Nancy-Université
INPL

AVERTISSEMENT

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.
Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur au même titre que sa version papier. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.
D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite entraîne une poursuite pénale.

Contact SCD INPL: mailto:scdinpl@inpl-nancy.fr

LIENS

Code de la propriété intellectuelle. Articles L 122.4
Code de la propriété intellectuelle. Articles L 335.2 – L 335.10
http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php
http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm

Nancy-Université
INPL

INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE LORRAINE

ECOLE DOCTORALE : Sciences et Ingénierie des Ressources, Procédés, Produits, Environnement

Laboratoire Sols et Environnement

THÈSE en sciences agronomiques

Présentée et soutenue publiquement le 17/12/2010

Par

Benjamin PEY

Contribution de la faune du sol au fonctionnement et à l'évolution des Technosols

Directeur de thèse : Christophe SCHWARTZ, Professeur, INPL/ENSAIA
Co-directeur de thèse : Jérôme CORTET Maître de conférences, INPL/ENSAIA

Composition du jury :

Président du jury (Examinateur) : Jean-François PONGE Professeur, CNRS/MNHN
Rapporteurs : Jean-Michel GOBAT Professeur, Université de Neuchâtel, Suisse
Christian WALTER Professeur, Agrocampus Ouest
Membre invitée : Isabelle FEIX Ingénieur ADEME

Remerciements

Résumer trois années de relations humaines en quelques lignes de textes figés est une tâche au moins aussi délicate que de synthétiser les résultats d'une thèse par un manuscrit. Qu'elle soit citée ou pas dans la liste qui va suivre, je souhaite exprimer mes sincères remerciements à toutes les personnes qui de près ou de loin ont contribué à me faire avancer tout au long de ce chemin. Aujourd'hui grâce à eux, j'ai la fierté de vous présenté mon travail. Mais vous l'avez compris, cela ne s'arrête pas à ces mots et j'espère que chacun a pris la mesure de ma reconnaissance.

Tout d'abord, je souhaite vivement remercier **Christophe SCHWARTZ** et **Jérôme CORTET**, qui m'ont tous deux fait confiance lors de la construction de ce projet de thèse. Si je dois garder une image forte de chacun, je dirais que Christophe par son amour des sciences du sol m'a formidablement convaincu de poursuivre l'expérience commune que nous avions à l'ENSAIA par la thèse. J'ai aussi beaucoup appris de sa rigueur (parfois un peu extrême) et ces qualités humaines : disponibilité, bonne humeur communicative et bien d'autres... Je ne remercierais jamais assez Jérôme de m'avoir fait découvrir le monde merveilleux de la faune du sol qui je crois est un des domaines de la science du sol qui présentent les défis les plus passionnants dans les prochaines années. Je le remercie aussi pour son amabilité et son ouverture d'esprit, qualités rares et précieuses. Je suis également très touché du fait que mes directeurs de thèse m'ont toujours projeté sur le devant de la scène dans les congrès, dans les réunions en mettant en valeur mon travail, opération que mon esprit trop cartésien a eu parfois du mal à faire. Merci à eux pour tout cela et bien d'autres choses qui me permettent d'assumer aujourd'hui un solide statut de chercheur et plus simplement de jeune étudiant fan de l'olympique lyonnais.

Je poursuivrai en remerciant les autres membres de mon jury : **Jean-Michel GOBAT**, **Christian WALTER**, **Jean-François PONGE** et **Isabelle FEIX** pour avoir pris le temps de lire mon travail et de l'avoir jugé.

Je tiens à exprimer ma gratitude à **Antonio BISPO** qui m'a suivi tout au long de mon parcours et mis en relief mon travail au sein des problématiques de l'ADEME. Ensaien lui aussi, je le remercie pour son contact facile. Je remercie également tous les membres de mon comité de pilotage, **Johanne NAHMANI**, **Christophe ROBIN** et plus particulièrement **Geoffroy SERE**, qui m'a convaincu (avec **Sophie GUIMONT**) de m'engager en thèse. Mais je voudrais également le remercier pour son aide précieuse d'hydrogéologue, sa disponibilité et son optimisme (et aussi sa thèse qui m'a fortement inspirée).

Un grand merci à **Jean-Louis MOREL** pour m'avoir hébergé au LSE, structure à son image, entreprenante et énergique. Mais au-delà de cela, je voulais remercier cet homme de principes à l'horizon scientifique infini qui a aussi contribué à me faire découvrir les sciences du sol.

Je souhaite également remercier l'ensemble des acteurs du LSE. Merci à **François BARTOLI,** génie de la physique du sol et à **Françoise WATTEAU** génie de l'ultrastructure pour m'avoir transmis une part de leur immense savoir sur l'agrégation des sols et leur capacité d'écoute et leur gentillesse. Merci à l'équipe technique toute entière, et notamment à **Stéphane COLIN** pour avoir passer des heures à construire ces foutus cosmes en PVC (t'inquiètes pas, ça va faire une super publi !) et à extraire 1,5 tonne de sol, à **Alain RAKOTO** pour un aller-retour à Bondy (Discobitch !), à **Adeline BOUCHARD** pour sa patience devant mes centaines de questions, à **Jean-Claude BEGIN** pour ces discussions sur l'ASNL, à **Romain GOUDON** pour avoir broyé mes sols avec une efficacité inégalée et à **Bernard COLIN** pour la paille de sa ferme. Comment ne pas remercier aussi tout l'équipe du GISFI, **Noële RAOULT** et les vidanges de bonbonne à la main (hé oui, les pompes sont arrivées après !), **Lucas CHARROIS** (désolé pour le tamisage à la pelle sous la neige) et **Cindy MESSENA**. Une immense reconnaissance à **Stéphanie OUVRARD**, qui a assuré mes analyses en chromato et à **Catherine SIRGUEY** (toujours avec le sourire !) pour ces conseils sur l'ICP. Merci également à **Thibault STERCKEMAN** pour ces conseils sur le cadmium, au soutien récent de **Pierre LÉGLIZE**, de **Sophie LEGUÉDOIS** et **d'Elodie CHENOT.** Merci à tout le secrétariat, **Séverine BONENBERGER**, **Liliane LAURENT**, **Isabelle SLOTA** et plus récemment **Sylvia LHUILLIER.**

J'exprime toute ma gratitude à **Robert JOUSSEMET** et toute l'équipe du STEVAL, **Yvan CAPOWIEZ** sans qui je n'aurais pas de tomographie, **Marko DEBELJAK** pour m'avoir initié à la modélisation, **Eric BLANCHART** pour ces conseils sur les turricules, **Mickaël HEDDE** pour ses conseils, ces concepts sur la diversité et sa thèse dont je me suis (très !) fortement inspiré, **Paul Henning KROGH**, **Daniel CLUZEAU**, **Kevin R. BUTT** et ses EIU, **Kam-rigne LAOSSI**, **Sébastien BAROT**, **Aude THIERY**, **Charline FREYBURGER.**

Un immense merci aux stagiaires que j'ai encadré ou qui ont contribué à alimenter ma thèse : notamment **Kevin CHEYNIER** et **Lénaïc MIGNOT** avec qui nous avons poussé à l'extrême la résistance humaine en expériences de cosmes mais aussi **Gilles GRISARD**, **Emilie GUERET**, et **Eugénie SY**.

Comment ne pas remercier mes compagnons d'aventure, **David COINCHELIN** (le fameux Alain V…), **Fabien LAURENT** (ultime man) mon frère, **Christophe BARNIER** (le non moins fameux Barbiche), **Lucie LOVY** (biopower) pour son écoute et ses principes, **Jean-Marc CUSTOS** (maisouestdoncornicar) pour sa zénitude, **Sophie RAOUS** (enfin je sais toujours pas si elle est au LSE), et tous les autres **Marie-France MONSERIE** (un sucre), **Frédéric REES** (Childeric), **Hermine HUOT**, **Nouhou SALIFOU**, **Jérôme PERRIGUEY (**perrigouse**), Clémence LEFORT**, **Asmaa BIAZ**, **Valérie GUJISAITE**, **Romain BARBAROUX**, **Bruno SIMON**, **Annabelle TEIXIDO**, **Elena MOLINO, Aida BANI, et Ouafae EL HAMIANI**.

Je remercie aussi tous mes amis, ceux de Lyon et ceux de l'ENSAIA qui m'ont toujours écouté jusqu'au bout quand ils me demandaient sur quoi je travaillais. Un grand NON remerciement à ce foutu mal dos qui m'aura gâché le plaisir de cette dernière année de thèse. Le mot « remercier » n'est pas assez fort pour exprimer mon amour à **mes parents** qui m'ont toujours soutenu quels qu'ont été mes choix. Ces considérations prennent encore plus d'ampleur encore dans ces derniers mois difficiles. Mais je veux rester sur une note humoristique et leur dire que cette fois, ils sont invités à la remise du diplôme… Merci à mon **grand-père** pour les mardi soir, à **mon frère** (GnRR !), une pensée à ma **grand-mère** récemment parti et à l'ensemble de **ma famille** qui a constitué un cocon protecteur dans lequel j'ai pu me ressourcer.

Et enfin, à **Ludivine** … je reprendrai en toute simplicité les paroles d'un poète de renom : la courbe de tes yeux fait le tour de mon cœur, tout mon sang coule dans leurs regards.

Table des matières

Remerciements **3**

Glossaire **30**

Préambule **31**

Introduction **32**

Chapitre I Etat de l'art **34**

1 Les sols très anthropisés : dégradation, restauration, construction de sol 34

1.1 Définitions 35

1.2 Technosols et dégradation de la qualité des sols 35

1.3 De la restauration écologique à la construction de sol 36

2 La faune du sol dans les sols naturels 37

2.1 Qu'est ce que la faune du sol ? 37

2.1.1 La microfaune 37

2.1.2 La mésofaune 38

2.1.3 La macrofaune 38

2.2 La diversité de la faune 39

2.2.1 Réponses de la faune du sol : la théorie des filtres 39

2.2.2 Relations entre la diversité de la faune du sol et le fonctionnement du sol 41

2.2.3 Caractérisation de la contribution de la faune du sol aux processus et conséquences sur le fonctionnement des sols 46

3 La faune du sol comme outil de restauration des sols très anthropisés 52

3.1 L'expérience des polders : exemple de restauration d'anthroposols transformés 53

3.1.1 Réponses de la faune du sol 53

3.1.2 Effets de la faune du sol 55

3.2 L'expérience des sols contaminés des mines de charbon à ciel ouvert : exemple de restauration d'anthroposols artificiels 56
3.2.1 Réponses de la faune du sol 57
3.2.2 Effets de la faune du sol 58
3.3 La faune du sol et les Technosols construits 59
3.3.1 Cas de l'utilisation de déchets organiques dans la restauration de surface des sols naturels et anthroposols 59
3.3.2 Cas de la construction de sol 61
4 Objectifs de la Thèse 62
Chapitre II Matériels et méthodes 66
1 Matériels 66
1.1 Les matériaux bruts et en mélanges 66
1.1.1 Le compost de déchets verts (CDV) 66
1.1.2 La terre industrielle traitée par désorption thermique (TIT) 67
1.1.3 Le sous produit papetier (SPP) 68
1.1.4 Le mélange de terre industrielle et de sous-produit papetier (TIT/SPP) . 69
1.2 Les dispositifs expérimentaux 70
1.2.1 Les dispositifs *in situ* 70
1.2.2 Les dispositifs en laboratoire : les cosmes 75
1.3 Les espèces de faune utilisées 76
2 Méthodes 76
2.1 Les expérimentations *in situ* 76
2.1.1 L'expérimentation sur les grandes parcelles 76
2.1.2 Les parcelles lysimétriques 78
2.1.3 L'expérimentation en lysimètres 78
2.2 Les expérimentations en laboratoire 85
2.2.1 Expérimentation « survie » : effet des matériaux du Technosol sur la survie, la biomasse et la reproduction d'*Eisenia fœtida* 85
2.2.2 Expérimentation « comportement » : effet du procédé de construction du Technosol construit sur la biomasse et la contribution fonctionnelle de *Lumbricus terrestris* 88

2.2.3 Expérimentation « diversité » : effet de la faune et de sa diversité fonctionnelle sur le Technosol 92
2.3 Les analyses 97
2.3.1 Matrices biologiques 97
2.3.2 Matrices liquides 99
2.3.3 Matrices solides 100
2.4 Le traitement des données 101
2.4.1 Calculs d'indices de diversité (collemboles) 101
2.4.2 Organisation des données lysimétriques 101
2.4.3 Analyses de données 102
2.4.4 Tests statistiques 102
Chapitre III Le Technosol construit : support de vie de la faune du sol ? 104
1 Dynamique des communautés de faune du Technosol construit *in situ* 107
1.1 Etat des lieux de la colonisation d'un Technosol construit après 8 mois (grandes parcelles) 107
1.1.1 La macrofaune 107
1.1.2 Les microarthropodes 107
1.1.3 Discussion 115
1.2 Etat des lieux de la colonisation d'un Technosol construit après 30 mois (parcelles lysimétriques) 117
1.2.1 La macrofaune 117
1.2.2 Les microarthropodes 117
1.2.3 Discussion 124
1.3 Conclusion sur les études *in situ* 127
2 Etude des effets du procédé de construction du Technosol sur les paramètres de vie de la faune du sol en conditions contrôlées 128
2.1 La survie : variations de biomasse 128
2.1.1 Effets des matériaux en mélange avec du sol OCDE (sol modèle en écotoxicologie) sur la biomasse d'*Eisenia fœtida* 128

2.1.2 Effets du procédé de construction du Technosol construit sur la biomasse de *Lumbricus terrestris* 129
2.2 La reproduction 131
2.2.1 Effets des matériaux du Technosol construit en mélange avec du sol OCDE sur la production de cocons *d'Eisenia fœtida* 131
2.2.2 Effets des matériaux du Technosol construit en mélange avec du sol OCDE sur la production de juvéniles d'*Eisenia fœtida* 132
2.3 Discussion 133
2.4 Conclusions 136
3 Effets des interactions biotiques entre groupes fonctionnels en conditions contrôlées 137
3.1 Biomasse des ingénieurs de l'écosystème 137
3.2 Biomasse des macrofragmenteurs 138
3.3 Biomasse des microfragmenteurs 139
3.4 Discussion 142
4 Conclusion partielle 146
Chapitre IV Contribution d'un ingénieur de l'écosystème, *Lumbricus terrestris*, à la pédogenèse d'un Technosol construit : de l'agrégatosphère au pédon 149
1 Interactions entre le ver *Lumbricus terrestris* et le procédé de construction du Technosol construit : échelle de l'agrégatosphère 151
1.1 Effets du procédé de construction sur la production de galeries et de turricules 151
1.2 Evaluation qualitative des matériaux bioturbés par rapport au sol témoin 159
1.2.1 Evaluation qualitative du sol témoin 159
1.2.2 Evaluation qualitative des turricules 164
1.2.3 Evaluation qualitative des galeries 169
1.2.4 Discussion 173
2 Contribution de *Lumbricus terrestris* à la pédogenèse du Technosol construit : échelle du pédon 178

