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

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

Lee K.E., 1985 - Earthworms. Their ecology and relationship with soils and land use. Academic Press, Sydney, 411p.

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.

Nordström S., Rundgren S., 1974 - Environmental factors and lumbricids association in southern Sweden. *Pedobiologia*, 14:1-27.

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

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

Qiu J.P., 1998 – Interprétation environnementale intégrée de caractéristiques taxonomiques et paléogéographiques de la biodiversité. Application aux lumbricoidae (Annelida, Oligochaeta) du pourtour de la méditerranée occidentale. *Thèse de doctorat*, Université de Montpellier II. 446p + Annexes : 447-594.

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

Sheehan C., Kirwan L., Connolly J., Bolger T., 2007 – The effects of earthworm on community structure. *Pedobiologia*. 50: 479-487.

Tebrüge F., Düring R.A., 1999 - Reducing tillage intensity, a review of results from a long term study in Germany. *Soil & Tillage Research*, 53: 15-28.

Wartenberg D., 1985 - Multivariate spatial correlation: a method for exploratory geographical analysis. *Geographical Analysis*.17: 263-283.

Wyss E., Glasstetter M., 1992 - Tillage treatments and earthworm distribution in a Swiss experimental corn field. *Soil Biology and Biochemistry*, 24: 1635-1639.

Table des annexes

Annexe I : Revue de littérature de résultats lombriciens en contexte agricole breton

Annexe II : Caractérisation fonctionnelle des peuplements par les catégories écologiques

Annexe III : Statistiques descriptives des abondances des taxons lombriciens

Annexe IV : Structure des communautés lombriciennes

Annexe V : Condition de normalité des paramètres lombriciens

Annexe VI : Résultats des analyses géostatistiques sur les paramètres lombriciens

Annexe VII : Cartogrammes des abondances des taxons lombriciens

Annexe VIII : Résultats des tests de Kruskal-Wallis avec les variables pédologiques

Annexe IX : Structure des communautés en fonction des variables explicatives

Annexe I : Revue de littérature de résultats lombriciens en contexte agricole breton

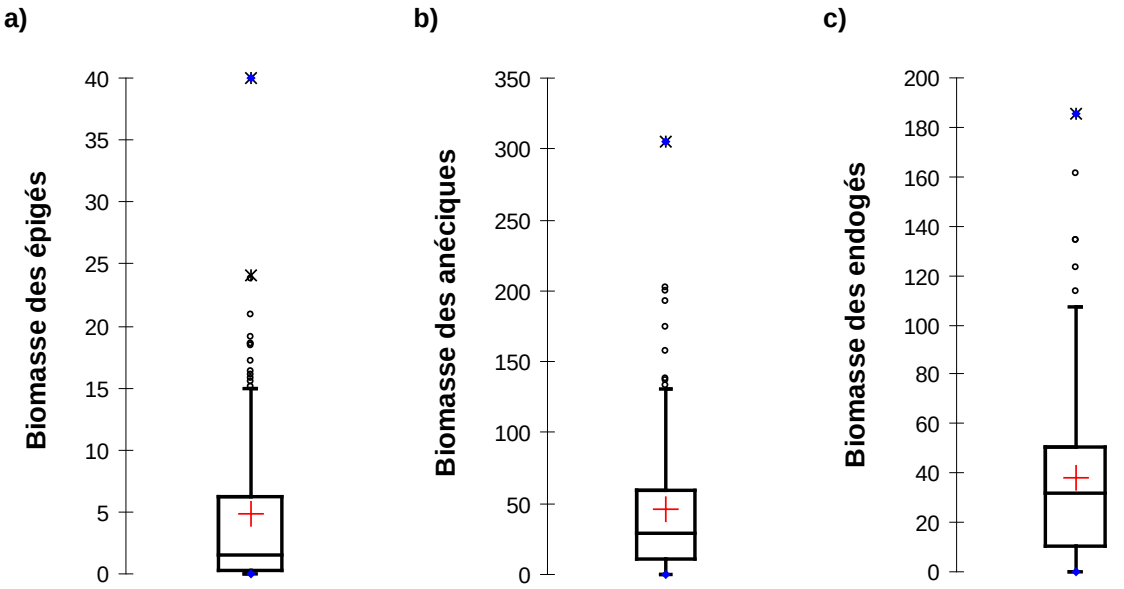
	Localisation	Contexte	Abondance (ind/m²) moyenne	Biomasse (g/m²) moyenne	Richesse taxonomique nb espèce / nb taxons	Diversité / Equitabilité
Binet, 1993	Ensemble Quimper				11 esp / 12 tax	
		Maïs Témoin	67,3	13,2	10 esp	1,72 / 0,75
		Maïs Lisier	159,3	24,8	9 esp	1,59 / 0,72
		Prairie Lisier	424,5	84,7	10 esp	1,92 / 0,83
		Prairie Témoin	495,3	128,8	10 esp	1,85 / 0,90
	Le Rheu				10 esp / 13 tax	
		Maïs Témoin	118,9	19,5	6 esp	0,74 / 0,41
		Maïs Lisier	200,1	36,6	9 esp	1,16 / 0,53
		Prairie Lisier	333,3	63,6	9 esp	1,50 / 0,68
		Prairie Témoin	731,7	232,2	10 esp	1,72 / 0,75
Cannavacciuolo, 1998	Le Rheu	Prairie	277 ± 8,9 (± SE)	nr	**8 espèces / 9 taxons**	
Pérès, 2003	Ensemble Quimper				**14 espèces / 17 taxons** 11 esp / 14 tax	
		Monoculture maïs	32,3	7,1	6 esp / 9 tax	3,1/ 0,34
		Prairie temporaire	61,7	34,8	9 esp / 12 tax	5 / 0,41
		Prairie permanente	115,6	62,1	10 esp / 13 tax	6,2 / 0,47
	Le Rheu				11 esp / 13 tax	
		Monoculture maïs	43,3	32,8	8 esp / 8 tax	4,6 / 0,58
		Prairie permanente	118	72,6	10 esp / 12 tax	7 / 0,59
Piron, 2008	Bignan				**10 taxons**	
		M – Labour	nr	nr	6 tax	2,17 / 0,84
		M – Travail sup			6 tax	1,99 / 0,84
		M - Semi direct			9 tax	1,99 / 0,84
		FV – Labour			7 tax	2,22 / 0,79
		FV – Travail sup			9 tax	2,03 / 0,64
		FV – Semi direct			7 tax	2,04 / 0,73/

nr : non renseigné

Binet, 1993 : l'indice de diversité est l'indice de Shannon
Cannavacciuolo, 1998 : les données formol seul sont utilisées
Pérès 2003 : les données formol seul sont utilisées ; l'indice de diversité est l'indice de Simpson
Piron 2008 : les données formol seul sont utilisées ; l'indice de diversité est l'indice de Shannon ; M pour minéral et FV pour fumier de volaille ; les prélèvements ont été réalisés en 2005

Annexe II : Caractérisation fonctionnelle des peuplements par les catégories écologiques

II.1 : Boîtes à moustaches de la biomasse des trois catégories écologiques lombriciennes



a) épigés, **b)** anéciques, **c)** endogés
Ces données (N=109) sont exprimées en gramme par mètre carré.
(+ : la moyenne ; barre du milieu : la médiane ; ° et * : les valeurs extrêmes ; ● : valeur minimale et maximale)

II.2 : Proportion de la biomasse des anéciques (%) dans la biomasse totale

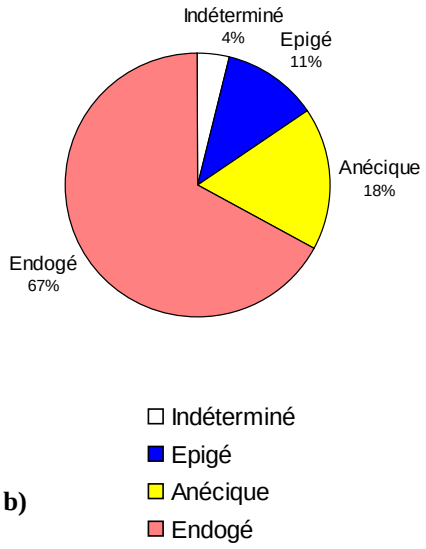
II.3 : Abondance (a) et biomasse (b) lombricienne par catégories écologiques sur les 109 sites RMQS *BioDiv*

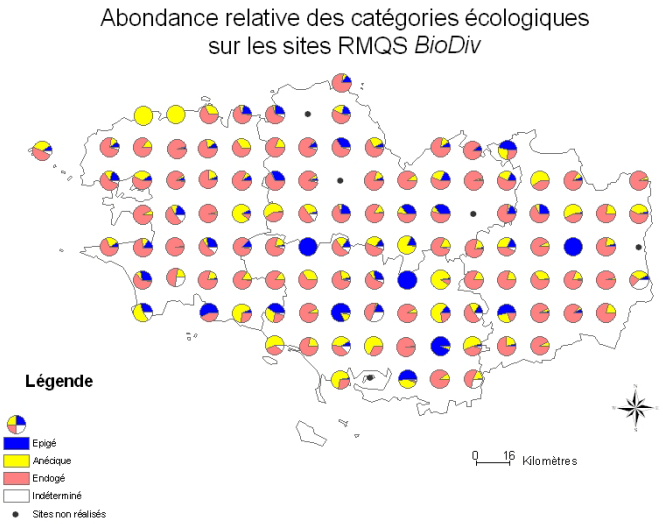
a)

b)

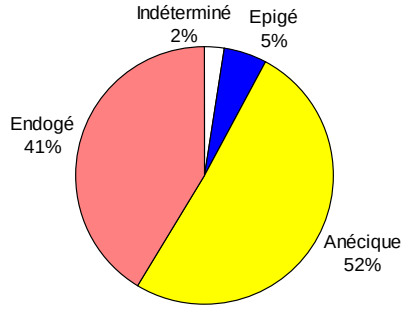
II.4 : Abondance (a) et biomasse (b) relative des catégories écologiques sur les 109 sites RMQS *BioDiv*

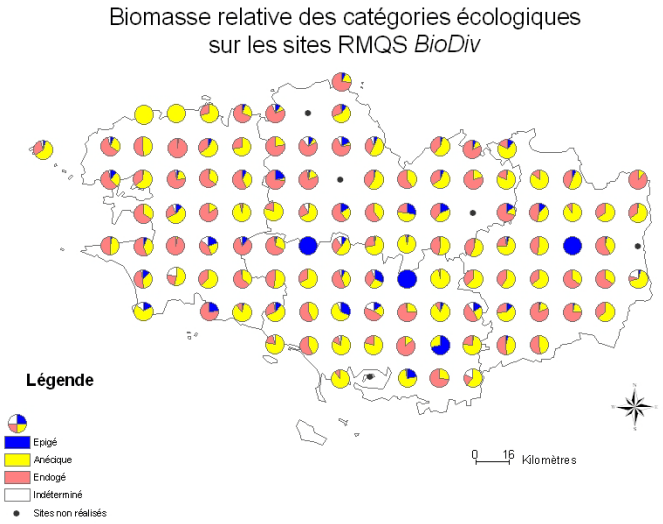
a)