2.1 Contribution de *Lumbricus terrestris* à l'échelle du cosme 178
2.1.1 Effets de *Lumbricus terrestris* sur l'enfouissement de la litière 178
2.1.2 Effets de *Lumbricus terrestris* sur le cycle du carbone 180
2.1.3 Effets de *Lumbricus terrestris* sur la stabilité du sol 182
2.1.4 Discussion 182
2.2 Contribution de *Lumbricus terrestris* à l'échelle du lysimètre 184
2.2.1 Mesures de la biomasse aérienne de la végétation à la surface des lysimètres 184
2.2.2 Dynamique de transfert de l'eau 185
2.2.3 Dynamique de transfert des éléments 187
2.2.4 Discussion 193
3 Conclusion partielle 197
3.1 Structuration / Agrégation 198
3.2 Transferts d'eau, d'éléments et de matière 199
Chapitre V Contribution de la diversité fonctionnelle de la faune du sol à la pédogenèse d'un Technosol construit : de l'agrégatosphère au pédon et du groupe fonctionnel à un assemblage de groupes fonctionnels 201
1 Dans quelle mesure la diversité fonctionnelle influence-t-elle la pédogenèse d'un Technosol construit ? 203
1.1 Mise en relation des réponses et des effets 203
1.2 Effets des groupes fonctionnels sur l'enfouissement de la litière 204
1.3 Effets des groupes fonctionnels sur l'enfouissement du CDV 206
1.4 Effets des groupes fonctionnels sur l'humidité massique 207
1.5 Effets des groupes fonctionnels sur le cycle du carbone 209
1.6 Effets des groupes fonctionnels sur la stabilité de l'agrégation 213
1.7 Effets des groupes fonctionnels sur les microorganismes 214
2 Comparaison de deux structures biogéniques de deux groupes fonctionnels écomorphologiques à l'échelle de l'agrégatosphère 216
3 Discussion 220

4 Conclusion partielle 229
Chapitre VI Discussion générale 234
1 Le Technosol construit : un caractère néoformé, frein de l'expression de la faune du sol et de sa diversité 234
1.1 La théorie du « pouvoir tampon » 234
1.2 La théorie des conditions non limitantes 236
2 Apports de la Thèse au génie pédologique : vers un modèle décisionnel 240
2.1 Objectifs et structure du modèle décisionnel 240
2.2 Exemple de sous module : influence de *Lumbricus terrestris* sur la macroporosité 241
Conclusion générale 247
Perspectives 252
Annexes 255
Bibliographie 288

Table des figures

Figure 1. Règles d'assemblage des espèces avec les changements d'échelles : la théorie des filtres. RSP = Groupes d'espèces régionales ; HSP = Groupes d'espèces d'habitat ; GSP = Groupes d'espèces géographiques; ESP = Groupes d'espèces écologiques; ASP = Groupes réels d'espèces (Belyea et Lancaster, 1999; Hedde, 2006; Kelt et al., 1995)..... 40

Figure 2. Hypothèses des relations entre la biodiversité et l'intensité des processus de l'écosystème (Naeem et al., 2002)..... 45

Figure 3. Rôle de la faune dans les sols naturels en climat tempéré..... 47

Figure 4. Abondance totale d'Apporectodea caliginosa (à gauche) et distance colonisée par Apporectodea caliginosa (à droite) en fonction du temps dans un polder (Hoogerkamp et al., 1983). 54

Figure 5. Abondance d'Apporectodea caliginosa en fonction de la distance d'inoculation après 10 ans sur un polder (Hoogerkamp et al., 1983)..... 54

Figure 6. Schéma conceptuel du questionnement scientifique de la Thèse..... 65

Figure 7. Répartition pondérale des différentes fractions (terre fine < 2mm, graviers < 5mm et cailloux > 5mm) du CDV_1 et du TIT/SPP_1..... 69

Figure 8. Photographies des grandes parcelles a) en mai 2008, b) en avril 2009. 70

Figure 9. Modalités et plan du Technosol construit en place dans les « grandes parcelles »..... 72

Figure 10. Photographies de la construction de sol, a) boues de papeteries, b) dépôt de compost, c) mélange de terre industrielle et de boues de papeteries, d) nivellage.. 73

Figure 11. a) et b) Photographies des parcelles lysimétriques..... 73

Figure 12. Schéma d'un lysimètre. 75

Figure 13. Photographies des lysimètres : a) extérieur d'une station lysimétrique à 4 lysimètres, b) sondes à l'intérieur de la colonne vide, c) vue d'ensemble de l'extérieur de la colonne de sol dans la station lysimétrique, d) bouteilles de collecte des bougies poreuses..... 75

Figure 14. Photographies des cosmes : a) microcosme, b) mésocosme et c) macrocosme. 76

Figure 15. a) Maille de prélèvements des « grandes parcelles », b) légende des prélèvements effectués (en gras ceux qui concernent la faune)..... 77
Figure 16. Modalités « activité biologique » mise en place sur le Technosol construit en lysimètres. 79
Figure 17. Photographies des cloches à lysimètres, a) vue d'ensemble des trois lysimètres, b) intérieur de la cloche et son armature métallique..... 79
Figure 18. Photographies de l'inoculation de Lumbricus terrestris sur les lysimètres, a) les EIU (Eathworm Inoculation Unit) en incubation, b) trou préalable à l'implantation de l'EIU, c) ouverture d'un grand EIU, d) intérieur d'un petit EIU..... 83
Figure 19. Emplacement des EIU (Earthworm Inoculation Unit) sur les trois modalités de lysimètres. 84
Figure 20. Représentation schématique de l'expérience « survie ». 87
Figure 21. Déroulement de l'expérience « survie »..... 87
Figure 22. Représentation schématique de la première sous expérience de l'expérience « comportement ». 90
Figure 23. Représentation schématique de la deuxième sous expérience de l'expérience « comportement ». 91
Figure 24. Déroulement de l'expérience « comportement ». 92
Figure 25. Ensemble des combinaisons d'espèces testées dans l'expérience « diversité ». 94
Figure 26. Représentation schématique de l'expérience « diversité »..... 95
Figure 27. Représentation schématique des analyses effectuées sur les macrocosmes de l'expérience « diversité » à t=75 jours. TIT/SPP : terre industrielle traitée et sous produit papetier, CDV : compost de déchets verts..... 95
Figure 28. Déroulement de l'expérience « diversité ». 96
Figure 29. Réduction du pool d'espèces de la faune du sol avec les changements d'échelles. RSP = Groupes d'espèces régionales ; HSP = Groupes d'espèces d'habitat ; GSP = Groupes d'espèces géographiques; ESP = Groupes d'espèces écologiques; ASP = Groupes réels d'espèces (Belyea et Lancaster, 1999; Hedde, 2006; Kelt et al., 1995)..... 105
Figure 30. Schéma directeur du chapitre III : le Technosol construit : support de vie de la faune du sol ?..... 106

Figure 31. Description statistique des microarthopodes dans les Technosols construits des grandes parcelles à t=8mois : en haut à gauche, fréquence des échantillons en fonction de l'abondance des microarthropodes, en haut à droite, box-plots de l'abondance des microarthropodes et de ses composantes : abondances de collemboles, d'acariens et autres arthropodes, en bas, pourcentage des abondances de collemboles, d'acariens et autres arthropodes par rapport à l'abondance des microarthropodes. 108
Figure 32. Description statistique des acariens dans les Technosols construits des grandes parcelles à t=8mois : à gauche, box-plots des abondances de Gamasida, Oribata et Actinedida et à droite pourcentage des abondances de Gamasida, Oribata et Actinedida par rapport à l'abondance des acariens. 109
Figure 33. Box-plots des indices de diversité (S : richesse, H' : indice de Shannon-Weaver et E : équitabilité) calculés à partir des abondances des espèces de collemboles retrouvés dans les Technosols construits des grandes parcelles à t=8mois. 109
Figure 34. Fréquences d'apparition décroissante (à gauche) et moyenne des abondances décroissante (à droite) des espèces de collemboles et des genres d'acariens retrouvés dans les Technosols construits des grandes parcelles à t=8mois. 111
Figure 35. Description statistique des groupes fonctionnels de collemboles dans les Technosols construits des grandes parcelles à t=8mois : à gauche, box-plots des abondances de collemboles épiédaphiques, hémiédaphiques et euédaphiques et à droite pourcentage des abondances de collemboles épiédaphiques, hémiédaphiques et euédaphiques Gamasida par rapport à l'abondance de collemboles. 111
Figure 36. Projection des axes des attributs de l'ACP effectuée avec tous les attributs mesurés des microarthropodes, excepté que les attributs des taxons des collemboles ont été limités aux 5 espèces les plus représentées dans Technosols construits des grandes parcelles à t=8mois. co=confinement ; ev=éponge végétale. 114
Figure 37. Description statistique des microarthropodes dans les Technosols construits dans les parcelles lysimétriques à t=30mois : en haut à gauche, box-plot de l'abondance de microarthropodes, en haut à droite box-plot de l'abondance de collemboles, en bas à gauche, box-plot de l'abondance d'acariens, en bas à droite, box-plot de l'abondance d'arthropodes. Les lettres indiquent les résultats des tests

statistiques et post-hoc correspondants (Kruskal-Wallis, p<0,05 suivi de Conover-Iman ou ANOVA, p<0,05 suivi de Tukey). Pap=modalité « éponge végétale » ; PapCh=modalité « confinement ». 118
Figure 38. Description statistique des acariens dans les Technosols construits dans les parcelles lysimétriques à t=30mois : à gauche, box-plots des abondances de Gamasida, au centre d'Oribata et à droite d'Actinedida. Les lettres indiquent les résultats des tests statistiques et post-hoc correspondants (Kruskal-Wallis, p<0,05 suivi de Conover-Iman ou ANOVA, p<0,05 suivi de Tukey). Pap=modalité « éponge végétale » ; PapCh=modalité « confinement ». 119
Figure 39. Box-plots des indices de diversité (S : richesse, H' : indice de Shannon-Weaver et E : équitabilité) calculés à partir des abondances des espèces de collemboles en fonction des modalités de construction de sols dans les parcelles lysimétriques à t=30mois. Les lettres indiquent les résultats des tests statistiques et post-hoc correspondants (Kruskal-Wallis, p<0,05 suivi de Conover-Iman ou ANOVA, p<0,05 suivi de Tukey). Pap=modalité « éponge végétale » ; PapCh=modalité « confinement ». 120
Figure 40. Moyenne décroissante des abondances des espèces de collemboles et des genres d'acariens en fonction des modalités de construction de sol dans les parcelles lysimétriques à t=30mois. Pap=modalité « éponge végétale » ; PapCh=modalité « confinement ». 122
Figure 41. Description statistique des groupes fonctionnels de collemboles dans les Technosols construits dans les parcelles lysimétriques à t=30mois : à gauche, box-plots des abondances de collemboles épiédaphiques, au centre des collemboles hémiédaphiques et à droite des collemboles euédaphiques. Les lettres indiquent les résultats des tests statistiques et post-hoc correspondants (Kruskal-Wallis, p<0,05 suivi de Conover-Iman ou ANOVA, p<0,05 suivi de Tukey). Pap=modalité « éponge végétale » ; PapCh=modalité « confinement ». 122
Figure 42. Représentation des axes des attributs de l'ACP effectuée avec tous les attributs mesurés des microarthropodes, excepté que les attributs des taxons des collemboles ont été limités aux 7 espèces les plus représentées dans les parcelles lysimétriques à t=30mois. Pap=modalité « éponge végétale » ; PapCh=modalité « confinement ». 124

Figure 43. Variations de biomasse (moyennes et écart-types) d'Eisenia fœtida à t=28 jours en fonction des modalités contenant les matériaux constitutifs du sol construit, expérience « survie ». Les lettres indiquent les résultats du test statistique et post-hoc (Kruskal-Wallis, p<0,0004 suivi de Conover-Iman). TIT/SPP=terre industrielle traitée et sous produit papetier ; CDV=compost de déchet vert ; Cd=Cadmium à 50mg/kg sol sec. …… 129
Figure 44. Variations de biomasse (moyennes et écart-types) de Lumbricus terrestris à t=7 jours en fonction des modalités de construction de sol construit, expérience « comportement ». Les lettres indiquent les résultats du test statistique et post-hoc (Kruskal-Wallis, p<0,0001 suivi de Conover-Iman). TIT/SPP=terre industrielle traitée et sous produit papetier ; CDV=compost de déchet vert…… 130
Figure 45. Variations de biomasse (moyennes et écarts-types) de Lumbricus terrestris à t=7 jours et à t=30 jours en fonction des modalités de construction de sol construit, expérience « comportement ». Les lettres indiquent les résultats des tests statistiques et post-hoc (Kruskal-Wallis, p<0,098 et p<0,048, suivi de Conover-Iman). TIT/SPP=terre industrielle traitée et sous produit papetier ; CDV=compost de déchet vert…… 131
Figure 46. Nombre de cocons produits (moyennes et écart-types) par Eisenia fœtida à t=56 jours en fonction des modalités contenant les matériaux constitutifs du sol construit, expérience « survie ». Les lettres indiquent les résultats du test statistique et post-hoc (Kruskal-Wallis, p=0,003 suivi de Conover-Iman), TIT/SPP=terre industrielle traitée et sous produit papetier ; CDV=compost de déchet vert ; Cd=Cadmium à 50mg/kg sol sec. …… 132
Figure 47. Nombre de juvéniles produits (moyennes et écart-types) par Eisenia fœtida à t=56 jours en fonction des modalités contenant les matériaux constitutifs du sol construit, expérience « survie ». Les lettres indiquent les résultats du test statistique et post-hoc (Kruskal-Wallis, p<0,0001 suivi de Conover-Iman). TIT/SPP=terre industrielle traitée et sous produit papetier ; CDV=compost de déchet vert ; Cd=Cadmium à 50mg/kg sol sec. …… 133
Figure 48. Variations de biomasse (moyennes et écarts-types) d'Apporectodea caliginosa et de Lumbricus terrestris à t=75 jours dans le Technosol construit de l'expérience « diversité ». Les lettres indiquent les résultats des tests statistiques et post-hoc

(Kruskal-Wallis, p=0,998 et p=0,443, suivi de Conover-Iman). Ac : Apporectodea caliginosa ; Lt : Lumbricus terrestris ; Ps : Porcellio scaber ; Ff : Folsomia fimetaria. 138
Figure 49. Variations de biomasse (moyennes et écart-types) de Porcellio scaber à t=75 jours dans le Technosol construit de l'expérience « diversité ». Les lettres indiquent les résultats du test statistique et post-hoc (Kruskal-Wallis, p=0,0989 suivi de Conover-Iman). Ac : Apporectodea caliginosa ; Lt : Lumbricus terrestris ; Ps : Porcellio scaber ; Ff : Folsomia fimetaria..... 139
Figure 50. Variations de biomasse (box-plots) de Porcellio scaber (Mann-Whitney, p=0,047), à t=75 jours dans le Technosol construit de l'expérience « diversité » en excluant la modalité Ps. Avec Ac = modalités avec Apporectodea caliginosa ; Sans Lt = modalités sans Apporectodea caliginosa..... 139
Figure 51. Variations de biomasse (moyennes et écart-types) de Folsomia fimetaria dans l'horizon CDV, A et B à t=75 jours dans le Technosol construit de l'expérience « diversité ». Les lettres indiquent les résultats des tests statistiques et post-hoc (Kruskal-Wallis, p=0,334, p=0,209 et p<0,008 suivi de Conover-Iman). Ac : Apporectodea caliginosa ; Lt : Lumbricus terrestris ; Ps : Porcellio scaber ; Ff : Folsomia fimetaria ; Tf : témoin final. 141
Figure 52. Variations de biomasse (box-plots) de Folsomia fimetaria dans l'horizon B (Mann-Whitney, p=0,002), à t=75 jours dans le Technosol construit de l'expérience « diversité ». Avec Lt = modalités avec Lumbricus terrestris ; Sans Lt = modalités sans Lumbricus terrestris. 142
Figure 53. Résumé des interactions biotiques observées dans l'expérience « diversité » à t=75 jours sur la biomasse des animaux. Lt : Lumbricus terrestris ; Ps : Porcellio scaber ; Ac : Apporectodea caliginosa ; Ff : Folsomia fimetaria..... 146
Figure 54. Réduction du pool d'espèces de la faune du sol avec les changements d'échelles adaptée au Technosol construit. RSP = Groupes d'espèces régionales ; HSP = Groupes d'espèces d'habitat ; GSP = Groupes d'espèces géographiques; ESP = Groupes d'espèces écologiques; ASP = Groupes d'espèces actuelles (Belyea et Lancaster, 1999; Hedde, 2006; Kelt et al., 1995) Lt = Lumbricus terrestris, Ff : Folsomia fimetaria ; Ps = Porcellio scaber, Ac : Apporectodea caliginosa. 148

Figure 55. Schéma directeur du chapitre IV : contribution d'un ingénieur de l'écosystème, Lumbricus terrestris, à la pédogenèse d'un Technosol construit : de l'agrégatosphère au pédon. 150
Figure 56. Observations des galeries de Lumbricus terrestris dans le Technosol construit, a & b : après 75 jours dans l'expérience « diversité », c : après 30 jours dans l'expérience « comportement » ; TIT/SPP=terre industrielle traitée et sous produit papetier ; CDV=compost de déchet vert. 152
Figure 57. Observations de la surface des cosmes, a : de la modalité 100% CDV, b : d'une modalité à deux matériaux (CDV et TIT/SPP), c : de la modalité 100% TIT/SPP à t=30 jours dans l'expérience « comportement » contenant Lumbricus terrestris ; TIT/SPP=terre industrielle traitée et sous produit papetier ; CDV=compost de déchet vert. 153
Figure 58. Observations de turricules de surface de Lumbricus terrestris, a : de la modalité 100% CDV, b : d'une modalité à deux matériaux (CDV et TIT/SPP), c : de la modalité 100% TIT/SPP à t=30 jours dans l'expérience « comportement » contenant Lumbricus terrestris ; TIT/SPP=terre industrielle traitée et sous produit papetier ; CDV=compost de déchet vert. 154
Figure 59. Observations, a : d'un turricule de surface de Lumbricus terrestris, b : du sol témoin à t=75 jours dans l'expérience « diversité ». 155
Figure 60. Reconstruction en 3 dimensions du réseau de galeries de Lumbricus terrestris et résultats associés obtenus en tomographie (volume total de galeries, pourcentage de galeries dans la partie CDV et volume de TIT/SPP déplacé dans la partie de CDV) dans les cosmes (15 cm de diamètre ; 10 cm de profondeur) de l'expérience « comportement » à 14 et 30 jours. En jaune, premier plan, en bleu arrière plan ; TIT/SPP=terre industrielle traitée et sous produit papetier ; CDV=compost de déchet vert. 156
Figure 61. Production de turricules (moyennes et écarts-types) à t=7 jours (gauche) et de turricules de surface à t=14-30 jours (droite) de Lumbricus terrestris dans l'expérience « comportement ». Les lettres indiquent les résultats des tests statistiques et post-hoc (Kruskal-Wallis, $p<0,0001$ et $p=0,0004$ suivi de Conover-Iman). TIT/SPP=terre industrielle traitée et sous produit papetier ; CDV=compost de déchet vert. 157

Figure 62. Image de tomographie tirée d'un cosme à deux matériaux (CDV et TIT/SPP) contenant Lumbricus terrestris au milieu de l'horizon de CDV de l'expérience « comportement ». m : manchons de TIT/SPP ; g : galeries ; TIT/SPP=terre industrielle traitée et sous produit papetier ; CDV=compost de déchet vert. 158
Figure 63. Volume de TIT/SPP déplacé par Lumbricus terrestris en fonction de la hauteur au-dessus de l'interface entre la TIT/SPP et le CDV selon les modalités à deux matériaux (CDV et TIT/SPP) à t=14-30 jours de l'expérience « comportement » ; TIT/SPP=terre industrielle traitée et sous produit papetier ; CDV=compost de déchet vert..... 158
Figure 64. Micrographes de microscope électronique à transmission du compost de déchets verts de l'expérience « comportement » à t=30 jours. 1: résidus végétaux ; 2 : tissus ligneux : parois de cellules intactes et dégradées ; 3 : spores dans des résidus cellulaires végétaux ; 4 : matière organique fine provenant de la dégradation des tissus végétaux. b, bactéries vivantes ; br, résidus bactériens ; c, cellule ; cw, paroi de cellule ; dc, paroi de cellule dégradée ; m, minéraux ; pc, compose phénolique oc, composé organique ; rc, résidus cellulaires ; s, spore. 160
Figure 65. Micrographes de microscope électronique à transmission du mélange TIT/SPP de l'expérience « comportement » à t=30 jours. 1: agrégat organo-minéral avec des bactéries ; 2 : agrégat organo-minéral ; 3 : fibre cellulosique. b, bactéries vivantes ; cf, fibre cellulosique ; h, trou dans la résine ; m, minéraux. TIT/SPP=terre industrielle traitée et sous produit papetier. 161
Figure 66. Micrographes de microscope électronique à transmission de l'interface du CDV et du TIT/SPP de la modalité témoin de l'expérience « diversité » à t=75 jours. 1 & 2 : tissus végétaux intacts ; 3 : tissus végétaux tassés ; 4 : tissus végétaux dégradés ; 5: matière organique fine provenant de la dégradation des tissus végétaux ; 6 & 7 : agrégation organo-minérale à l'interface ; 8 & 9 : microagrégats organo-minéraux ; 10 : agrégation organo-minérale et porosité. b, bactéries vivantes ; br, résidus bactériens ; c, cellule ; pc, composé phénolique ; cw, paroi de cellule ; do, matière organique dégradée ; el, épaississement ligneux ; m, minéraux ; p, porosité ; rc, résidus cellulaires ; s, spore ; tw, parois tassées. TIT/SPP=terre industrielle traitée et sous produit papetier ; CDV=compost de déchet vert. 163

Figure 67. Micrographes de microscope électronique à transmission du turricule de Lumbricus terrestris de la modalité 100% TIT/SPP de l'expérience « comportement » à t=30 jours. 1, 2, 3 & 4 : vue d'ensemble ; 5 : agrégat organo-minéral incluant des fibres cellulosiques ; 6 : détail de fibre cellulosique participant à l'agrégation. b, bactéries vivantes ; cf, fibre cellulosique ; df, fibre cellulosique dégradée ; ex, exopolymères ; h, trou dans la résine ; m, minéraux. TIT/SPP=terre industrielle traitée et sous produit papetier. …… 165

Figure 68. Micrographes de microscope électronique à transmission de turricule de Lumbricus terrestris de la modalité 75% CDV – 25% TIT/SPP de l'expérience « comportement » à t=30 jours. 1 : minéraux et fibres ; 2 : agrégat organo-minéral ; 3 : fibre cellulosique sous biodégradation ; 4 : matière organique fine après biodégradation ; 5 : tissus dégradés ; 6 : colonie bactérienne ; 7 : diversité morphologique des bactéries ; 8 : agrégat bactérien. b, bactéries vivantes ; br, résidus bactériens ; cf, fibre cellulosique ; cr, résidu de cellules ; cw, paroi de cellule ; dc, cellule dégradée ; df, fibre cellulosique dégradée ; ex, exopolymères ; h, trou dans la résine ; m, minéraux ; ml, lamelle moyenne ; oc, composé organique ; s, spore. TIT/SPP=terre industrielle traitée et sous produit papetier ; CDV=compost de déchet vert.…… 167

Figure 69. Teneur (moyennes et écarts-types) en carbone total et en carbone organique des turricules de surface de Lumbricus terrestris, des matériaux parents et des mélanges initiaux en fonction des modalités de construction de sol à t=30 jours dans l'expérience « comportement ». Les lettres indiquent les résultats des tests statistiques et post-hoc (Kruskal-Wallis, $p<0,011$ et $p<0,002$ suivi de Conover-Iman). Les valeurs de carbone des mélanges initiaux ne rentrent pas dans le test statistique. mp = matériau parent ; mi = mélange initial…… 168

Figure 70. Pourcentage de carbone organique dégradé dans les turricules de surface de Lumbricus terrestris par rapport à la teneur théorique en fonction des modalités de construction de sol à t=30 jours dans l'expérience « comportement ».…… 169

Figure 71. Micrographes de microscope électronique à transmission de la paroi d'une galerie de Lumbricus terrestris dans le TIT/SPP manchonnée par du CDV dans l'expérience « diversité » à t=75 jours. 1: cutane minérale externe de la galerie ; 2 : mucus ; 3 : interface organo-minérale ; 4 : tissus végétaux dégradés ; 5: matière

organique fine provenant de la dégradation des tissus végétaux ; 6 : vue d'ensemble de la partie dispersée du tapissage organique ; 7 : détail de la partie dispersée du tapissage organique ; 8 : élément plastique ; 9 : microagrégats organo-minéral ; 10 : bactéries vivantes. b, bactéries vivantes ; br, résidus bactériens ; pc, compose phénolique ; cf, fibre cellulosique ; cw, paroi de cellule ; do, matière organique dégradé ; el, épaississement ligneux ; li, litière ; m, minéraux ; mc, mucus ; ml, lamelle moyenne ; pm, matière plastique ; s, spore. TIT/SPP=terre industrielle traitée et sous produit papetier ; CDV=compost de déchet vert..... 172

Figure 72. Répartition pondérale (moyennes et écarts-types) des fractions après le test de stabilité du sol de la modalité témoin et de la galerie de Lumbricus terrestris dans le TIT/SPP manchonnée par du CDV à t=75 jours dans l'expérience « diversité ». Les valeurs de stabilité du témoin et de Lumbricus terrestris pour chaque fraction ne présentent pas de différence statistique (Mann-Whitney (α=5%)) 173

Figure 73. Observations à la surface des cosmes, a : de la modalité témoin, b : de la modalité avec Lumbricus terrestris, à t=75 jours dans l'expérience « diversité ». 179

Figure 74. Observations visuelles, a : d'un morceau de litière entraîné dans une galerie de Lumbricus terrestris, c : d'un morceau de litière dégradé dans une galerie de Lumbricus terrestris, c : d'un « midden » de Lumbricus terrestris, t=75 jours dans l'expérience « diversité »..... 179

Figure 75. Masse de litière disparue (moyennes et écarts-types) de la surface du sol de la modalité témoin et de la modalité avec Lumbricus terrestris à t=75 jours dans l'expérience « diversité ». Les lettres indiquent les résultats du test statistique (Mann-Whitney unilatéral, p=0,05). 180

Figure 76. Teneur en carbone total (moyennes et écarts-types) aux trois horizons (CDV, A et B) de la modalité témoin et de la modalité avec Lumbricus terrestris à t=75 jours dans l'expérience « diversité ». Les lettres indiquent les résultats des tests statistiques (Mann-Whitney, p=0,50 en vert, p=0,50 en bleu et p=0,09 en gris).... 181

Figure 77. Teneur en carbone organique (moyennes et écarts-types) aux trois horizons (CDV, A et B) de la modalité témoin et de la modalité avec Lumbricus terrestris à t=75 jours dans l'expérience « diversité ». Les lettres indiquent les résultats des

tests statistiques (Mann-Whitney, p=0,33 en vert, p=0,61 en bleu et p=0,09 en gris). 181
Figure 78. Répartition pondérale des fractions de l'horizon B (moyennes et écarts-types) après le test de stabilité du sol de la modalité témoin et de la modalité avec Lumbricus terrestris à t=75 jours dans l'expérience « diversité ». Les lettres indiquent les résultats des tests statistiques (Mann-Whitney unilatéral, p=0,77 en vert, p=0,81 en bleu, p=0,77 en gris, p=0,77 en rouge et p=0,77 en jaune)..... 182
Figure 79. Biomasses aériennes fraîche et sèche (g) de la végétation à la surface des lysimètres « végétation » et « faune » en juin 2010. 185
Figure 80. Evolution de la hauteur d'eau des percolats des lysimètres et de la pluviométrie au cours du temps. 186
Figure 81. Evolution de l'humidité volumique à 50 cm (à gauche) et à 100 cm (à droite) des lysimètres et de la pluviométrie au cours du temps. 187
Figure 82. Evolution des concentrations en carbone total (à gauche) et en carbone organique (à droite) dans les percolats des lysimètres au cours du temps. 187
Figure 83. Evolution des concentrations en azote total dans les percolats des lysimètres au cours du temps. 188
Figure 84. Rapport carbone organique/azote total dans les percolats des lysimètres au cours du temps. 188
Figure 85. Quantités cumulées de carbone total (à gauche) et de carbone organique (à droite) dans les percolats des lysimètres au cours du temps. 189
Figure 86. Quantité cumulée en azote total dans les percolats des lysimètres au cours du temps. 190
Figure 87. Concentrations en NO_3^- (à gauche) et en NH_4^+ (à droite) dans les percolats des lysimètres au cours du temps. 190
Figure 88. Evolution des quantités cumulées de NO_3^- (à gauche) et de NH_4^+ (à droite) dans les percolats des lysimètres au cours du temps. 191
Figure 89. Evolution des concentrations en carbone total (à gauche) et en carbone organique (à droite) dans les bougies poreuses des lysimètres au cours du temps. 192
Figure 90. Evolution des concentrations en azote total dans les bougies poreuses des lysimètres au cours du temps. 192