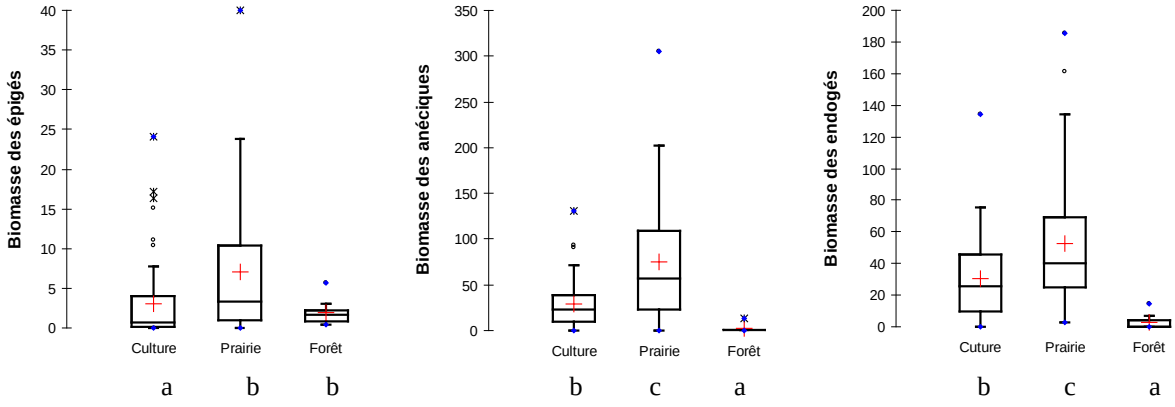
b)



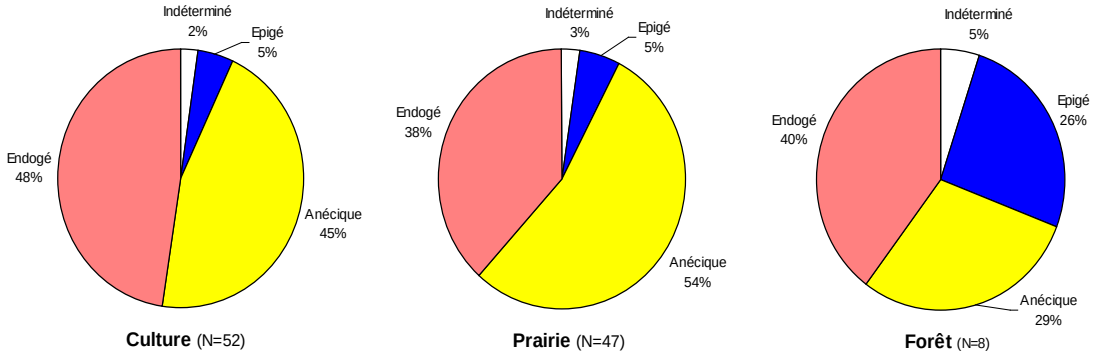


II.5 : Biomasse des catégories écologiques par occupation du sol – 1er et 2ème niveau

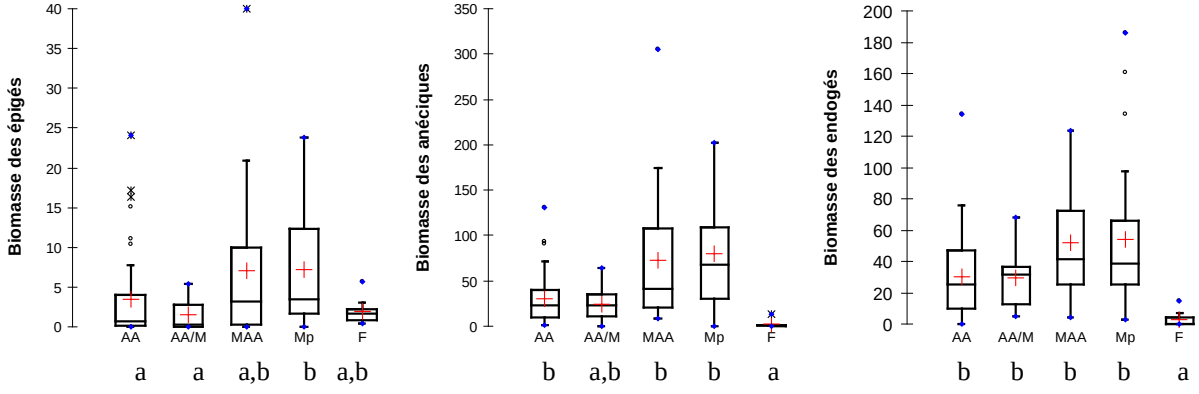
a) Premier niveau : système cultivé (N = 52), prairial (N= 47) et forestier (N = 8)

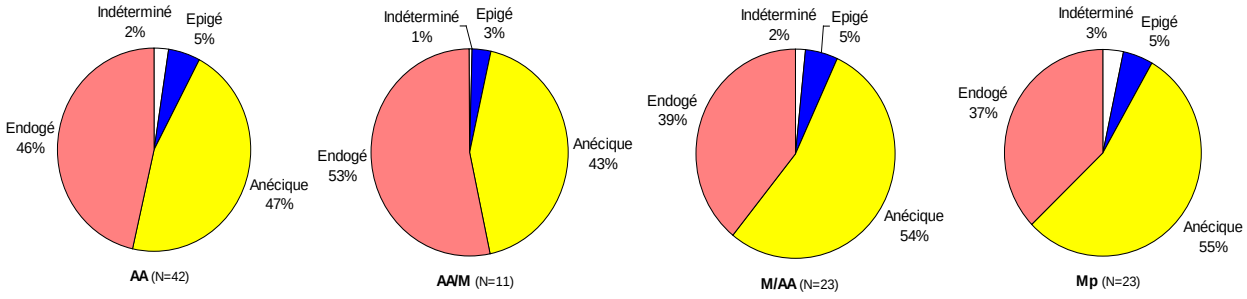


Culture (N = 52) ; Prairie (N= 47) ; Forêt (N = 8)



b) Deuxième niveau : Grande culture (AA : N = 42), Culture dans rotation grande culture-prairie (AA/M : N = 11), Prairie dans rotation grande culture-prairie (M/AA : N = 23), Prairie permanente (Mp : N = 23) et Forêt (F : N=8).





Annexe III : Statistiques descriptives des abondances des taxons lombriciens et statut lié à leur fréquence de présence sur les sites

a) formol + tri manuel

	Moyenne	Ecart-type	Médiane	Maximum	Coefficient de variation	Nb sites présents	Frequence sur les sites	Groupe
NCCT	86,17	108,03	53,33	483,00	1,25	95	87,2	ubiquiste
ARR	21,02	24,24	12,33	122,33	1,15	87	79,8	ubiquiste
LC	25,24	37,92	9,33	245,95	1,49	72	66,1	ubiquiste
ACCT	56,87	85,29	15,50	463,00	1,49	66	60,6	ubiquiste
LRR	12,62	18,45	6,10	82,35	1,45	56	51,4	ubiquiste
LT	15,79	14,96	12,83	64,58	0,94	56	51,4	ubiquiste
DM	14,73	28,48	4,00	137,33	1,91	50	45,9	intermédiaire
OC	16,51	20,43	7,00	99,33	1,22	48	44,0	intermédiaire
LRC	13,38	28,72	1,87	145,93	2,12	43	39,4	intermédiaire
NG	28,20	35,95	12,67	153,35	1,26	43	39,4	intermédiaire
AI	35,10	45,06	17,00	177,67	1,27	41	37,6	intermédiaire
NLL	16,22	18,97	8,47	68,86	1,15	30	27,5	intermédiaire
LCE	17,10	23,99	6,79	99,86	1,37	23	21,1	intermédiaire
NCCR	4,02	8,80	1,45	42,44	2,14	23	21,1	intermédiaire
NN	11,64	11,34	6,92	46,54	0,95	22	20,2	intermédiaire
NCM	14,67	20,35	8,92	91,29	1,35	20	18,3	intermédiaire
ACCA	24,43	36,67	8,17	112,33	1,42	10	9,2	rare
ACPX	1,35	1,44	0,67	4,67	1,01	9	8,3	rare
DO	15,83	21,99	7,50	68,67	1,30	8	7,3	rare
LFR	25,32	27,29	12,67	83,46	1,00	7	6,4	rare
EE	0,73	0,60	0,33	1,67	0,73	5	4,6	rare
LFE	12,09	24,53	1,33	55,97	1,81	5	4,6	rare
DA	3,42	1,42	3,00	5,33	0,36	4	3,7	rare
DRR	0,92	0,79	0,67	2,00	0,74	4	3,7	rare
AM	54,17	7,31	54,17	59,33	0,10	2	1,8	rare
DPC	13,33	13,20	13,33	22,67	0,70	2	1,8	rare
ET	5,00	6,13	5,00	9,33	0,87	2	1,8	rare
OLL	3,83	2,12	3,83	5,33	0,39	2	1,8	rare
NCU	18,00		18,00	18,00		1	0,9	rare

b) formol uniquement

	Moyenne	Ecart-type	Médiane	Maximum	Coefficient de variation	Nb sites présents	Frequence sur les sites	Groupe
NCCT	33,20	43,59	17,14	211,52	1,31	95	87,2	ubiquiste
ARR	4,22	6,51	2,00	37,67	1,53	83	76,1	ubiquiste
LC	12,27	12,93	6,26	48,33	1,05	72	66,1	ubiquiste
ACCT	13,24	15,31	7,17	71,67	1,15	66	60,6	ubiquiste
LRR	8,18	12,42	3,67	71,54	1,50	58	53,2	ubiquiste
LT	13,39	14,12	9,48	75,56	1,04	56	51,4	ubiquiste
DM	7,53	13,22	1,67	56,33	1,74	49	45,0	intermédiaire
OC	5,47	6,43	3,00	26,00	1,16	47	43,1	intermédiaire
LRC	8,29	14,63	2,07	67,43	1,74	44	40,4	intermédiaire
NG	13,43	19,42	6,00	116,53	1,43	43	39,4	intermédiaire
AI	6,05	10,87	2,00	55,00	1,77	38	34,9	intermédiaire
NLL	8,80	10,43	4,67	43,50	1,17	29	26,6	intermédiaire
LCE	12,65	15,44	5,00	57,74	1,19	23	21,1	intermédiaire
NCCR	1,49	1,12	1,20	5,28	0,73	23	21,1	intermédiaire
NN	6,61	7,33	4,76	31,12	1,08	22	20,2	intermédiaire
NCM	7,06	7,21	4,50	22,77	0,99	20	18,3	intermédiaire
ACCA	7,37	6,44	5,50	21,67	0,83	10	9,2	rare
ACPX	1,13	1,14	0,50	3,33	0,94	8	7,3	rare
DO	16,75	19,47	11,67	63,33	1,09	8	7,3	rare
LFR	26,29	24,38	16,67	61,56	0,86	7	6,4	rare
EE	0,73	0,60	0,33	1,67	0,73	5	4,6	rare
LFE	2,68	3,55	1,33	9,00	1,18	5	4,6	rare
DA	5,25	3,19	4,50	9,67	0,53	4	3,7	rare
DRR	0,92	0,79	0,67	2,00	0,74	4	3,7	rare
AM	0,83	0,24	0,83	1,00	0,20	2	1,8	rare
DPC	5,33	1,89	5,33	6,67	0,25	2	1,8	rare
ET	2,33	2,36	2,33	4,00	0,71	2	1,8	rare
OLL	2,33		2,33	2,33		1	0,9	rare
NCU	12,67		12,67	12,67		1	0,9	rare

Annexe IV : Structure des communautés lombriciennes

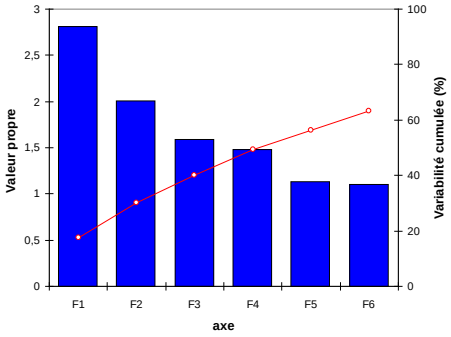
Le tableau ci-dessous présente les codes des taxons et les regroupements réalisés pour les différentes analyses en composantes principales.