Figure 91. Evolution des concentrations en NO_3^- (à gauche) et en NH_4^+ (à droite) dans les bougies poreuses des lysimètres au cours du temps. 193
Figure 92. Schéma récapitulatif du fonctionnement hydrique des lysimètres nu, après ajout de végétation et après ajout de faune (ETP = évapotranspiration). 194
Figure 93. Schéma directeur du chapitre V : contribution de la diversité fonctionnelle de la faune du sol à la pédogenèse d'un Technosol construit. 202
Figure 94. Projection des axes des attributs de l'ACP effectuée avec tous les attributs mesurés de l'expérience « diversité », excepté les attributs concernant les données d'ADN sur les microorganismes. 204
Figure 95. Masse de litière sèche restante à la surface, ensemble des modalités (à gauche, box-plots), regroupement de modalités (à droite, box-plots) à t=75 jours dans l'expérience « diversité ». Les lettres indiquent les résultats du test statistique et post-hoc (Kruskal-Wallis, p<0,0001 suivi de Conover-Iman). Ac : Apporectodea caliginosa ; Lt : Lumbricus terrestris ; Ps : Porcellio scaber ; Ff : Folsomia fimetaria ; Tf : témoin final. En bleu : modalités avec Lt et Ps, en rouge : modalités avec Lt sans Ps, en jaune : modalités avec Ps sans Lt, en gris : autres modalités. 205
Figure 96. Epaisseur de CDV restante à la surface, ensemble des modalités (à gauche, box-plots), regroupement de modalités (à droite, box-plots) à t=75 jours dans l'expérience « diversité ». Les lettres indiquent les résultats du test statistique (Kruskal-Wallis, p<0,0001 suivi de Conover-Iman). Ac : Apporectodea caliginosa ; Lt : Lumbricus terrestris ; Ps : Porcellio scaber ; Ff : Folsomia fimetaria ; Tf : témoin final. En rouge : modalités avec Lt, en gris : autres modalités. 206
Figure 97. Humidité massique de l'horizon de CDV, ensemble des modalités (à gauche, box-plots), regroupement de modalités (à droite, box-plots) à t=75 jours dans l'expérience « diversité ». Les lettres indiquent les résultats du test statistique et post-hoc (Kruskal-Wallis, p<0,0003 suivi de Conover-Iman,). Ac : Apporectodea caliginosa ; Lt : Lumbricus terrestris ; Ps : Porcellio scaber ; Ff : Folsomia fimetaria ; Tf : témoin final. En bleu, modalités avec Lt et Ac, en rouge : modalités avec Lt, en gris : autres modalités. 207
Figure 98. Humidité massique de l'horizon A, ensemble des modalités (à gauche, box-plots), regroupement de modalités (à droite, box-plots) à t=75 jours dans l'expérience « diversité ». Les lettres indiquent les résultats du test statistique et

post-hoc (Kruskal-Wallis, p=0,135 suivi de Conover-Iman,). Ac : Apporectodea caliginosa ; Lt : Lumbricus terrestris ; Ps : Porcellio scaber ; Ff : Folsomia fimetaria ; Tf : témoin final. En rouge : modalités avec Lt, en vert : modalités avec Ac sans Lt, en bleu : modalités avec Lt et Ac, en gris : autres modalités. 208
Figure 99. Humidité massique de l'horizon B (box-plots), ensemble des modalités à t=75 jours dans l'expérience « diversité ». Ac : Apporectodea caliginosa ; Lt : Lumbricus terrestris ; Ps : Porcellio scaber ; Ff : Folsomia fimetaria ; Tf : témoin final. 209
Figure 100. Carbone total de l'horizon de CDV, ensemble des modalités (à gauche, moyennes et écarts-types), regroupement de modalités (à droite, box-plots) à t=75 jours dans l'expérience « diversité ». Les lettres indiquent les résultats du test statistique (Student, p<0,007). Ac : Apporectodea caliginosa ; Lt : Lumbricus terrestris ; Ps : Porcellio scaber ; Ff : Folsomia fimetaria ; Tf : témoin final. 210
Figure 101. Carbone organique de l'horizon de CDV, ensemble des modalités (à gauche, moyennes et écarts-types), regroupement de modalités (à droite, box-plots) à t=75 jours dans l'expérience « diversité ». Les lettres indiquent les résultats du test statistique (Mann-Whitney, p<0,001). Ac : Apporectodea caliginosa ; Lt : Lumbricus terrestris ; Ps : Porcellio scaber ; Ff : Folsomia fimetaria ; Tf : témoin final. 210
Figure 102. Carbone total (à gauche, moyennes et écarts-types) et carbone organique (à droite, moyennes et écarts-types) de l'horizon A à t=75 jours dans l'expérience « diversité ». Ac : Apporectodea caliginosa ; Lt : Lumbricus terrestris ; Ps : Porcellio scaber ; Ff : Folsomia fimetaria ; Tf : témoin final. 211
Figure 103. Carbone organique de l'horizon A (box-plots), avec ou sans Folsomia fimetaria à t=75 jours dans l'expérience « diversité ». Les lettres indiquent les résultats du test statistique (Mann-Whitney, p<0,037). Ff : Folsomia fimetaria. ... 212
Figure 104. Carbone total (à gauche, moyennes et écarts-types) et carbone organique (à droite, moyennes et écarts-types) de l'horizon B à t=75 jours dans l'expérience « diversité ». Ac : Apporectodea caliginosa ; Lt : Lumbricus terrestris ; Ps : Porcellio scaber ; Ff : Folsomia fimetaria ; Tf : témoin final. 213
Figure 105. Fraction pondérale stable à l'eau supérieure à 2 mm (à gauche, moyennes et écarts-types) et à 1 mm (à droite, moyennes et écarts-types) de l'horizon de B à t=75 jours dans l'expérience « diversité ». Ac : Apporectodea caliginosa ; Lt :

Lumbricus terrestris ; Ps : Porcellio scaber ; Ff : Folsomia fimetaria ; Tf : témoin final. 214
Figure 106. Quantité d'ADN bactérien (q-PCR 16S, à gauche, moyennes et écarts-types) et fongique (q-PCR 18S, à droite, moyennes et écarts-types) du sol de l'horizon de A à t=75 jours dans l'expérience « diversité ». Ac : Apporectodea caliginosa ; Lt : Lumbricus terrestris ; Ps : Porcellio scaber ; Ff : Folsomia fimetaria ; Tf : témoin final. 215
Figure 107. Profils de migration (TTGE) de l'ADN bactérien (à gauche) et fongique (à droite) du sol de l'horizon de A à t=75 jours dans l'expérience « diversité ». Ac : Apporectodea caliginosa ; Lt : Lumbricus terrestris ; Ps : Porcellio scaber ; Ff : Folsomia fimetaria ; Tf : témoin final. 215
Figure 108. Comparaison schématique des galeries de Lumbricus terrestris et d'Apporectodea caliginosa de l'expérience « diversité »..... 216
Figure 109. Micrographes de microscope électronique à transmission d'une galerie de la modalité contenant Apporectodea caliginosa dans l'expérience « diversité ». 1&2 : vue d'ensemble de la partie interne minérale ; 3 : minéraux ; 4 : fibre cellulosique et minéraux ; 5 : matière organique sous dégradation bactérienne ; 6 : polyphénol délavé ; 7& 8 : microagrégats organo-minéral ; 9 & 10 : vue d'ensemble de la cutane minérale ; 11 & 12 : plages d'exopolymères et agrégats bactériens ; 13 : association organo-minéral passée. b, bactéries vivantes ; bd, bactéries en division ; br, résidus bactériens ; cf, fibre cellulosique ; cr, résidu de cellules ; cw, paroi de cellule ; dp, polyphénol dégradé ; do, matière organique dégradée ; ex, exopolymères ; m, minéraux ; mo, matière organique. 219
Figure 110. Hypothèses de relation biodiversité-fonction pour la disparition de litière de l'expérience « diversité »..... 221
Figure 111. Hypothèses de relation biodiversité-fonction pour la disparition du CDV de l'expérience « diversité »..... 222
Figure 112. Hypothèses de relation biodiversité-fonction pour la teneur massique en eau du CDV de l'expérience « diversité ». 223
Figure 113. Mécanismes d'influence du collembole Folsomia fimetaria en modalités mono- et plurispécifiques sur le carbone organique dans l'horizon A de TIT/SPP du

Technosol construit dans l'expérience « diversité » ; TIT/SPP=terre industrielle traitée et sous produit papetier. 224
Figure 114. Mécanismes d'influence du ver Lumbricus terrestris en modalité monospécifique sur le carbone organique a) dans l'horizon de CDV b) dans l'horizon A de TIT/SPP du Technosol construit dans l'expérience « diversité » ; TIT/SPP=terre industrielle traitée et sous produit papetier ; CDV=compost de déchet vert. 227
Figure 115. Théorie des niches écologiques appliquée au Technosol construit (d'après Berg & Ellers, 2010) 238
Figure 116. Structure conceptuelle du modèle décisionnel. En bleu, les variables d'entrée et de sortie, en beige, les sous-modules, modifié d'après Séré, 2007 241
Figure 117. Schéma conceptuel de la modélisation par STELLA de la création de galeries par Lumbricus terrestris: les variables, les processus et les paramètres. 244
Figure 118. Arbre de classification et groupes (WEKA) explicatifs de l'attribut « volume total » de galeries après data mining sur tous les attributs. Coefficient de corrélation = 0.97 (Annexe X). Volume de galeries en cm^3, volume de TIT/SPP dans le CDV en mm^3, formulation initiale en % de CDV. TIT/SPP=terre industrielle traitée et sous produit papetier ; CDV=compost de déchet vert. 245
Figure 119. Arbre de classification et groupes (WEKA) explicatifs de l'attribut « volume total » de galeries après data mining sur tous les attributs excepté l'attribut « volume de galeries CDV ». Coefficient de corrélation = 0.99 (Annexe X). Volume total de galeries en cm^3, volume de TIT/SPP dans le CDV en mm^3, formulation initiale en % de CDV, production de turricules de surface en grammes de turricules secs. TIT/SPP=terre industrielle traitée et sous produit papetier ; CDV=compost de déchet vert. 246
Figure 120. Principaux résultats de la question scientifique I : quel type de faune du sol est susceptible de coloniser le Technosol construit ? 248
Figure 121. Principaux résultats de la question scientifique II : est ce que la faune du sol a un effet significatif sur la dynamique de structuration/agrégation, les transferts d'eau, de matière et de carbone au sein d'un Technosol construit ? 249
Figure 122. Principaux résultats de la question scientifique III : est ce que la notion de diversité fonctionnelle de la faune existe dans un Technosol construit ? 250

Table des tableaux

Tableau 1. Propriétés agronomiques des différents matériaux et des mélanges utilisés. CDV : compost de déchets verts ; TIT : terre industrielle traitée ; SPP : sous produit papetier (nd : non déterminé). 67

Tableau 2. Avantages et inconvénients des techniques d'inoculation de lombriciens in situ (adapté de Butt et al., 1997) 81

Tableau 3. Humidité massique à la capacité au champ des deux matériaux (TIT/SPP et bouses de vache) utilisés dans les EIU (Earthworm Inoculation Unit). 82

Tableau 4. Mortalité, biomasses initiale et finale et nombre de cocons produits par Lumbricus terrestris dans les EIU (Earthworm Inoculation Unit). 82

Tableau 5. Modalités de sol de l'expérience « survie » et ses compositions volumiques en matériaux. TIT/SPP : terre industrielle traitée et sous produit papetier, CDV : compost de déchets verts, OCDE : sol OCDE. 86

Tableau 6. Modalités de sol de l'expérience « comportement » et ses compositions volumiques en matériaux. TIT/SPP : terre industrielle traitée et sous produit papetier, CDV : compost de déchets verts. 89

Tableau 7. Liste des espèces de collemboles retrouvés dans les Technosols construits des grandes parcelles à t=8mois. 110

Tableau 8. Synthèse des tests statistiques (Mann-Whitney) effectués sur l'ensemble des attributs de mesure de l'abondance des microarthropodes en fonction des deux modalités de Technosol construits (« éponge végétale » et « confinement ») des grandes parcelles à t=8mois. 112

Tableau 9. Synthèse des tests de corrélation (Spearman) effectués entre la distance la plus proche du bord de la parcelle d'un échantillon et respectivement l'abondance de collemboles et l'abondance de collemboles hémiédaphiques de ce même échantillon dans la modalité éponge végétale de construction de sol des grandes parcelles à t=8mois. 113

Tableau 10. Synthèse des simulations de data mining effectuées avec l'ensemble des attributs des abondances de microarthropodes dans les Technosols construits des grandes parcelles à t=8mois. 115

Tableau 11. Liste des espèces de macrofaune retrouvées dans les parcelles lysimètriques à t=30 mois. 117
Tableau 12. Liste des espèces de collemboles retrouvés dans les Technosols construits des parcelles lysimétriques à t=30mois. 121
Tableau 13. Synthèse des tests statistiques effectués sur l'ensemble des attributs de mesure de l'abondance des microarthropodes en fonction des modalités de Technosols (« éponge végétale » et « confinement » (Kruskal-Wallis ou ANOVA, p<0,05) à t=30 mois. 123
Tableau 14. Conclusions de l'influence du procédé de construction du Technosol construit sur l'effet de Lumbricus terrestris sur la pédogenèse 178
Tableau 15. Pertes de carbone organique des trois horizons (CDV, A et B) de la modalité avec Lumbricus terrestris en pourcentage du carbone organique du témoin et en pourcentage total à t=75 jours dans l'expérience « diversité ». 182
Tableau 16. Récapitulatif des relations biodiversité-fonctions dans le Technosol construit 231
Tableau 17. Matrice d'adjacence du sous-modèle. 0 = absence de lien direct ; 1 = lien direct. Biomasse en grammes, volumes en cm^3 sauf volume de TIT/SPP dans le CDV en mm^3,. 243

Glossaire

CDV = compost de déchets verts

Ecologie fonctionnelle = qui traite des fonctions des organismes en interaction avec leur environnement. Elle étudie les processus et les organismes à l'origine des flux d'éléments et d'énergie de l'écosystème ainsi que leurs réponses aux variations naturelles et anthropiques du milieu

Facilitation = mécanisme selon lequel les performances des communautés sont supérieures à la simple somme des effets individuels des espèces

Fonction du sol = est un ensemble de processus qui s'exprime dans le temps dans un contexte donné (*e.g.* rôle de filtre)

Formulation = organisation (type de mélange) et localisation (*e.g.* en profondeur, à la surface) des matériaux technogéniques

GAP = « gut associated processes ». Effets directs et indirects de la digestion du ver sur les processus du sol

Génie pédologique = le génie pédologique regroupe l'ensemble des méthodes qui concourent à la gestion durable des sols dégradés

Idiosyncrasie = caractère indéterminé de la relation entre la diversité de la faune et les fonctions de l'écosystème

Matériaux technogéniques = matériaux qui résultent de l'activité industrielle anthropique

NEP = « nutrient enrichment processes ». Effet d'enrichissement du sol du au mélange physique du sol

Procédé de construction de sol = ensemble d'étapes qui jouent sur le choix de la nature, des proportions et de la formulation des matériaux technogéniques

Sol très anthropisé = sol dont la pédogenèse et le fonctionnement sont fortement influencés par des matériaux technogéniques

Sol naturel = formation de surface, à structure meuble et d'épaisseur variable, résultant de la transformation de la roche mère sous-jacente sous l'influence de divers processus, physiques, chimiques et biologiques, au contact de l'atmosphère et des êtres vivants

SPP = sous produit papetier

TIT = terre industrielle traitée

Préambule

Cette thèse s'inscrit dans les thématiques de recherche de l'équipe « Fonctionnement et évolution des sols très anthropisés - Technosols » du Laboratoires Sols et Environnement (UMR INRA INPL 1120) et dans le cadre du GISFI (Groupement d'Intérêt Scientifique sur les Friches Industrielles, www.gisfi.prd.fr), consortium de laboratoires et de partenaires publics et privés donnant accès à une station expérimentale de terrain. Ce travail s'est enrichi également de collaborations fortes, notamment avec les partenaires scientifiques du programme GESSOL BIOTECHNOSOL, avec l'Institut « Josef Stefan » de Ljubljana, l'UR INRA 1115 « Plantes et Systèmes Horticoles » d'Avignon, l'UMR 210 Eco&Sols de Montpellier et l'University of Aarhus de Silkeborg au Danemark.

Les travaux ont été soutenus par l'ADEME (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie) et la Région Lorraine.

Introduction

Le sol, couche superficielle de l'écorce terrestre, remplit de nombreuses fonctions (*e.g.* support de biodiversité, support de végétation, stockage de carbone, filtre, stockage d'eau) essentielles à l'Homme et à son environnement. Bien qu'étant une ressource non renouvelable du globe terrestre, le sol est soumis à de nombreux stress anthropiques qui dégradent ses propriétés et peuvent aboutir à des pertes de fonctions indispensables. La formation de nouveaux sols ou les phénomènes de résilience dans des écosystèmes dégradés dépendent du fait que oui ou non et à quelle vitesse, des sols peuvent retrouver un fonctionnement efficace. La pédogenèse est en effet très souvent décrite comme étant lente par rapport aux cinétiques de dégradation. La prévention des dégradations et la remise en état des sols dégradés sont alors porteuses d'enjeux environnementaux et socio-économiques considérables.

Dans ce contexte, les sols sont définis comme des systèmes vivants. En particulier, la faune du sol et sa diversité sont largement reconnus pour leur participation aux processus physiques, chimiques et biologiques impliqués dans le fonctionnement et l'évolution des sols naturels (Barrios, 2007; Lavelle *et al.*, 2006). Ces organismes sont ainsi fortement impliqués dans la délivrance des fonctions du sol. Parmi les nombreux facteurs qui influencent la pédogenèse des sols très anthropisés, l'influence du facteur biologique est peu connu. Les agents sont alors les organismes vivants du sol, dont la faune, et aussi l'Homme lui-même via ses actions de dégradation et/ou de restauration volontaire des sols (Séré, 2007). Le facteur biologique pourrait alors apparaître comme un levier majeur de la pédogenèse des sols très anthropisés, notamment dans leurs stades précoces d'évolution.

La présente Thèse se donne donc pour objectif premier d'acquérir des connaissances scientifiques sur l'effet de la faune du sol (macro- et mésofaune) sur la pédogenèse des sols très anthropisés au travers d'un modèle expérimental de sol, le Technosol construit. Une meilleure connaissance des interactions entre la faune et les constituants

technogéniques des Technosols devra permettre de dégager des perspectives appliquées dans le cadre de la réhabilitation des sites et sols dégradés.

Le manuscrit est organisé en six chapitres. Le **premier** chapitre rend compte de l'état de l'art sur le rôle de la faune du sol dans la pédogenèse et ceci i) dans une approche classique des sols peu ou pas anthropisés et ii) pour des sols très anthropisés. Il s'agit de proposer une synthèse des acquis scientifiques dans ces deux domaines et de dégager les points de convergence. Il en résultera une présentation des questionnements scientifiques, des hypothèses à tester et plus globalement des objectifs de la Thèse.

Le **deuxième** chapitre présente l'ensemble des matériels et méthodes qui ont été mis en œuvre pour répondre à ces objectifs. En particulier, les modalités de construction de sols ainsi que les caractéristiques des matériaux constitutifs seront présentés. Les choix d'organismes de la faune du sol seront explicités. Les dispositifs mis en œuvre à différentes échelles, de l'agrégat au pédon, seront décrits ainsi que les approches et méthodes expérimentales.

Les trois chapitres suivants présentent les résultats scientifiques organisés selon des approches thématiques complémentaires. Le **troisième** chapitre s'attache ainsi à étudier les réponses de la faune du sol dans un Technosol construit. Les **quatrième** et **cinquième** chapitres caractérisent pour leur part les effets de la faune sur la pédogenèse d'un Technosol construit. Le quatrième chapitre traite de l'effet d'un individu modèle de la faune du sol, *Lumbricus terrestris*, sur un Technosol, en fonction du procédé de construction de sol (nature, proportion et formulation des matériaux constitutifs). Le cinquième chapitre s'attache à décrire et comprendre ces effets en faisant varier la diversité de la faune.

Enfin, le **sixième** et dernier chapitre s'attachera à effectuer la synthèse des résultats acquis, de proposer des voies de modélisation et à dégager les résultats à portée générique. Il s'agira aussi d'ouvrir des perspectives appliquées en contribuant au génie pédologique : savoir-faire relatif à la gestion des sols très anthropisés.

Chapitre I Etat de l'art

La présente thèse s'inscrit à la croisée des chemins de deux problématiques qui sont la résultante de l'action anthropique. La première problématique concerne les questionnements liés à la réhabilitation des sols très anthropisés afin de restaurer les fonctions de sols dégradés ou disparus. La deuxième concerne des questionnements en lien avec l'écologie des communautés et essentiellement avec l'écologie fonctionnelle. Il s'agit d'être capable de caractériser les effets de la faune du sol dans le contexte des sols très anthropisés. Le questionnement global de cette thèse est donc d'évaluer l'effet de la faune dans sa composante fonctionnelle sur la pédogenèse d'un Technosol construit.

Ce chapitre propose un état des lieux des connaissances qui relient ces deux problématiques. C'est pourquoi dans un premier temps, je définirai les notions de sols très anthropisés et les relierai aux notions de restauration afin d'ériger le contexte de la première problématique. Dans un second temps, nous focaliserons notre attention sur les effets bénéfiques de la faune et de sa diversité dans des sols « naturels ». Dans un troisième temps, nous présenterons les études ayant trait aux deux problématiques, à savoir l'étude de la faune du sol dans un contexte de restauration des sols très anthropisés. Enfin, il conviendra d'énoncer clairement les questionnements et hypothèses de travail, qui seront éclairés par cet état des connaissances.

1 Les sols très anthropisés : dégradation, restauration, construction de sol

Actuellement, entre 25 et 50% des sols ont été modifiés par l'Homme (Vitousek *et al.*, 1997). L'anthropisation des sols (Morel et Heinrich, 2008) s'accroît d'année en année, aux dépends des sols naturels. En France, cette anthropisation se matérialise par la perte de 50 000 ha de sols naturels par an (Luginbühl, 2002) et en 2004, l'ensemble des surfaces anthropisées représentaient 27 198 km^2.

1.1 Définitions

Il convient de définir précisément la notion de sols très anthropisés avant toute considération. Ces sols, dont les propriétés et la pédogenèse sont dominés par des matériaux technogéniques, sont appelés « Anthroposols » dans le référentiel pédologique français (Baize et Girard, 2008) et « Technosols » dans le référentiel WRB (World Reference Base for Soil Resources) (Lehman, 2006; Rossiter, 2007). Dans la classification WRB (World Reference Base for Soil Resources), le Technosol est défini comme un sol contenant : (i) un nombre substantiel d'artefacts ; ces artefacts sont définis comme des matériaux créés ou substantiellement modifiés par l'Homme et provenant d'un processus de fabrication industrielle ou artisanale qui peut modifier ses propriétés originelles ; (ii) et/ou un scellement continu imperméable ou une géomembrane construite, (iii) et/ou des matériaux rocheux technique d'origine anthropique (Rossiter, 2007). Les Technosols de la WRB représentent donc une classe de sols très contrastés. Le référentiel pédologique français est plus précis à ce sujet, puisqu'il différencie quatre types d'Anthroposols (Baize et Girard, 2008) : (i) les Anthroposols transformés qui résultent de la transformation de sols en milieu ruraux (*e.g.* rizière, terrasses, polders…), (ii) les Anthroposols artificiels qui résultent entièrement d'apports de matériaux technogéniques (*e.g.* mines, industries, voiries…), (iii) les anthroposols archéologiques, (iv) les anthroposols construits qui résultent du « génie pédologique » et donc d'actes intentionnels de fabrication d'un sol dans un contexte précis et avec des objectifs donnés, le plus souvent afin d'acquérir un couvert végétal pérenne. Les anthroposols construits constituent le modèle de sol très anthropisé choisi dans cette thèse et appelé Technosol construit.

1.2 Technosols et dégradation de la qualité des sols

La qualité d'un sol est définie comme sa capacité à assurer plusieurs fonctions : support de végétation, réservoir d'eau, filtre, transformation et neutralisation des polluants et support de biodiversité dans un contexte donné (Wilson et Maliszewska-Kordybach, 2000). L'anthropisation des sols qui revêt de multiples aspects (*e.g.* pollution (El Khalil *et al.*, 2008), scellement, modification de la structure), entraîne alors une modification drastique des propriétés physiques, chimiques et biologiques des sols (Monserie *et al.*,

2009; Scholtus *et al.*, 2009) et la qualité des sols peut être directement ou indirectement affectée. Dans le cas des sols très anthropisés, la modification de ces propriétés a rompu l'équilibre de l'écosystème, c'est-à-dire sa capacité à maintenir ses attributs dynamiques structurels et fonctionnels (Séré, 2007). Si la perte de fonctions élémentaires remplies par le sol est effective, il convient alors d'envisager une remise en fonction du site qui passe par la restauration durable des fonctions élémentaires d'un sol.

1.3 De la restauration écologique à la construction de sol

La remise en état des sols très anthropisés afin de restaurer ses fonctions dégradées ou disparues est au cœur du questionnement et du développement des filières de requalification des sols très anthropisés. Dans le cadre des friches industrielles, faisant face aux techniques classiques de dépollution de sol et/ou suivi d'apport de sols agricoles en surface (Bradshaw, 2000) pour compenser le manque de matière organique et de végétation (Vetterlein et Hüttl, 1999b), la réhabilitation par voie naturelle, ou restauration « écologique », est en plein essor (Bradshaw, 2000; Urbanska *et al.*, 2004). Elle est définie comme l'activité intentionnelle qui initie ou accélère la récupération d'un écosystème en ce qui concerne sa santé, son intégrité et sa durabilité (SER, 2004). Elle prône le développement d'un couvert végétal, succession primaire et chaînon indispensable à l'initiation d'une restauration, avec une intervention humaine minimaliste qui ne procède que par traitements améliorants sporadiques afin de lever les verrous majeurs à cette initiation (Bradshaw, 2000). En associant une intervention humaine minimaliste à l'évolution naturelle des processus, ce type de restauration s'inscrit dans la notion plus large de génie pédologique. Elle a le mérite de restaurer les fonctions des sols en limitant les coûts économiques et environnementaux de la réhabilitation. La construction de sol, qui est intégrée elle aussi dans le génie pédologique, prend ses racines dans la restauration « écologique », mais résulte d'une modification plus draconienne de l'écosystème initial. La construction de sol est l'action volontaire de combiner des matériaux technogéniques dans un objectif de re-fonctionnalisation donné pour restaurer un écosystème. En utilisant des sous-produits et des déchets, elle limite l'utilisation de ressources naturelles et a pour objectif de

réduire les coûts économiques et environnementaux (Séré *et al.*, 2010; Séré *et al.*, 2008). La construction de sol est aux frontières de deux problématiques environnementales : la restauration des sols dégradés et la valorisation des déchets issus des activités anthropiques. Les sols qui en résultent sont des Technosols construits.

2 La faune du sol dans les sols naturels

2.1 Qu'est ce que la faune du sol ?

Le comportement des organismes de la faune du sol répond aux contraintes imposées dans le sol. Or l'intensité et la nature de ces contraintes sont intimement liées à leur taille, à l'accès à l'eau et aux nutriments. Ces assujettissements façonnent en partie l'abondance, la distribution et le comportement de ces communautés (mais aussi les moyens concrets de les extraire pour l'expérimentateur). De cette observation est née la classification morphométrique qui permet de balayer l'ensemble des individus de la faune du sol. Cette classification distingue les individus appartenant à la faune du sol selon leur taille et leurs relations vis-à-vis de l'eau (Lavelle et Spain, 2001). On y distingue la microfaune (< 0,2 mm), la mésofaune (0,2 mm à 2 mm) et enfin la macrofaune (> 2 mm). Notons que même si elle permet d'avoir une vue générale de la faune du sol, cette classification possède ses limites. En effet, d'une part, plusieurs taxons peuvent appartenir à deux catégories de taille (*e.g.* les vers appartiennent à la macrofaune ; les enchytréides à la mésofaune), d'autre part certaines espèces passent d'une catégorie de taille à l'autre pendant leur développement (Hedde, 2006).

2.1.1 La microfaune

La microfaune des sols est représentée par des protistes et des nématodes. Les protistes sont des eucaryotes (3-100 microm) qui occupent essentiellement les pores à l'extérieur des microagrégats (Lavelle et Spain, 2001) au contact de l'eau interstitielle et pelliculaire essentiellement dans les horizons organiques supérieurs. Les nématodes (0,15 à 5 mm) sont des métazoaires filiformes qui vivent dans les films d'eau ou sont des parasites des plantes à la surface ou dans les racines (Lavelle et Spain, 2001).