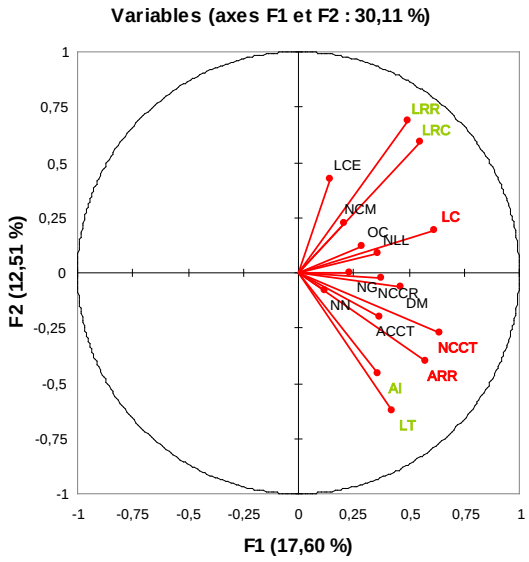
ACP_1 ensemble de la communauté	**ACP_2** ubiquistes et intermédiaires	**ACP_3** regroupement de taxons
109 sites	*101 sites*	*101 sites*
DA		
DM	DM	DM
DO		
DPC		
DRR		
EE		
ET		
LC	LC	LC - LRC
LRC	LRC	
LRR	LRR	LRR
LFR		LFR - LFE
LFE		
LCE	LCE	LCE - LT
LT	LT	
NG	NG	NG - NLL
NLL	NLL	
NN	NN	NN
NCM	NCM	NCM
ACCA		ACCA - ACCT
ACCT	ACCT	
ACPX		
AI	AI	AI
AM		
ARR	ARR	ARR
NCCR	NCCR	NCCR - NCCT
NCCT	NCCT	
NCU		
OC	OC	OC
OLL		
29 taxons	**16 taxons**	**13 taxons**

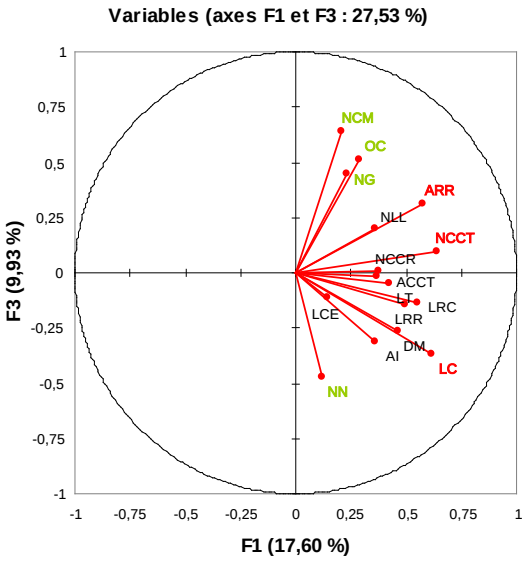
Cette annexe présente le résultat d'ACP_2 qui correspond au tableau d'abondance de 16 taxons ubiquistes et intermédiaires (log x+1 transformé, formol) sur 101 sites agricoles.

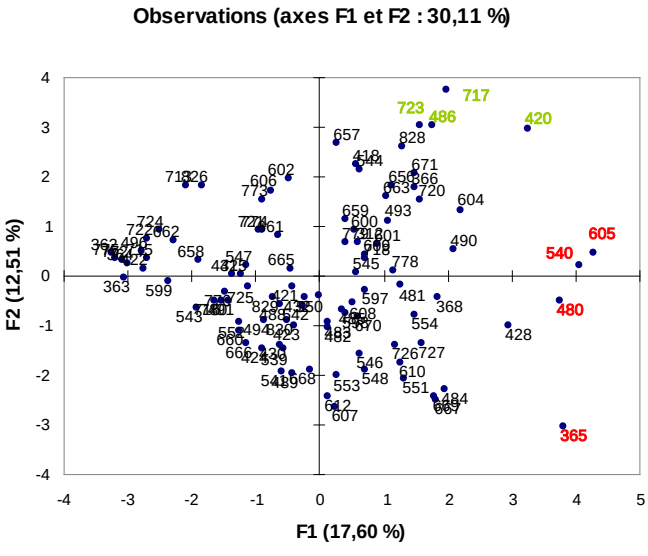
30 % de l'inertie totale de tableau est extraite par les deux premiers axes, et 40 % par les trois premiers axes. L'axe 1 explique 17,5 %, l'axe 2 12,5% et l'axe 3 10 %.

Les trois taxons dominants (NCCT, ARR et LC) contribuent positivement à la construction de l'axe 1 et ne sont opposés à aucun autre taxon. Sur l'axe 2, les taxons LT et AI s'opposent aux *Lumbricus rubellus* (LRC et LRR) (Figure 14).









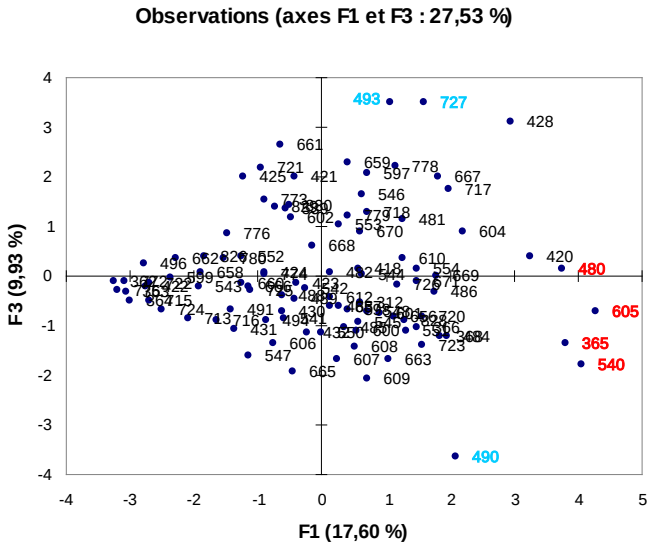


Figure : Plans factoriels de l'ACP sur les taxons dominants
données formol

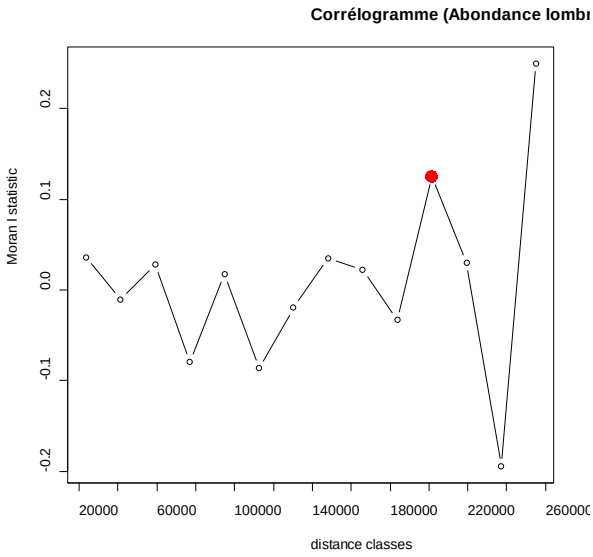
Annexe V : Condition de normalité des paramètres lombriciens

Paramètres lombriciens	Transformation des données	Nombre de sites restants	Sites écartés
AB/m² (FTM)	box-cox (λ = 0,344)	109	
AB/m² (F)	box-cox (λ = 0,345)	109	
BIO/m² (FTM)	box-cox (λ = 0,362)	109	
BIO/m² (F)	box-cox (λ = 0,312)	109	
AB_anécique (FTM)	box-cox (λ = 0,228)	105	603, 611, 664 et 715
AB_endogé (FTM)	box-cox (λ = 0,335)	101	362, 363, 603, 611, 664, 713, 719, 777
AB_épigé (FTM)	box-cox (λ = 0,25)	109	
BIO_anécique (FTM)	box-cox (λ = 0,262)	105	603, 611, 664 et 715
BIO_endogé (FTM)	box-cox (λ = 0,344)	101	362, 363, 603, 611, 664, 713, 719, 777
BIO_épigé (FTM)	box-cox (λ = 0,091)	97	362, 363, 364, 489, 539, 553, 599, 607, 661, 772, 775, 829
Richesse taxo (FTM)			
Diversité (FTM)	box-cox (λ = 1,520)	106	362, 363, 611
Equitabilité (FTM)	box-cox (λ = 2,026)	106	362, 363, 611
Richesse taxo (F)			
Diversité taxo (F)	box-cox (λ = 1,537)	106	362, 363, 611
Equitabilité (F)	box-cox (λ = 2,336)	106	362, 363, 611

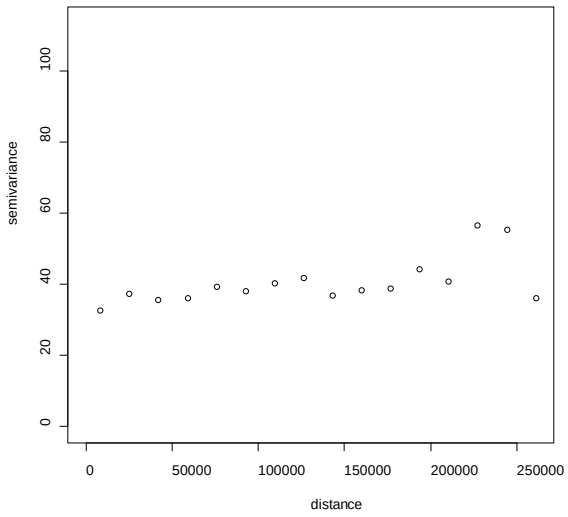
Annexe VI : Résultats des analyses géostatistiques sur les paramètres lombriciens

II.1 : Corrélogramme (a) et variogramme (b) de l'abondance lombricienne (AB – FTM)