2.1.2 La mésofaune

La mésofaune est constituée par des habitants permanents de la litière et des interstices du sol. La mésofaune comprend des microarthropodes qui sont dominés par les acariens et les collemboles (Lavelle et Spain, 2001). Les collemboles sont des insectes (pas exactement) (Deharveng, 2004) petits et allongés, aptérygotes, mais parfois pourvu d'une furca (organe sauteur pour fuir les prédateurs) et ont une taille qui varie de quelques dixièmes de millimètres à 5 millimètres. Environ 8000 espèces sont décrites (Bellinger *et al.*, 2003) qui sont partagées entre les Arthropleona (collemboles allongés) et les Symphypleona (collemboles globuleux)(Bellinger *et al.*, 2003). Les acariens sont des arachnides de quelques dixièmes de mm à 1-2 mm. Il existe quatre principaux sous-ordres : les mésostigmates (Gamasida), les prostigmates (Actinedida), les astigmates (Acaridida), et les cryptostigmates (Oribatida) et un cinquième peu représenté, les metastigmates (Ixodida) qui regroupent 500 000 espèces (Lavelle et Spain, 2001). Selon les auteurs et la variabilité saisonnière, la densité s'échelonne de 20 000 à 670 000 individus/m^2, soit de 80 à 1000 mg sec/m^2 (Lavelle et Spain, 2001; Petersen et Luxton, 1982). Les enchytréides sont des oligochètes petits et colorés (ISO, 2005) d'une taille de 1 à 50 mm qui comptent environ 600 espèces, concentrés dans les 10-15 premiers cm, dans les couches supérieures organiques. Les densités varient beaucoup selon l'humidité du sol et les températures. Toutefois, en milieu tempéré, on estime la biomasse fraiche des enchytréides de 1 à 10 g /m^2 (Petersen et Luxton, 1982) et représentent souvent la plus forte biomasse au sein de la mésofaune. Bien que moins présent en terme de densité et de biomasse, il est à noter que d'autres représentants de la mésofaune du sol existent : des insectes aptérygotes, les protoures et les diploures, des micromyriapodes, pauropodes, symphiles et polyxenida (Coineau *et al.*, 1997).

2.1.3 La macrofaune

Les vers de terre sont des oligochètes segmentés dont la taille varie de 5 à 15 cm en moyenne, vivant dans le sol profond ou la litière. Il existe environ 693 genres et plus de 6000 espèces. En France, il existe 97 espèces, 49 sous-espèces et 33 variétés, soit un total de 180 taxons différents (Bouche, 1972; Kersanté, 2003). La densité moyenne est d'environ 100 à 500 individus/m^2 pour une biomasse allant de 30 à 100 g frais/m^2 avec

une variation saisonnière (Lavelle et Spain, 2001). Les isopodes sont des crustacés terrestres dont la taille varie de 1 à 2 cm, vivant dans la litière. La densité moyenne en milieu tempéré dans un sol brun non cultivé est d'environ 100 individus/m^2 (Bachelier, 1978). Les myriapodes sont des arthropodes qui se concentrent dans la litière et à la surface du sol. Leur taille est très variable. On distingue les diplopodes (deux paires de pattes par segment, densité de 200 à 500 individus/m^2) des chilopodes (une paire de pattes par segment, 50 individus/m^2)(Bachelier, 1978). Parmi les autres représentants figurent les larves de diptères, les coléoptères vivants dans la litière, les araignées vivants à la fois dans le sol et la litière. Des homoptères, des hétéroptères, des blattes, des thysanoures, des hémiptères endogées ou des larves de lépidoptères sont occasionnellement rencontrés (Lavelle et Spain, 2001; Nahmani, 2003).

Les termites et les fourmis font également partie de la macrofaune. Ils ont été volontairement écartés ici car leur influence est surtout remarquable en milieu tropical et non en milieu tempéré.

2.2 La diversité de la faune

2.2.1 Réponses de la faune du sol : la théorie des filtres

A un instant t, la présence de la faune du sol en sol naturel est dépendante des contraintes externes ou filtres environnementaux (biogéographique, dispersion, habitat) ainsi que des interactions biotiques (Figure 1) (Belyea et Lancaster, 1999; Hedde, 2006; Kelt *et al.*, 1995).

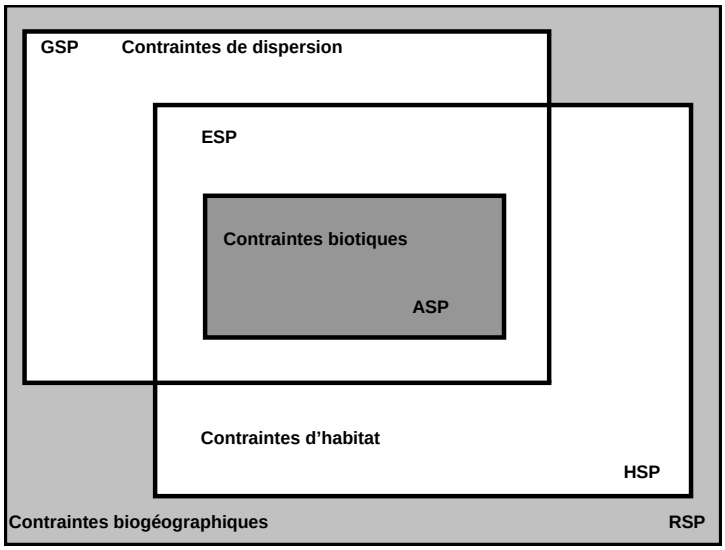


Figure 1. Règles d'assemblage des espèces avec les changements d'échelles : la théorie des filtres. RSP = Groupes d'espèces régionales ; HSP = Groupes d'espèces d'habitat ; GSP = Groupes d'espèces géographiques; ESP = Groupes d'espèces écologiques; ASP = Groupes réels d'espèces (Belyea et Lancaster, 1999; Hedde, 2006; Kelt* et al.*, 1995).

Les contraintes biogéographiques sont inhérentes à la région géographique d'étude et définissent le pool d'espèces régionales (RSP : regional species pool). Les contraintes liées à la dispersion des espèces définissent le pool d'espèces géographiques (GSP : geographical species pool) et sont inhérentes à la localisation du site. Puis viennent les contraintes d'habitat, qui incluent l'ensemble des propriétés abiotiques du sol ainsi que le type d'usage du sol (Decaens *et al.*, 2008) et définissent le pool d'espèces d'habitat (HSP : habitat pool species). Le pool d'espèces écologiques (ESP) représente l'ensemble des espèces du GSP qui a la capacité de vivre dans l'habitat du sol à un instant t. L'ensemble de ces contraintes est regroupé sous le terme de filtres environnementaux. Toutefois, un dernier type de filtre est à prendre en considération. Il s'agit des interactions biotiques qui correspondent à l'organisation des communautés par le biais des synergies positives et/ou négatives à l'intérieur du pool écologique d'espèces. Elles définissent le pool réel d'espèces (ASP : actual pool species) qui correspond aux communautés vivantes à l'instant t dans le site d'étude.

2.2.2 Relations entre la diversité de la faune du sol et le fonctionnement du sol

2.2.2.1 La notion de diversité fonctionnelle

Avec l'accroissement de l'intérêt porté à la biodiversité et à son rôle dans les écosystèmes, de nombreux écologistes du sol se sont penchés sur le lien potentiel existant entre la biodiversité de la faune et les processus écologiques (Bardgett *et al.*, 2005; Coleman et Whitman, 2005; Huhta, 2007). Il en ressort que la manipulation des espèces au sein des communautés de faune aboutit à des résultats contradictoires (Lavorel et Garnier, 2002; Walker, 1992). Dans certains cas, l'augmentation du nombre d'espèces d'un même groupe taxonomique ou trophique peut aboutir à une augmentation de l'intensité des processus. Toutefois, cette relation n'est pas toujours vérifiée. Par exemple, il a été démontré que la minéralisation de l'azote peut diminuer avec une communauté complexe de mésofaune présentant des prédateurs par rapport à une communauté n'en présentant pas (Cortet *et al.*, 2002).

La diversité de l'écosystème, et encore plus lorsqu'elle est considérée comme un facteur d'influence des mécanismes de fonctionnement de l'écosystème, signifie une diversité d'assemblage qui ne se limite pas seulement à la diversité spécifique (Swift *et al.*, 2004). Il a en effet été mis en évidence l'importance d'envisager la diversité faunistique sous l'angle d'une diversité fonctionnelle pour mieux satisfaire les critères scientifiques et comprendre les résultats contradictoires obtenus par les manipulations des espèces au sein des communautés complexes (Walker, 1992). La classification linnéenne est basée sur la phylogénie et non sur la fonctionnalité des espèces au sein de l'écosystème. Ainsi deux taxons très éloignés phylogénétiquement peuvent avoir des fonctionnalités proches (*e.g.* diplopodes et isopodes).

Deux mécanismes constituent les piliers de cette notion de diversité fonctionnelle :

- Il existe des complémentarités ou facilitations entres espèces, qui aboutissent à une augmentation de l'intensité du processus considéré de l'écosystème au-delà de la somme des effets monospécifiques individuels sur ce même processus (Hedde, 2006; Heemsbergen *et al.*, 2004; Postma-Blaauwa *et al.*, 2006).

- Il existe des espèces clefs très performantes vis-à-vis des processus, appelées « key components » (Schulze et Mooney, 1994). Ainsi, si on augmente de manière aléatoire le nombre d'espèces d'une communauté, on augmente la probabilité que la communauté contienne une de ces espèces, dont en position préférentielle les vers de terre (Huhta, 2007).

La complémentarité de ces deux mécanismes permet d'expliquer des résultats obtenus sur des communautés complexes.

2.2.2.2 Les classifications fonctionnelles

La faune du sol pris sous l'angle d'un facteur d'influence des processus du sol a fait l'objet d'une classification fonctionnelle (Lavelle, 1997) qui contient trois groupes basés sur leur capacité à créer des structures biogéniques et leur relation avec la microflore du sol :

- Les microprédateurs : ces prédateurs régulent les communautés de microorganismes. Ce sont essentiellement des protozoaires et/ou nématodes.
- Les décomposeurs : ils fragmentent et consomment des matières organiques provenant essentiellement de la litière. Par ces deux activités, ils contribuent à réguler le cycle de la matière organique en créant des biostructures holorganiques qui sont favorables aux microorganismes et à leur activité de dégradation. Ce sont certains acariens (Oribates), des collemboles, certains vers (épigés et anéciques), des enchytréides, des isopodes, des insectes.
- Les ingénieurs de l'écosystème : ils consomment de la matière organique et de la matière minérale du sol, créant ainsi des structures organo-minérales : les galeries qui résultent de la consommation de sol, les turricules qui sont les produits de la digestion et les « middens » ou modexis (Decäns *et al.*, 2001) qui résultent du transport de mélange de particules de sol et de matière organique décomposée et/ou de litière (Brown *et al.*, 2000). Ces structures contribuent à modifier physiquement la structure du sol et à modifier directement ou indirectement la disponibilité des ressources pour les autres espèces. Les ingénieurs régulent ainsi la structure du sol et le cycle de la matière organique par leurs diverses influences sur les autres organismes de la faune et de la flore. Parmi les invertébrés du sol, les vers de terre

jouent un rôle majeur. Ils ont une grande influence sur les processus physiques, chimiques et biologiques du sol et sont considérés comme les principaux ingénieurs de l'écosystème du fait du caractère homogène de leur déplacement dans le sol (Jouquet *et al.*, 2006).

Les groupes écomorphologiques ont été développés au sein d'un même taxon pour certains taxons tels que les collemboles et les vers. Ces classifications mettent en relation des traits écologiques avec des traits de taille.

On distingue par exemple, chez les collemboles (Gisin, 1943), les épiédaphiques qui vivent à la surface et dans la litière. Ils vivent dans des milieux instables mais pourvus de nombreuses ressources. Ils sont gros, avec des grandes antennes et pattes, des ocelles pigmentés et sont résistants à la dessiccation. Ils recolonisent très vite les sols défaunés. Leur stratégie démographique s'apparente à la stratégie r (MacArthur et Wilson, 1967), stratégie adaptée aux milieux instables à reproduction et mortalité élevées. Les euédaphiques vivent dans les pores des horizons plus profonds. Ils vivent donc dans des milieux stables mais faibles en ressources. Ils ne sont pas pigmentés et ont des pattes et des ocelles réduits. Leur stratégie démographique s'apparente à la stratégie K (MacArthur et Wilson, 1967), stratégie adaptée aux milieux stables à reproduction et mortalité faibles. Enfin, les hémiédaphiques ont des critères des deux groupes sans les posséder tous en même temps. Toutefois, ces limites ne sont pas franches et les caractéristiques décrites ci-dessus sont très malléables. En effet, la distribution verticale des collemboles dépend beaucoup de la microstructure du sol, de l'humidité relative et de la disponibilité des ressources (Haarlov, 1955).

De la même manière, on distingue chez les vers (Bouche, 1972), les épigés qui vivent dans la litière et la consomment ainsi que les microorganismes qui s'y trouvent (Brown *et al.*, 2000). Ils sont petits et monochromes, pigmentés en vert ou rouge. Ils sont sujets à des dessiccations fréquentes, des températures élevées et une forte pression des prédateurs. Ils sont soumis à une forte mortalité mais utilisent une nourriture de qualité élevée qui permet un développement rapide et une fécondité élevée. Leur stratégie démographique s'apparente à la stratégie r (MacArthur et Wilson, 1967). Les anéciques vivent dans des galeries verticales permanentes et consomment des matières organiques liées à de la matière minérale et participent à l'enfouissement de la litière en

profondeur (Brown *et al.*, 2000). Ce sont des gros vers avec une pigmentation dorsale noire et une musculature antérieure puissante. Ils sont soumis à une faible mortalité mais utilisent une qualité de nourriture faible qui les contraint à un développement lent et à une fécondité basse. Leur stratégie démographique s'apparente à la stratégie K (Lavelle et Spain, 2001). Enfin, les endogés vivent essentiellement dans les galeries verticales et horizontales temporaires qu'ils creusent afin de consommer exclusivement la matière organique du sol. Ils sont apigmentés et géophages. Un ver endogé ingère en effet 5 à 30 fois son poids par jour du fait du faible taux d'assimilation de carbone ingéré (8-19%). Il produit également une grande quantité de mucus qui est un stimulateur microbien (Brown *et al.*, 2000). Leur stratégie démographique s'apparente à la stratégie K (Lavelle et Spain, 2001). Selon la taille des molécules organiques consommées, on distingue alors les polyhumiques, les mésohumiques et les oligohumiques.