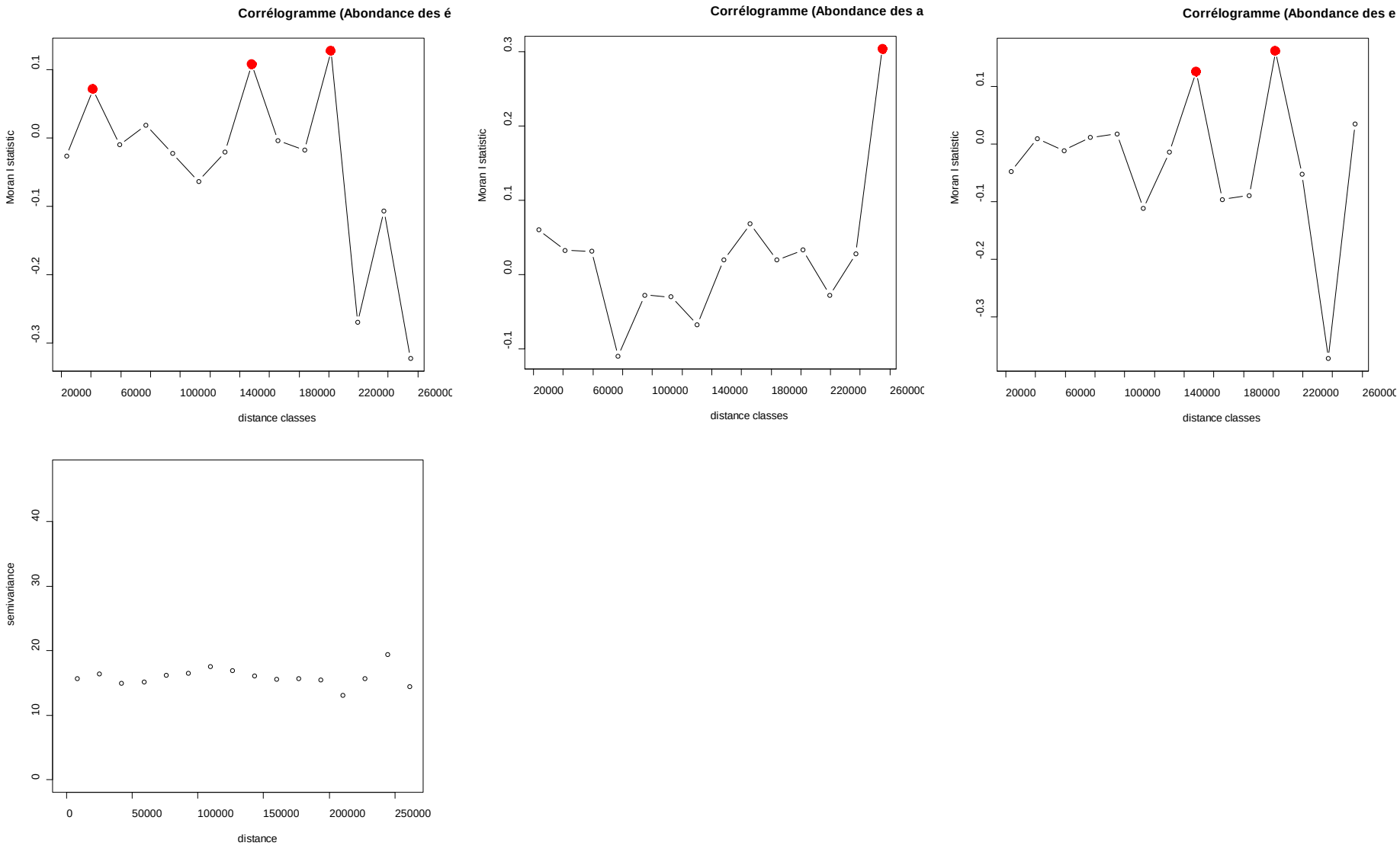
a)



b)

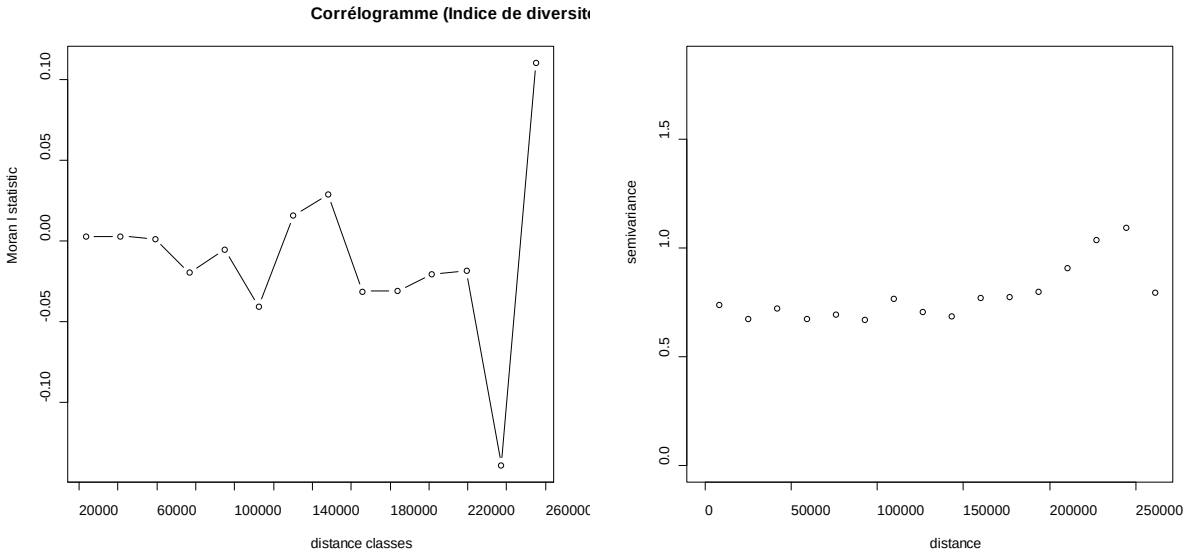


II.3: Corrélogramme (a) et variogramme (b) de l'abondance des catégories écologiques



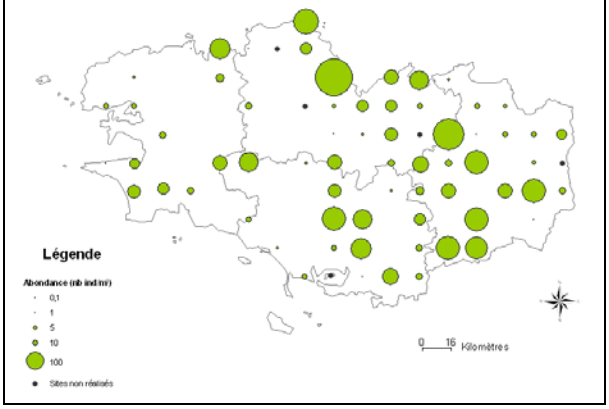
II.4 : Corrélogramme (a) et variogramme (b) de l'indice de diversité (DIV_FTM)

a) **b)**

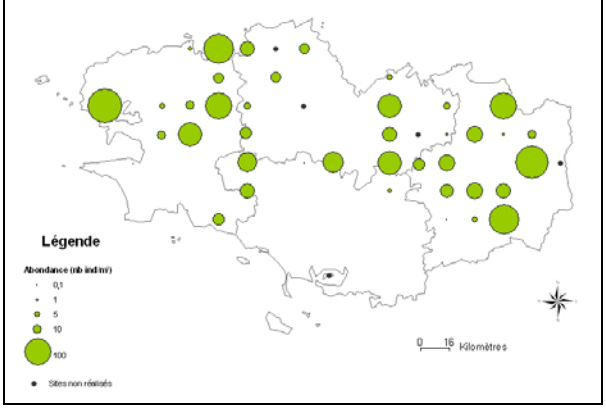


Annexe VII : Cartes des abondances des taxons lombriciens

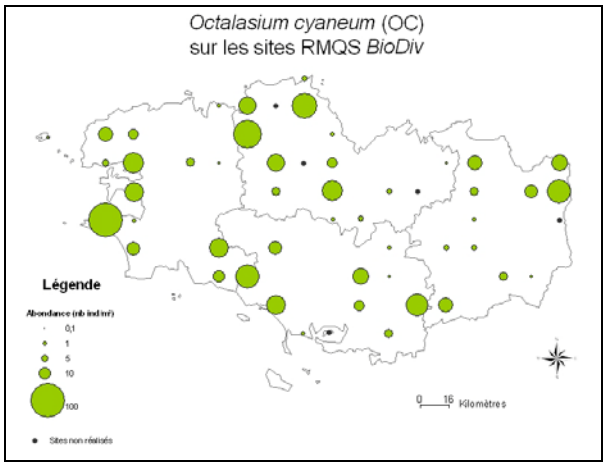
Allolobophora chlorotica chlorotica typica (ACCT)
sur les sites RMQS *BioDiv*



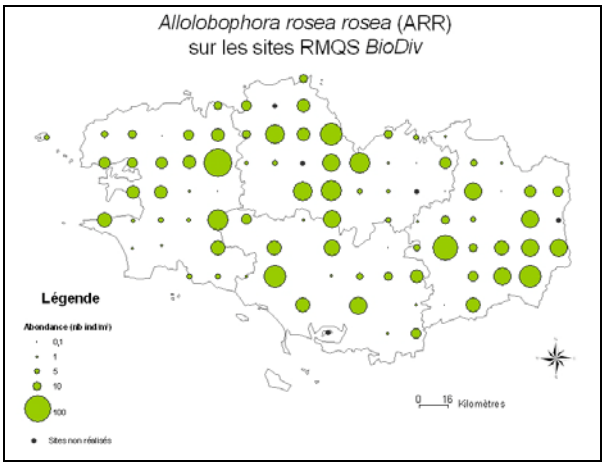
Allolobophora icterica (AI)
sur les sites RMQS *BioDiv*



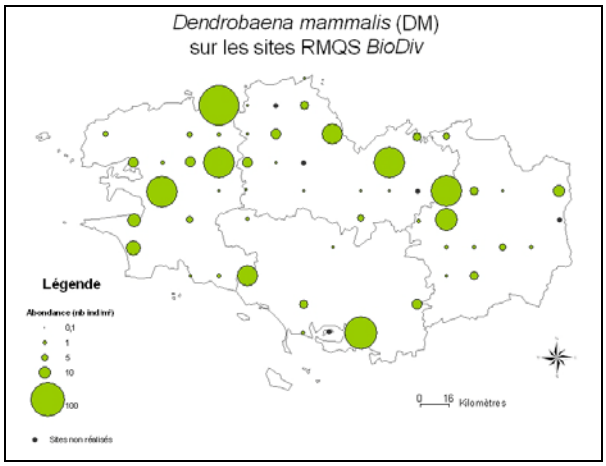
Octalasium cyaneum (OC)
sur les sites RMQS *BioDiv*



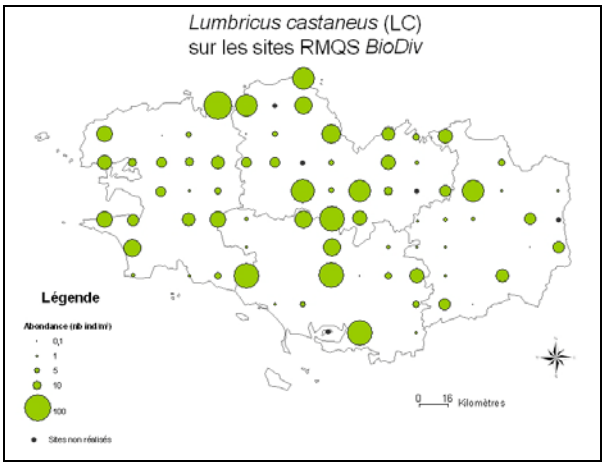
Allolobophora rosea rosea (ARR)
sur les sites RMQS *BioDiv*



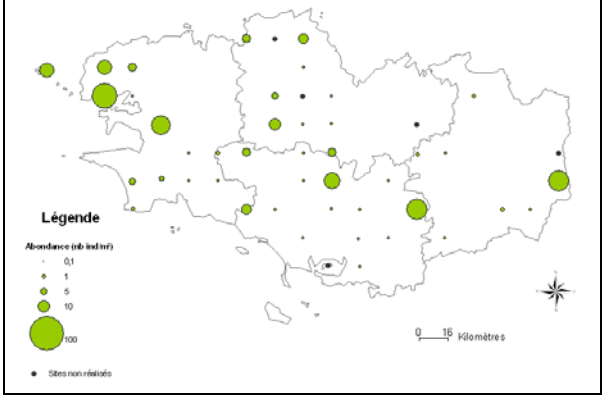
Dendrobaena mammalis (DM)
sur les sites RMQS *BioDiv*



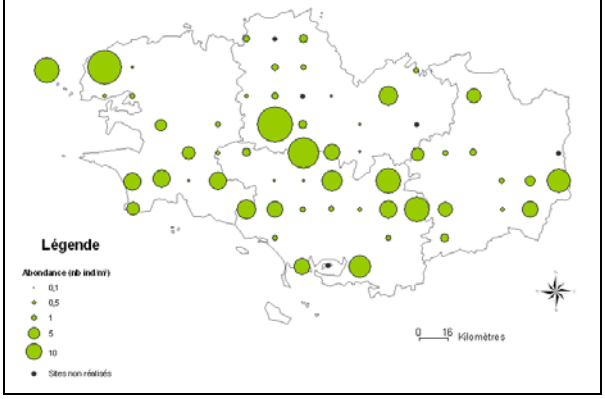
Lumbricus castaneus (LC)
sur les sites RMQS *BioDiv*



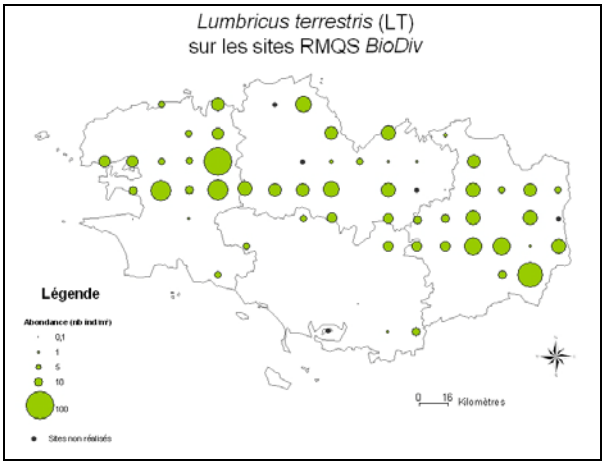
Lumbricus rubellus castaneus (LRC)
sur les sites RMQS *BioDiv*



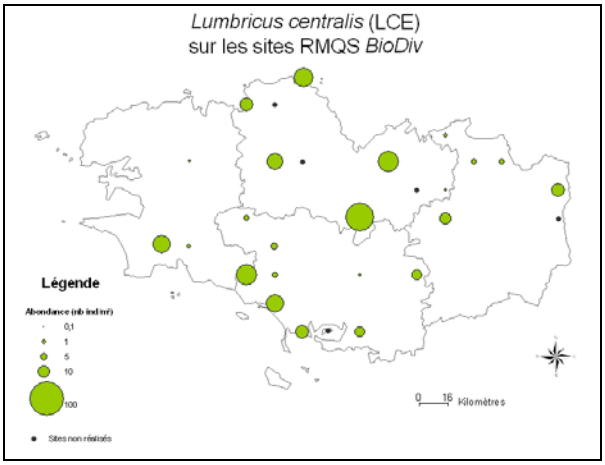
Lumbricus rubellus rubellus (LRR)
sur les sites RMQS *BioDiv*



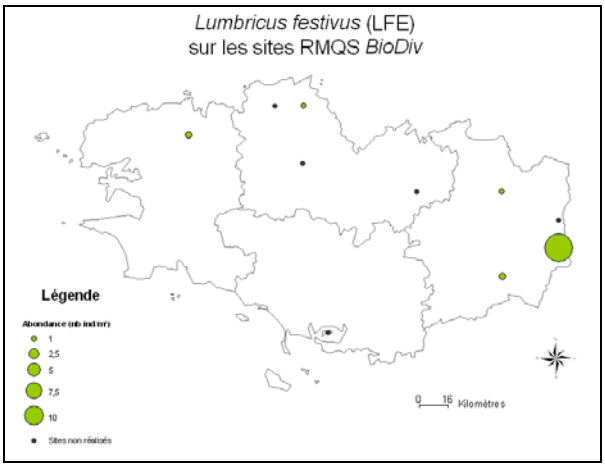
Lumbricus terrestris (LT)
sur les sites RMQS *BioDiv*



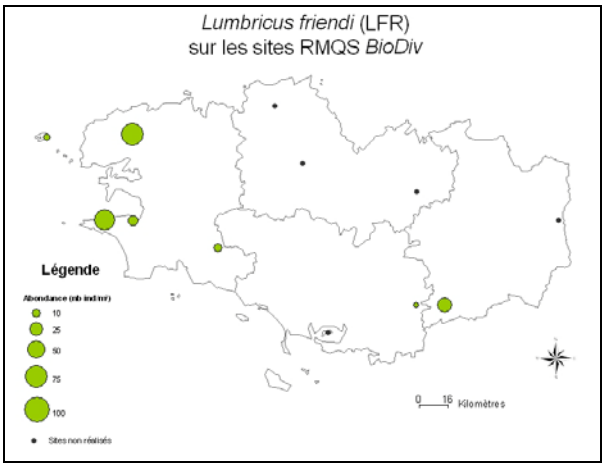
Lumbricus centralis (LCE)
sur les sites RMQS *BioDiv*



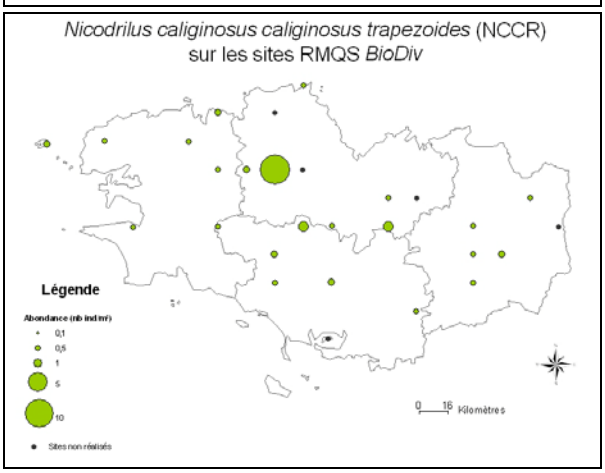
Lumbricus festivus (LFE)
sur les sites RMQS *BioDiv*



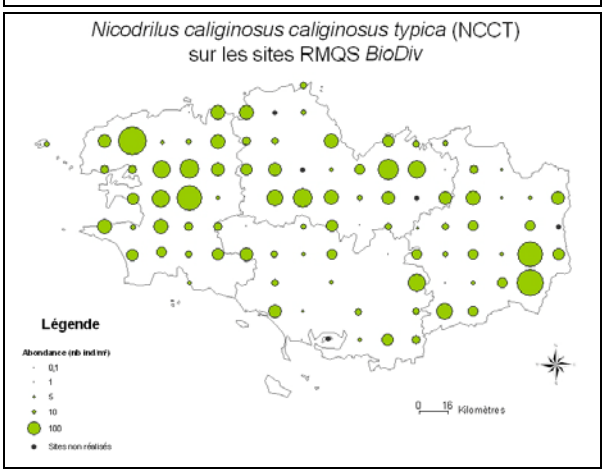
Lumbricus friendi (LFR)
sur les sites RMQS *BioDiv*

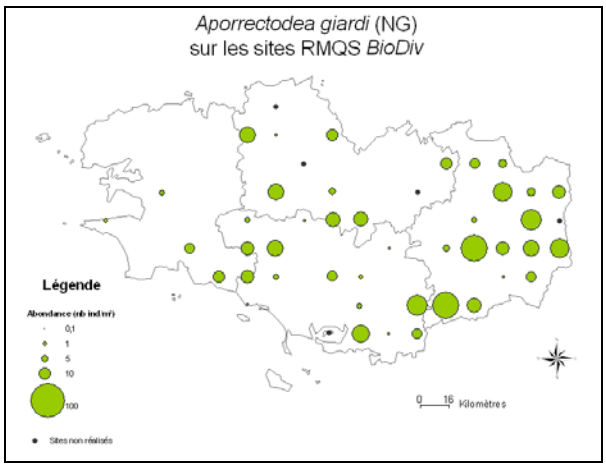


Nicodrilus caliginosus caliginosus trapezoides (NCCR)
sur les sites RMQS *BioDiv*

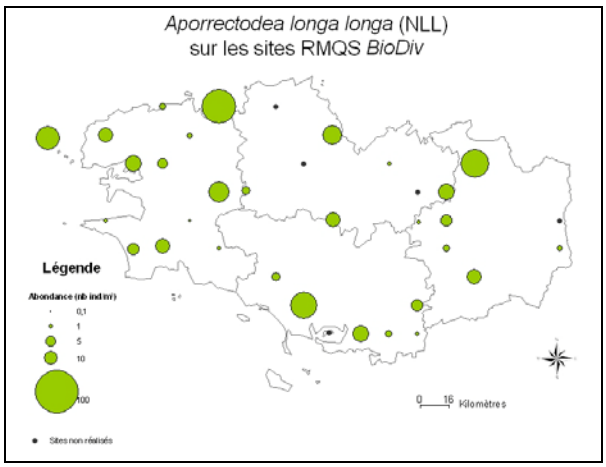


Nicodrilus caliginosus caliginosus typica (NCCT)
sur les sites RMQS *BioDiv*

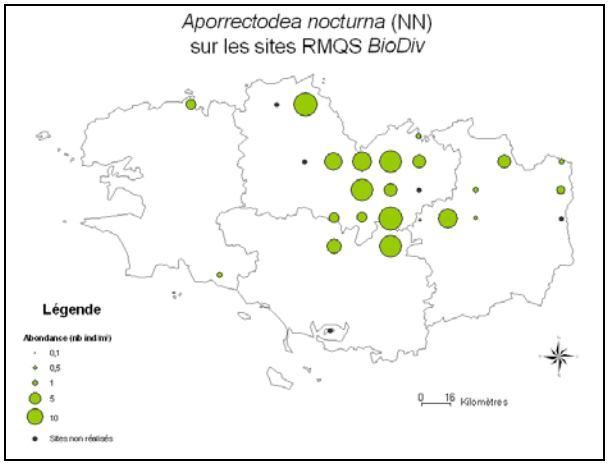




Aporrectodea giardi (NG)
sur les sites RMQS *BioDiv*



Aporrectodea longa longa (NLL)
sur les sites RMQS *BioDiv*



Aporrectodea nocturna (NN)
sur les sites RMQS *BioDiv*

Annexe VIII : Résultats des tests de Kruskal-Wallis avec les variables pédologiques