Chez de nombreux taxons, il n'existe pas de classification en catégories écologiques, car ils exploitent les ressources du sol de manière assez homogène (Lavelle et Spain, 2001). C'est le cas par exemple des enchytréides.

Dans le cadre de la thèse, nous utiliserons une classification fonctionnelle-écomorphologique qui sera basée en premier lieu sur la classification fonctionnelle *sensu stricto*, puis lorsqu'elle existe pour le taxon considéré, sur la classification écomorphologique. Par exemple, si nous utilisons les vers de terre *Lumbricus terrestris* et *Apporectodea caliginosa* nous considérerons le premier comme représentant du groupe « des ingénieurs de l'écosystème anéciques » tandis que le second sera considéré comme représentant du groupe « des ingénieurs de l'écosystème endogés ». Si nous utilisons par contre, le collembole *Folsomia fimataria* et le cloporte *Porcellio scaber*, nous considérerons le premier comme représentant du groupe « des décomposeurs hémiédaphiques » tandis que le second sera considéré comme représentant du groupe « des décomposeurs ». Toutefois, il faut garder en mémoire que même si ces classifications ont permis de résoudre certaines incompréhensions observées en travaillant au niveau spécifique, elles ne sont que des hypothèses théoriques (Figure 2) qui possèdent leurs limites :

- le fait que certains taxons appartiennent à plusieurs groupes fonctionnels. Les vers de terre épigés, par exemple, bien que classés dans les ingénieurs de l'écosystème

présentent parfois des comportements proches des décomposeurs. Les espèces ont globalement des effets partiellement substituables (*hypothèses nulle, de redondance et des rivets*) (Hedde, 2006; Naeem *et al.*, 2002).

- d'autre part, le fait qu'une espèce peut conditionner la variation du processus considéré (*hypothèse espèce-clef*) (Naeem *et al.*, 2002) ou qu'au contraire qu'en l'absence d'une espèce, l'effet ne peut plus être compensé (*hypothèse additive*) (Naeem *et al.*, 2002) nous prouve que la contribution de chaque espèce est donc unique (Hedde, 2006).
- enfin, l'effet de la diversité fonctionnelle dépend du contexte (*hypothèse idiosyncrasique)* (Naeem *et al.*, 2002). Par exemple, il a été démontré que l'effet des décomposeurs de litière sur la respiration du sol n'est visible que lorsque le milieu est pauvre en nutriments (Petersen, 1994). Au contraire lorsque le stress est trop important, aucun effet de la diversité n'est visible (Liiri *et al.*, 2002a). L'effet de la diversité fonctionnelle dépend donc du contexte abiotique. Par ailleurs, il a été démontré par exemple, que pour un niveau de diversité donné (*e.g.* diversité fonctionnelle) la variation du processus considéré peut être expliquée en partie par des différences en termes de composition spécifique. L'ordre d'ajout ou de suppression des espèces jouerait également un rôle dans la réponse observée (*hypothèse de discontinuité*) (Hedde, 2006; Naeem *et al.*, 2002).

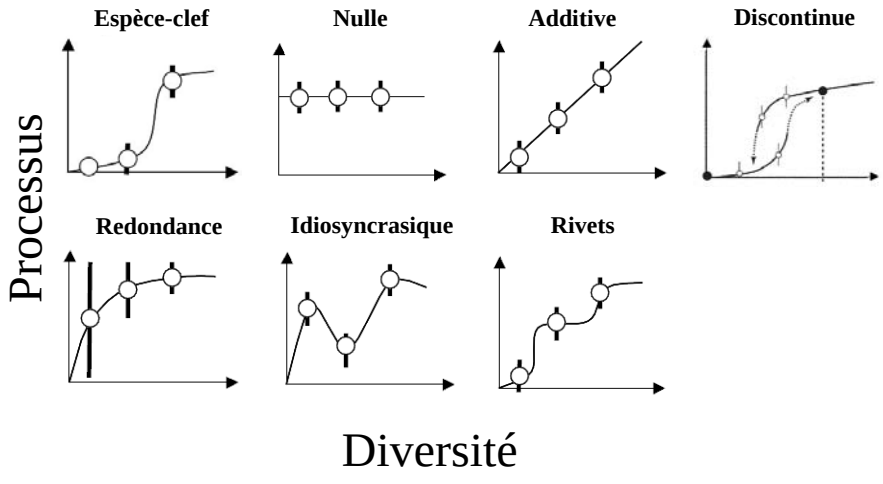


Figure 2. Hypothèses des relations entre la biodiversité et l'intensité des processus de l'écosystème (Naeem* et al.*, 2002).

Les notions théoriques de groupes fonctionnels sont des supports développés par les écologistes afin de mieux comprendre les phénomènes observées et ne sont en rien des barrières rigides et universelles. Il sera nécessaire de replacer chaque résultat expérimental dans son contexte d'étude afin d'éviter toute prédiction trop hâtive. Il n'existe pas encore d'outil performant reliant la biodiversité de la faune avec son influence sur le fonctionnement du sol. Une perspective de recherche consiste alors en l'étude de traits fonctionnels en complément de la diversité fonctionnelle (Vandewalle *et al.*, 2010).

2.2.3 Caractérisation de la contribution de la faune du sol aux processus et conséquences sur le fonctionnement des sols

Les organismes du sol influencent les processus d'évolution des sols et ont un rôle dans la délivrance des fonctions du sol, à l'échelle du profil et/ou de la parcelle (*e.g.* fonctions de support de végétation et de biodiversité, de stockage d'eau et de nutriments, de filtre) qui contribuent aux services écosystémiques (régulation du climat, du cycle de l'eau et des nutriments, de l'érosion) à l'échelle de l'écosystème (Barrios, 2007; Lavelle *et al.*, 2006).

Il serait laborieux de vouloir décrire l'ensemble des contributions de la faune aux processus et d'envisager leurs conséquences à toutes les échelles (profil de sol, écosystème). C'est pourquoi l'objet de cette partie est de décrire l'ensemble des contributions de la faune du sol concernant deux groupes de processus bien distincts :

- les processus en lien avec la dynamique de la structure du sol et plus particulièrement de l'agrégation,
- les processus en lien avec les transferts d'eau, de matière et d'éléments, en considérant essentiellement le carbone.

Nous décrirons alors la contribution de la faune de l'échelle de l'agrégat (quelques nm à microm à quelques cm) à l'échelle du profil de sol ou pédon (de l'ordre du centimètre pour atteindre un profil de sol modèle de l'ordre du mètre carré de surface sur plusieurs mètres de profondeur). Ainsi nous ne développerons leurs conséquences que sur les fonctions du sol sans aller jusqu'aux services écosytémiques. Nous envisagerons l'effet

de la faune du sol en séparant l'effet des ingénieurs de l'écosystème de celui des décomposeurs (Figure 3).

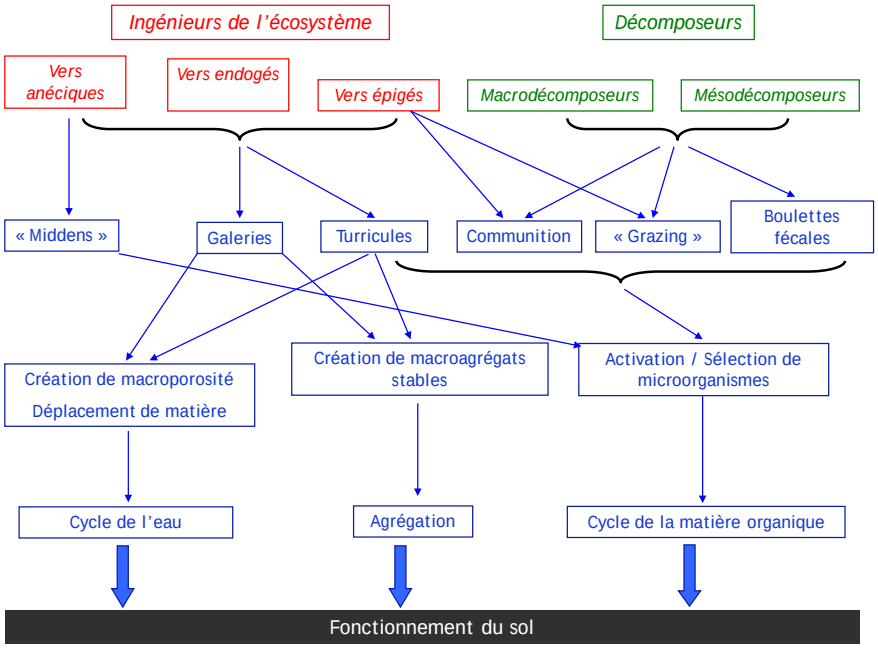


Figure 3. Rôle de la faune dans les sols naturels en climat tempéré.

2.2.3.1 Effets des ingénieurs de l'écosystème

Nous prendrons le ver de terre comme exemple illustratif des effets des ingénieurs de l'écosystème sur les processus du sol.

2.2.3.1.1 Rôle des galeries

La production de galeries par les vers de terre résulte, d'une part de l'ingestion et de l'excrétion de sol sous forme de turricules, mais aussi de compactions latérales (Kersanté, 2003).

Par la production même de galeries, le ver de terre change la structure du sol en modifiant les propriétés de la macroporosité (Figure 3) (Capowiez *et al.*, 2001; Jégou *et al.*, 1998; Milleret *et al.*, 2009). En créant des surfaces telles que les parois des galeries, le ver peut aussi modifier les propriétés de la microporosité (Jégou *et al.*, 2001). La production de cutanes, par exemple, chez certaines espèces (*e.g. Lumbricus terrestris*), turricules compactés contre la paroi des galeries, conduit à diminuer la porosité (Jégou *et al.*, 1998; Kersanté, 2003).

Les galeries, du fait de leurs parois enduites de mucilage et de la réorientation des argiles consécutive à la compaction du passage du ver, contribuent aux processus d'agrégation du sol (Figure 3) (Six *et al.*, 2004). Il a été montré que les galeries pouvaient avoir un rôle majeur dans la stabilité du sol soumis à une compaction intentionnelle (Schrader *et al.*, 2007). L'effet indirect des galeries sur les microorganismes peut avoir une influence sur leur stabilité en favorisant la microagrégation bactérienne dans les parois.

L'augmentation de la macroporosité joue un rôle direct sur les transferts d'eau et de solutés (Edwards *et al.*, 1990; Lee, 1985; Schrader *et al.*, 1995). En présence de vers de terre, la teneur en eau, le potentiel matriciel, et le taux d'infiltration sont modifiés (Ernst *et al.*, 2009). En fonction du groupe écomorphologique considéré (Ernst *et al.*, 2009), la surface a tendance à s'assécher et les taux d'infiltration d'eau augmentent (endogés, anéciques) ou la surface du sol a tendance à augmenter ses réserves en eau (épigés).

Les parois de galeries sont également plus riches en carbone et en azote (Jégou *et al.*, 2001). Ceci résulte d'un effet direct du ver de terre (essentiellement les espèces anéciques) qui enrichit les galeries par un enfouissement de la matière organique en profondeur et par une production de composés organiques (mucus) qui tapissent la galerie. Un effet indirect est dû à la colonisation et/ou l'activation et/ou la sélection de microorganismes qui favorisent, entre autres, la minéralisation des éléments carbonés. Il est d'ailleurs démontré que les activités enzymatiques sont plus fortes dans les parois que dans le sol environnant (Jégou *et al.*, 2001)

La production de cutanes constitue en soi un transfert de matière. Elle entraîne un déplacement de matière conséquent qui pourra moduler les effets observés sur les transferts d'eau et de solutés, en réduisant la porosité (Jégou *et al.*, 1998; Kersanté, 2003). En outre, il a été montré que ces surfaces présentent une structure favorable aux microorganismes tels que les bactéries (Santruckova *et al.*, 1993; Zhang et Schrader, 1993), ce qui pourrait donc engendrer des différences au niveau de la minéralisation.

La nature et l'intensité de ces changements dépendent bien entendu de l'abondance, de la taille, de la forme, de l'orientation, de la connectivité des galeries (Edwards *et al.*, 1990; Lee, 1985; Schrader *et al.*, 1995), qui dépendent en parti du groupe écomorphologique concerné (Capowiez *et al.*, 2001; Jégou *et al.*, 1998) mais aussi très

fortement du contexte abiotique (*e.g.* propriétés du sol, conditions climatiques)(Kretzschmar, 1991).

2.2.3.1.2 Rôle des turricules

La production de turricules par les vers de terre (Figure 3) résulte de l'excrétion de sol à la surface ou dans le profil de sol.

Par la production même de turricules, le ver contribue à modifier la répartition de la texture du sol par l'ingestion de particules fines qui se retrouve excrétées dans les structures biogéniques organo-minérales que sont les turricules. Par le mélange de matières organiques et minérales qui a lieu dans son intestin (Kersanté, 2003) il modifie également la structure du sol (Figure 3). De nombreuses études ont démontré que les turricules, qui sont des macroagrégats, sont plus stables que le sol environnant (Six *et al.*, 2004). Pour certains auteurs, cette stabilité augmente avec la profondeur, car les turricules sont protégés des aléas climatiques (Whalen *et al.*, 2004). D'autres considèrent qu'au contraire le turricule de surface (Hindell *et al.*, 1997), soumis à des sécheresses répétées (cycle réhumectation-séchage), forme un agrégat très stable difficilement dégradable (Marinissen et Dexter, 1990). La stabilité du turricule dépend très fortement de la quantité et de la qualité de la matière organique ingérée (Buck *et al.*, 2000; Marinissen et Hillenaar, 1997; Shipitalo et Protz, 1988). Plus la quantité de matière organique ingérée est élevée (Marinissen et Hillenaar, 1997) et plus elle contient de matières décomposables (Buck *et al.*, 1999), plus le turricule est stable. La production de turricules influence également la formation de microagrégats. D'une part, pendant le transit intestinal, les matériaux sont intimement mixés et mêlés au mucus pour former de nouveaux noyaux de microagrégats (Barois *et al.*, 1993; Shipitalo et Protz, 1989,1988). D'autre part, comme dans le cas des galeries, la microagrégation bactérienne pourra être favorisée par l'effet indirect des turricules sur les microorganismes.