Géologie

Paramètres lombriciens	MW	p.value	significativité
Abondance lombricienne (FTM)	11,74	0,16	ns
Biomasse lombricienne (FTM)	10,08	0,26	ns
Abondance lombricienne (F)	11,70	0,17	ns
Biomasse lombricienne (F)	11,66	0,17	ns
Abondance des épigés	14,76	0,06	ns
Abondance des anéciques	3,57	0,89	ns
Abondance des endogés	11,32	0,18	ns
Biomasse des épigés	8,55	0,38	ns
Biomasse des anéciques	12,49	0,13	ns
Biomasse des endogés	15,14	0,06	ns
Richesse taxonomique	3,54	0,90	ns
Indice de diversité	7,55	0,48	ns
Equitabilité	10,94	0,20	ns

Profil de sol

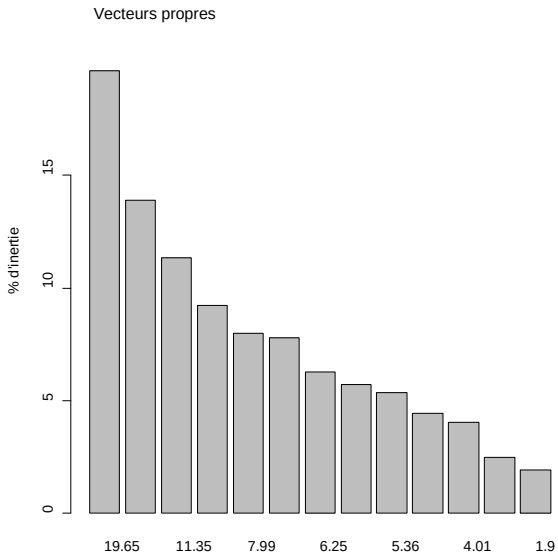
Paramètres lombriciens	MW	p.value	significativité
Abondance lombricienne (FTM)	1,82	0,40	ns
Biomasse lombricienne (FTM)	5,21	0,07	ns
Abondance lombricienne (F)	2,53	0,28	ns
Biomasse lombricienne (F)	4,00	0,14	ns
Abondance des épigés	0,16	0,92	ns
Abondance des anéciques	0,67	0,71	ns
Abondance des endogés	3,31	0,19	ns
Biomasse des épigés	1,56	0,46	ns
Biomasse des anéciques	4,76	0,09	ns
Biomasse des endogés	0,21	0,90	ns
Richesse taxonomique	1,60	0,45	ns
Indice de diversité	4,81	0,09	ns
Equitabilité	2,96	0,23	ns

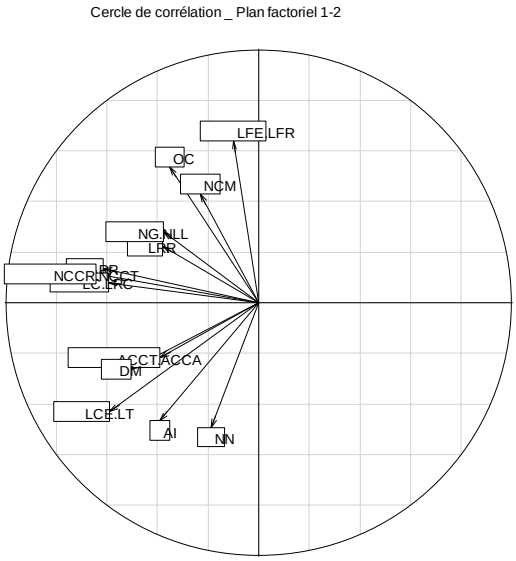
Profondeur

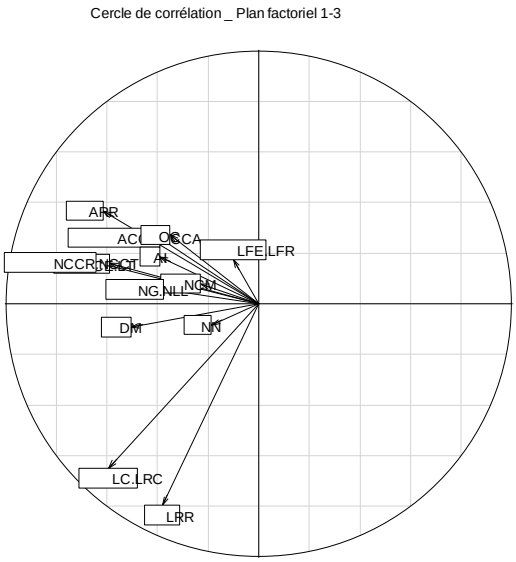
Paramètres lombriciens	MW	p.value	significativité
Abondance lombricienne (FTM)	2,79	0,43	ns
Biomasse lombricienne (FTM)	3,87	0,28	ns
Abondance lombricienne (F)	3,77	0,29	ns
Biomasse lombricienne (F)	4,16	0,24	ns
Abondance des épigés	1,99	0,57	ns
Abondance des anéciques	7,02	0,07	ns
Abondance des endogés	2,70	0,44	ns
Biomasse des épigés	2,03	0,57	ns
Biomasse des anéciques	6,87	0,08	ns
Biomasse des endogés	1,49	0,69	ns
Richesse taxonomique	1,47	0,69	ns
Indice de diversité	1,88	0,60	ns
Equitabilité	0,78	0,85	ns

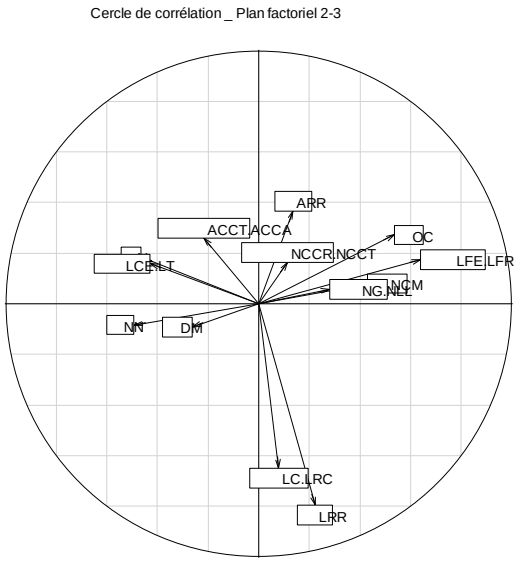
Annexe IX : Structure des communautés en fonction des variables explicatives

Afin d'étudier la structure des communautés lombricienne face aux différentes variables explicatives, les plans factoriels des sites (1-2, 1-3 et 2-3) de l'ACP sur les abondances de 13 taxons lombriciens sont illustrés en fonction de variables de « pratiques agricoles » et « pédologiques ».

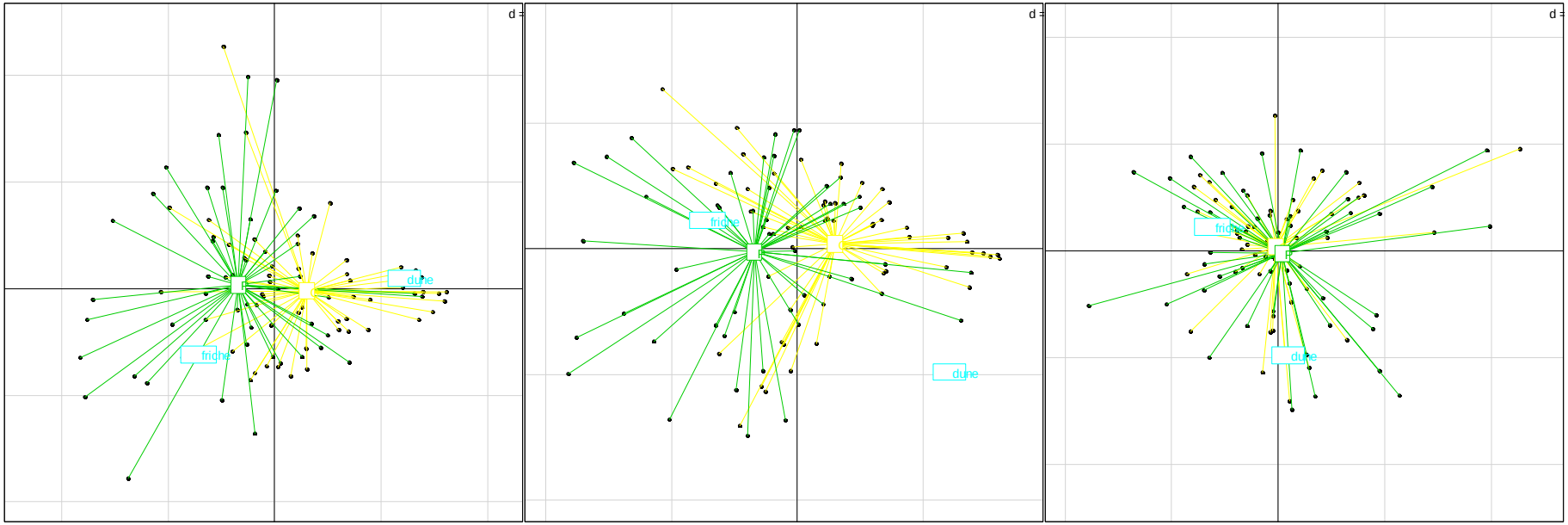




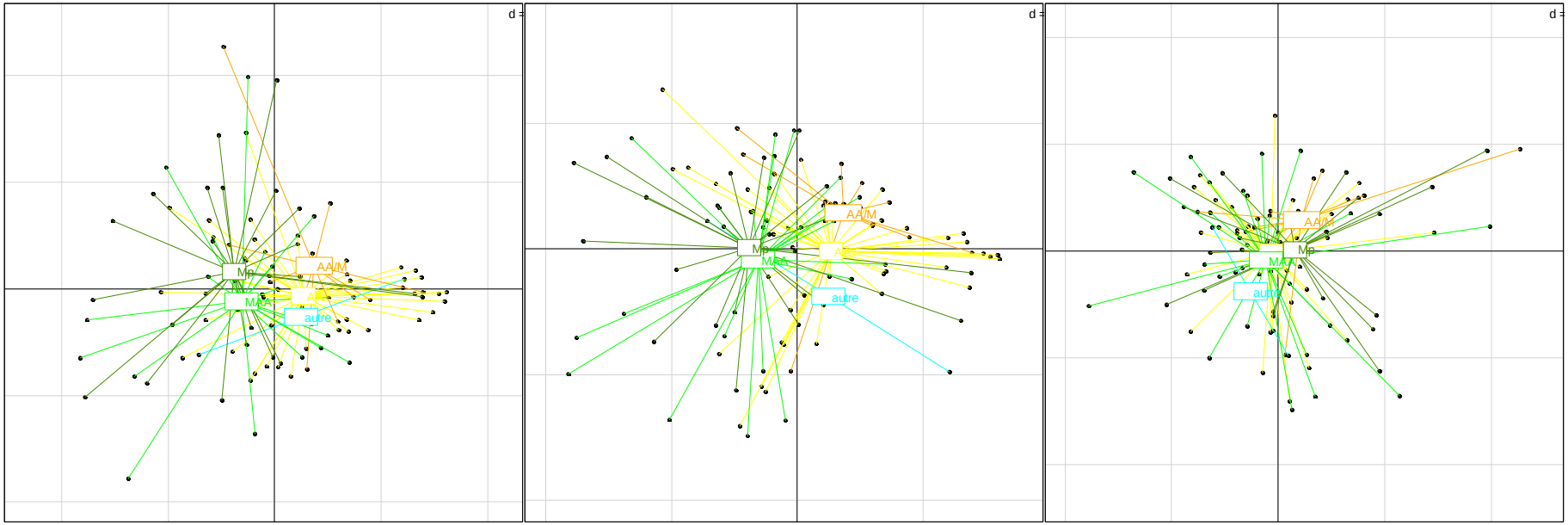




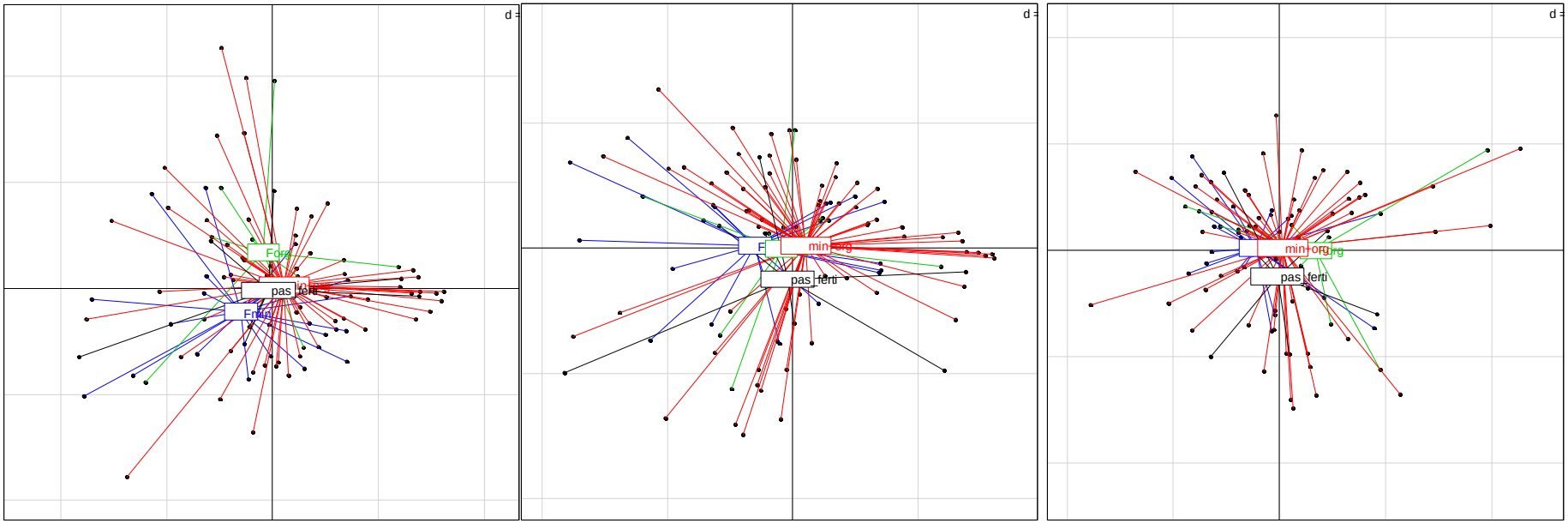
IX.1 : Structure des communautés lombriciennes et « occupation du sol – 1er niveau »



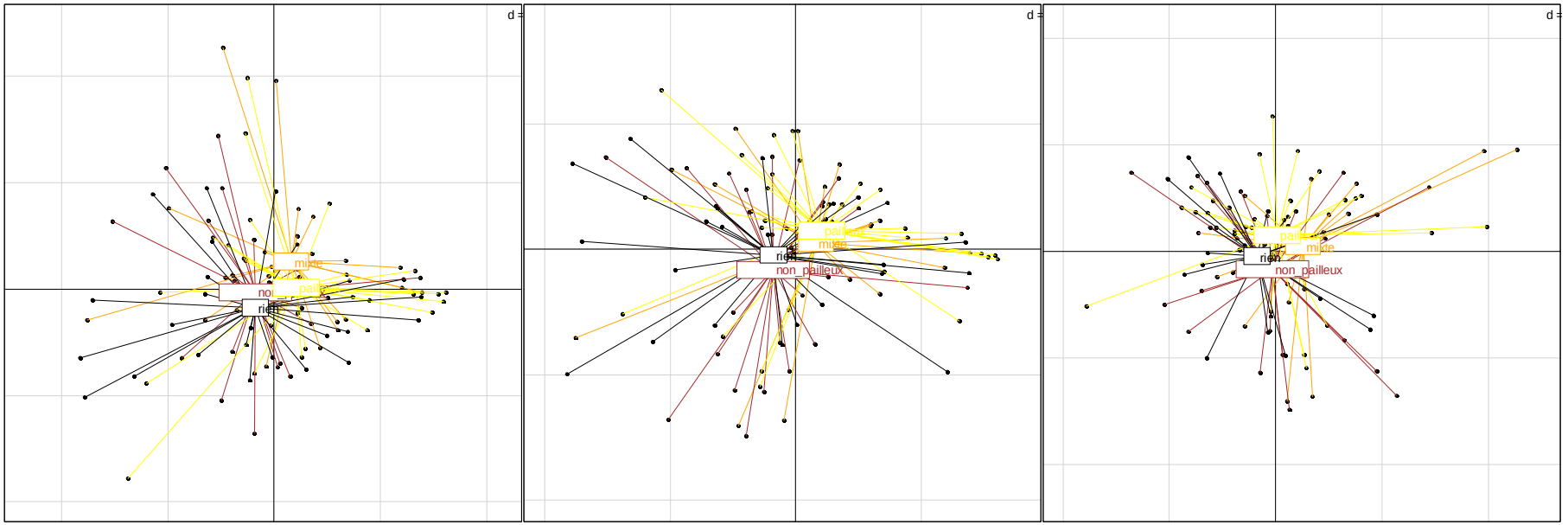
IX.2 : Structure des communautés lombriciennes et « occupation du sol – 2ème niveau »



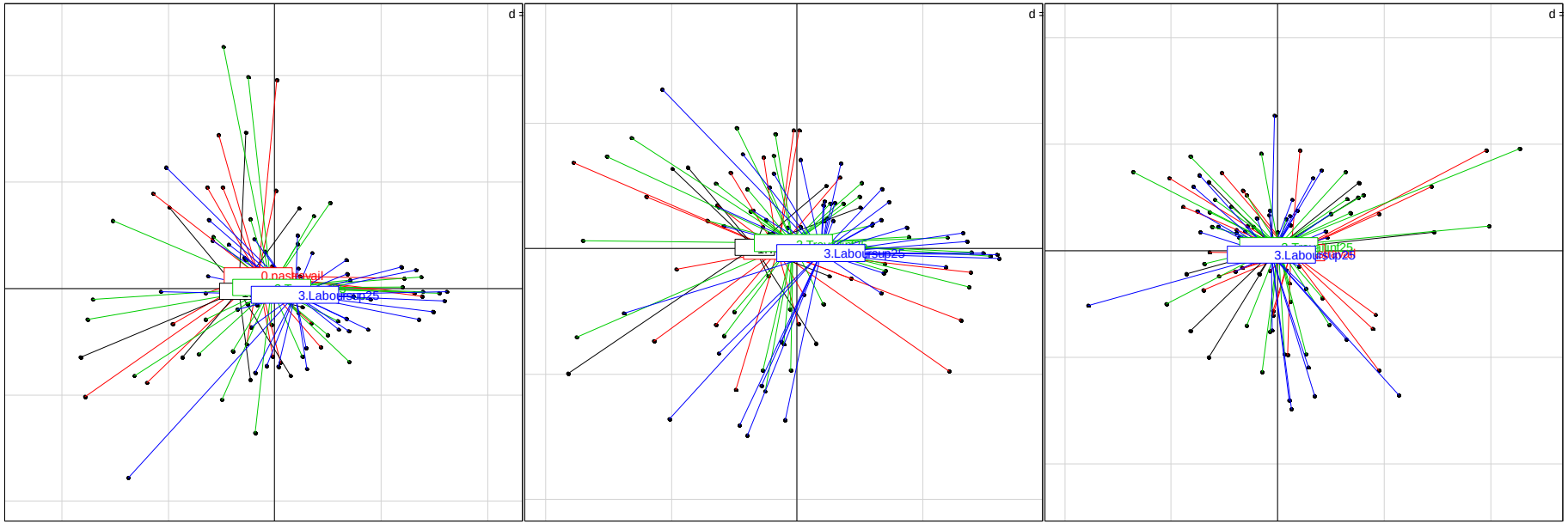
IX.3 : Structure des communautés lombriciennes et « type de fertilisation »



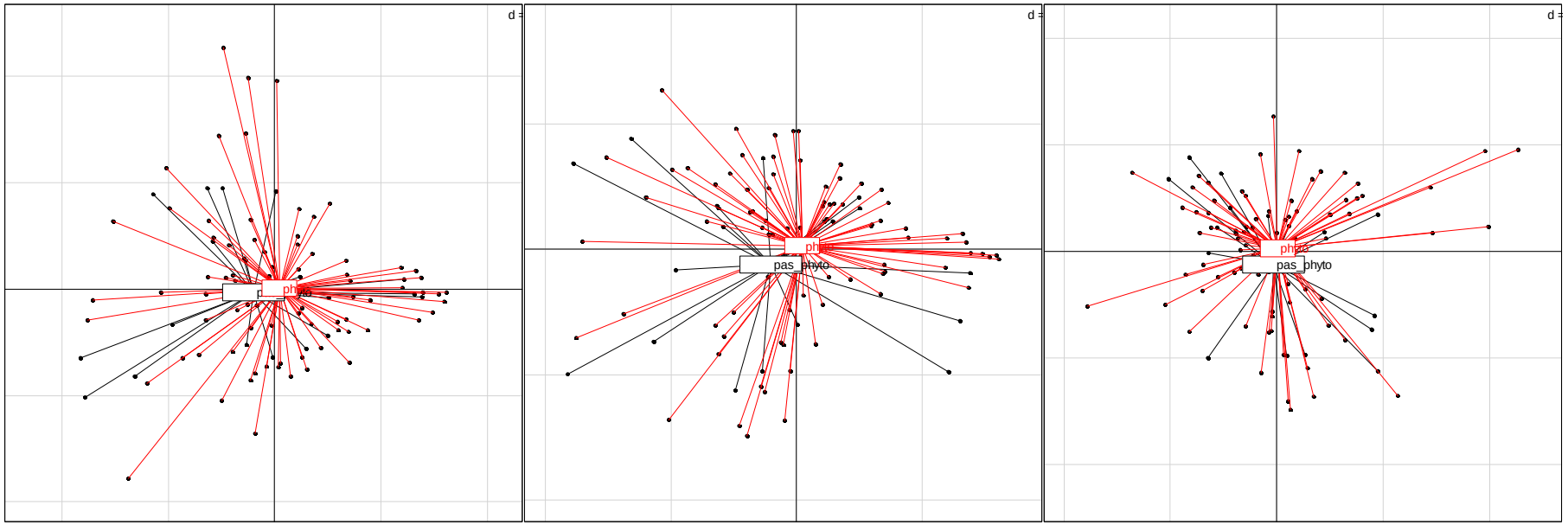
IX.4 : Structure des communautés lombriciennes et « amendement pailleux »



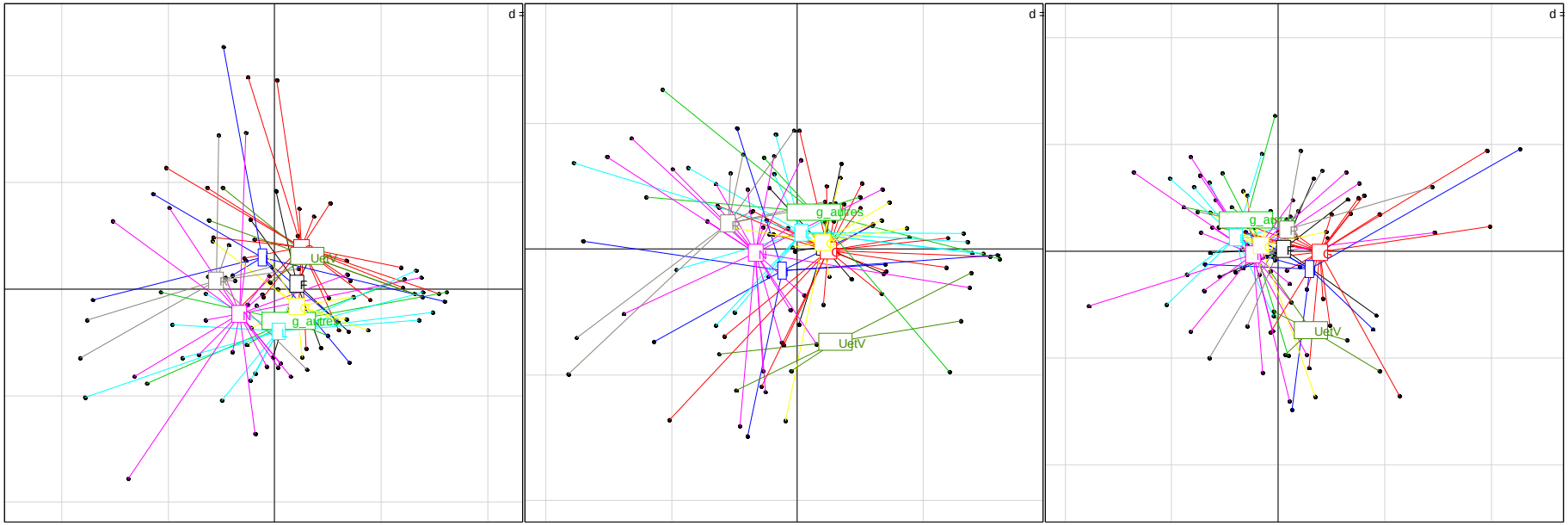
IX.5 : Structure des communautés lombriciennes et « travail du sol »



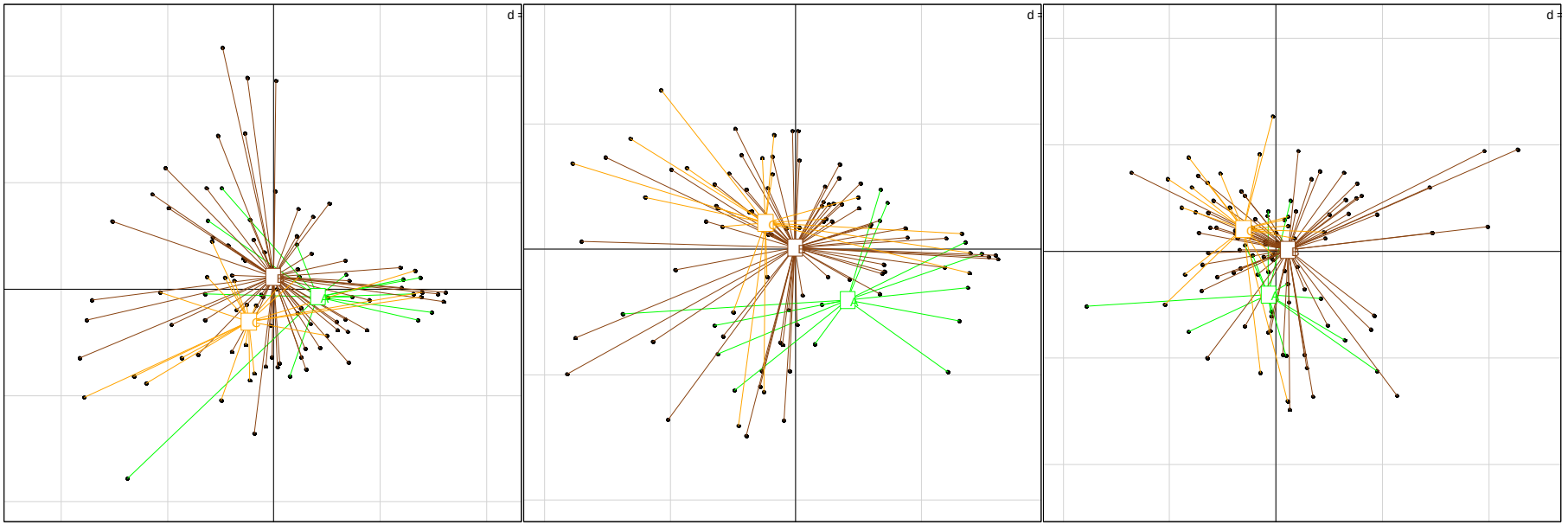
IX.6 : Structure des communautés lombriciennes et « traitements phytoparasitaires »



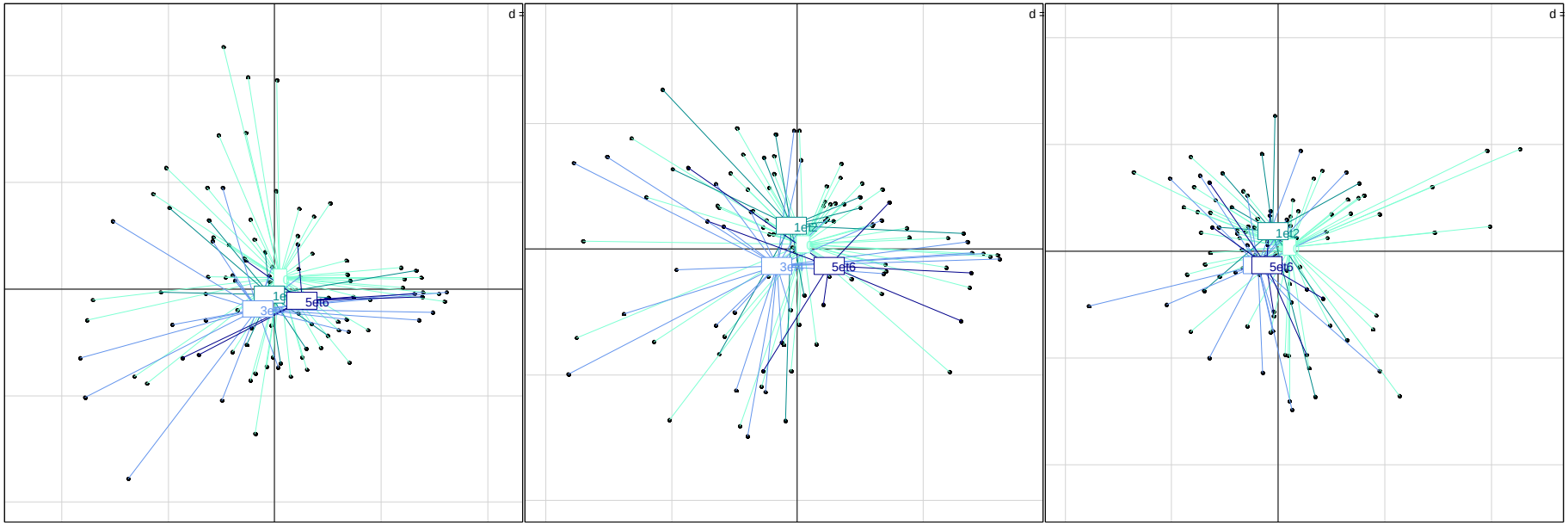
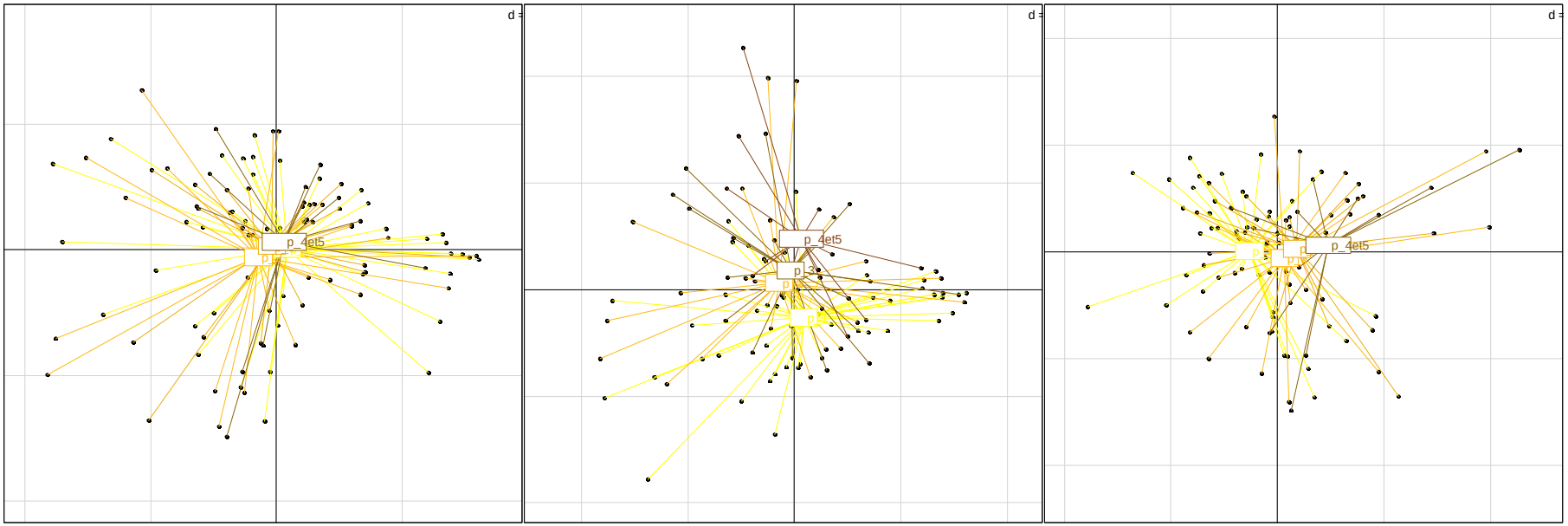
IX.7 : Structure des communautés lombriciennes et « géologie »



IX.8 : Structure des communautés lombriciennes et « profil de sol »



IX.9 : Structure des communautés lombriciennes et « hydromorphie »



IX.10 : Structure des communautés lombriciennes et « profondeur »