Les turricules présentent des teneurs en carbone organique (C_{org}) et en azote plus élevées que le sol environnant (Figure 3) (Buck *et al.*, 1999; Zhang et Schrader, 1993). Ceci est dû à l'incorporation de sources de matières organiques dans le turricule plus qu'à des processus directs ou indirects liés à la digestion du ver (Devliegher *et al.*, 1996). Toutefois, cette plus grande quantité de carbone, engendre la colonisation et/ou

l'activation et/ou la sélection de microorganismes qui favorisent la minéralisation, expliquant la plus forte teneur en azote. Ainsi, si le turricule est détruit sous l'effet du climat, il participera activement au turn-over de la matière organique. Au contraire, lorsque le turricule se stabilise dans le temps, le carbone est protégé dans des microagrégats et la participation au cycle de la matière organique est faible (Six *et al.*, 2004). La nature et l'intensité de ces changements dépendent de l'abondance, de la taille, et de la localisation des turricules, qui dépendent en partie du groupe écomorphologique concerné (Bouche, 1972) et aussi très fortement du contexte abiotique (*e.g.* propriétés du sol, conditions climatiques) (Buck *et al.*, 2000,1999; Marinissen *et al.*, 1996; Scullion et Ramshaw, 1988; Shipitalo et Protz, 1988; Whalen *et al.*, 2004).

Par le déplacement de matière via les turricules, le ver peut changer localement la teneur en eau et le potentiel matriciel du sol. Par exemple, l'infiltration de l'eau est augmentée en présence de l'espèce anécique *Amynthas khami* consécutivement à une simulation d'écoulement d'eau (Jouquet, 2008).

2.2.3.1.3 Les middens

La production de middens par les vers de terre anéciques (Figure 3) consiste en l'accumulation de turricules de surface, de feuilles et de matériaux organiques déplacés dans et autour d'une ouverture de galeries (Brown *et al.*, 2000). A notre connaissance, il existe peu d'études sur l'effet des middens sur la structure du sol (Lamparski, 1985). Toutefois, on peut supposer que ces structures biogéniques, si elles sont nombreuses, peuvent substantiellement changer la structure et l'agrégation du sol. Les middens sont des structures qui par leur constitution en matière organique sont favorables aux microorganismes et aux autres espèces de la faune, notamment dans la litière. La décomposition de la matière organique y est accélérée. Ces structures fonctionnent comme des « rumens externes » (Swift *et al.*, 1979).

2.2.3.2 Effets des décomposeurs

L'ensemble des décomposeurs (acariens, collemboles, enchytréides, vers de terre épigés, isopodes, millipèdes et larves d'insectes) consomme des microorganismes sur les tissus organiques (« grazing »). Cette action est basée sur les capacités enzymatiques des animaux (Berg *et al.*, 2002) et/ou l'attirance pour certaines espèces de microorganismes

(Jørgensen *et al.*, 2005; Maraun *et al.*, 2002; Moody *et al.*, 1995; Zimmer *et al.*, 2003). Les décomposeurs participent à la communition de la litière et construisent des structures biogéniques holorganiques (boulettes fécales) (Brussaard, 1998; Lavelle, 1996), contribuant de manière générale à inoculer et réguler les populations microbiennes de la litière (Figure 3) :

- le « grazing » entraîne des variations de communautés (Hanlon et Anderson, 1979,1980; Swift et Boddy, 1984), une augmentation de l'activité microbienne (Kandeler *et al.*, 1994; Kautz et Topp, 1998; Scholle *et al.*, 1992) et facilite la dispersion des cellules (Swift et Boddy, 1984),
- la communition crée des surfaces nouvelles (Hanlon, 1981) susceptibles d'être colonisées par d'autres microorganismes (Daniel et Anderson, 1992; Hassal *et al.*, 1987),
- les structures holorganiques servent d'incubateurs pour les microorganismes (Lavelle, 1996) et/ou peuvent être réingérées par les organismes qui les ont produites (*Porcellio scaber* réingère ses boulettes fécales pour assimiler du cuivre (Kautz *et al.*, 2002b)) ou par d'autres coprophages (Szlávecz et Pobozsny, 1995; Zimmer et Topp, 2002b) afin d'assimiler les produits de dégradation.

Toutefois, il a été montré que les décomposeurs appartenant à la mésofaune n'ont pas d'effet sur la respiration totale du sol en dehors de conditions extrêmes où les nutriments sont limités (Petersen, 1994). Au contraire, en présence de macroarthropodes décomposeurs, celle-ci est modifiée de plus de 30% (Brussaard, 1998). Il convient donc de distinguer les macrodécomposeurs des microdécomposeurs dans une logique fonctionnelle. Les macrodécomposeurs consomment de la matière organique pure et développent une digestion mutualiste avec la microflore et peuvent parfois contribuer à la fragmentation de la litière tandis que les microdécomposeurs se nourrissent de matière organique, bactéries et champignons. Un exemple de macrodécomposeur est le cloporte. Les cloportes, avec les mille pattes sont essentiels dans la détritusphère (Løkke et Van Gestel, 1997). Ils sont des saprophages qui ingèrent préférentiellement des matériaux décomposés dont la teneur en polyphénol est faible. Ils pratiquent la coprophagie du fait (i) d'un besoin de cuivre pour leur cuticule, (ii) de l'attractivité des fèces qui sont riches en microorganismes contenant un pool d'enzymes

susceptibles de faciliter la digestion de nutriments essentiels (Kautz *et al.*, 2002a). La coprophagie peut résulter en la diminution du rapport C/N (Zimmer et Topp, 2002a). Il a été montré que le nombre de cloportes est corrélé à une plus forte respiration et une activité cellulolytique des microorganismes de la litière (Zimmer et Topp, 1999). Un exemple de microdécomposeurs est le collembole. Ils influencent la biomasse et l'activité microbienne par leurs effets de prédation et de dispersion des microorganismes (Arpin *et al.*, 2001; Bardgett et Chan, 1998). Ils participent également à l'incorporation du carbone de la litière dans le sol, ce qui contribue à augmenter la quantité de carbone disponible pour les microorganismes (Chamberlain *et al.*, 2006) et augmenter les teneurs en C_{org} et nitrates de la solution du sol (Cragg et Bardgett, 2001; Pieper et Weigmann, 2008).

Enfin, l'influence des décomposeurs sur la structure et l'agrégation est, pour ce qui est connu, moins marquée que celle des ingénieurs de l'écosystème. Par la production de structures holorganiques et la communition de la litière, les décomposeurs modifient la structure du sol, au moins en surface. Toutefois, l'absence de structures biogéniques organo-minérales et un faible rayon d'action limitent la contribution des décomposeurs aux processus d'agrégation. Néanmoins, certains macrodécomposeurs peuvent avoir une influence indirecte sur les processus d'agrégation. Par exemple, le diplopode *Pseudopolydesmus erasus* baisse la teneur en agrégats stables en présence du ver *Amynthas corticis* (Snyder *et al.*, 2009) et *Porcellio scaber* augmente la quantité de macroagrégats du ver endogé *Apporectodea caliginosa* (Loranger-Merciris *et al.*, 2008).

3 La faune du sol comme outil de restauration des sols très anthropisés

L'altération des sols par l'activité humaine a suscité le développement de procédés de réhabilitation des sites très anthropisés. La restauration écologique peut alors avoir un intérêt économique et peut surtout limiter l'utilisation de ressources naturelles consécutive au déplacement de terres (Bradshaw, 2000; Urbanska *et al.*, 2004). Cette restauration qui vise à refonctionnaliser l'écosystème (Bradshaw et Hüttl, 2001), se focalise trop souvent exclusivement sur l'installation d'un couvert végétal (Dickinson, 2000; Smyth et Dearden, 1998; Wali, 1999). La faune du sol est alors le maillon

chronologique suivant de la restauration écologique, sans jamais être considérée comme un agent à part entière du fonctionnement et de l'évolution du sol (Boyer et Wratten, 2010; Bradshaw et Hüttl, 2001; Snyder et Hendrix, 2008). Si en l'absence de végétation, l'implantation durable de la faune est impossible, il a également été prouvé que la faune du sol a des effets sur la pédogenèse et sur la refonctionnalisation des sols (Frouz *et al.*, 2007). Cette partie de l'état de l'art va prendre en compte des résultats obtenus selon un gradient d'anthropisation croissant allant des Anthroposols transformés aux Technosols construits. Nous distinguerons autant que possible, les réponses des effets de la faune.

3.1 L'expérience des polders : exemple de restauration d'anthroposols transformés

Crées dans les années 1960-70, les polders néerlandais sont des sols qui ont été gagnés récemment sur la mer (Ester et van Rozen, 2002) et sont *a priori* dépourvues de (macro)faune lors de leur aménagement.

3.1.1 Réponses de la faune du sol

Une grande partie des études néerlandaises réalisées sur les polders se sont focalisées sur un seul groupe taxonomique : les vers de terre, sauf quelques rares exceptions (Meijer, 1974,1980). L'absence avérée de vers de terre dans les polders (Hoogerkamp *et al.*, 1983) a entraîné des inoculations de vers de terre et/ou l'étude de leur colonisation naturelle. Plus de dix ans après l'inoculation locale de vers de terre, on retrouve des populations contenant les inoculum de départ (Hoogerkamp *et al.*, 1983). L'abondance totale de vers et la distance à laquelle on les retrouve augmente progressivement avec le temps (Stein *et al.*, 1992)(Figure 4 & Figure 5).

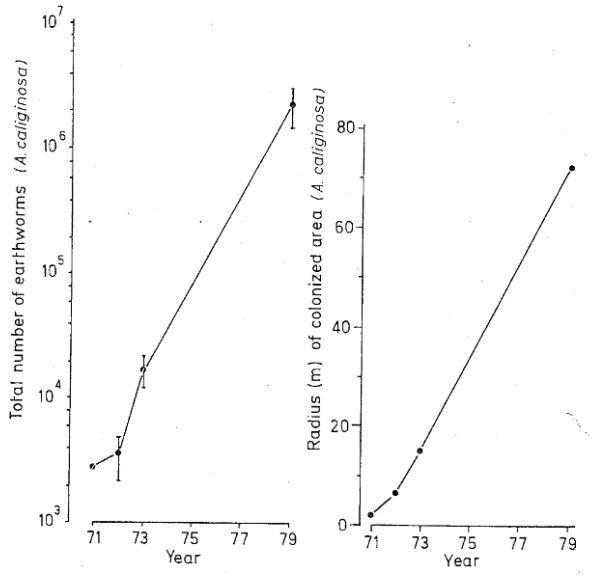


Figure 4. Abondance totale d'*Apporectodea caliginosa *(à gauche) et distance colonisée par* Apporectodea caliginosa *(à droite) en fonction du temps dans un polder (Hoogerkamp* et al.*, 1983).

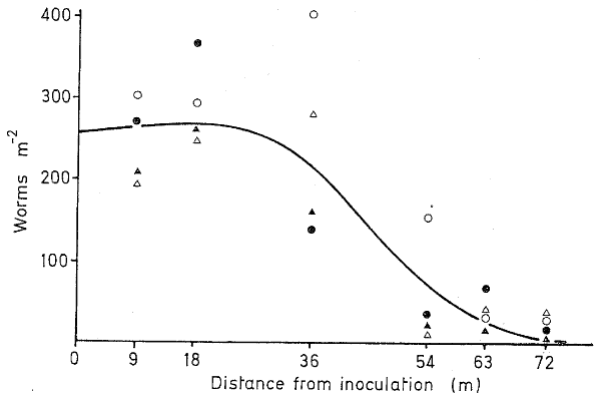


Figure 5. Abondance d'*Apporectodea caliginosa *en fonction de la distance d'inoculation après 10 ans sur un polder (Hoogerkamp* et al.*, 1983).

Les espèces *Appporectodea caliginosa* et *Lumbricus rubellus* (Marinissen et Van den Bosch, 1992) apparaissent comme les vers les plus rapides à la colonisation. Si aucun anécique n'est volontairement introduit, cette catégorie écomorphologique reste absente. Les vers anéciques, à reproduction lente, sont connus pour être des colonisateurs lents (Marinissen et Van den Bosch, 1992), d'autant plus que les stress extérieurs sont sévères. Par exemple, les pratiques culturales répétées peuvent détruire les structures biogéniques permanentes de ces animaux (galeries, middens) (Marinissen, 1994). Les densités de vers de terre s'échelonnent de 200 vers/m^2 (Hoogerkamp *et al.*, 1983) jusqu'à 650 vers/m^2 (grandes proportions d'immatures)

environ (Marinissen, 1994). Elles peuvent donc être élevées comparativement à des densités moyennes en sol arables (260 individus/m^2 (Cluzeau *et al.*, 2009)).

3.1.2 Effets de la faune du sol

L'inoculation de vers de terre a tout d'abord un effet net et marqué sur la structure (macro et micro-) du sol. La création nette de galeries atteint 110 mm^2/an entre 0,6 et 0,9 ans après l'inoculation (Ligthart et Peek, 1997). La verticalité des galeries s'accentue avec le temps. Le volume total de galeries est étroitement corrélé à la biomasse lombricienne, augmentant rapidement dans les premiers temps après l'inoculation et diminuant ensuite (Ligthart et Peek, 1997). La part de galeries connectées entre elles relativement à la totalité du réseau suit ces mêmes variations. La présence de vers diminue ainsi la compaction du sol (Hoogerkamp *et al.*, 1983). Par ailleurs, par la production de turricules, la présence de vers modifie l'agrégation en limitant la présence d'agrégats prismatiques et anguleux (Jongmans *et al.*, 2003). Les agrégats produits par les vers dans les polders sont aussi plus stables que les agrégats non bioturbés (Marinissen, 1994; Marinissen *et al.*, 1996). Les turricules plus âgés, soumis à des cycles de sécheresse répétés, semblent plus stables que les turricules frais. Ceci résulterait plus de la réorientation des argiles et des matières organiques dans le tube digestif du ver par des processus thixotropiques qui modifient les contacts entre les particules minérales et les substances de liaisons qu'à la teneur en polysaccharides ou à des processus associés aux microorganismes (Marinissen *et al.*, 1996). La décalcification du sol est moindre en présence de vers (Jongmans *et al.*, 2003), ce qui pourrait être un facteur déterminant dans la stabilité du sol. La trop forte activité des vers peut avoir des conséquences drastiques sur le sol en modifiant sa stabilité (Ester et van Rozen, 2002; Hoogerkamp *et al.*, 1983). Par exemple, la présence d'*Apporectodea caliginosa* et d'*Apporectodea rosea* dans un polder a abouti à la formation d'une croûte superficielle qui entrave le passage des engins agricoles et donc la récolte (Ester et van Rozen, 2002).
Sous l'angle des transferts d'eau et de matière, le plus grand nombre de galeries a pour conséquence d'augmenter la capacité d'infiltration et la conductivité de l'eau, de l'air et de l'oxygène (Hoogerkamp *et al.*, 1983). Par ailleurs, l'activité lombricienne favorise l'enfouissement du carbone en profondeur. On observe ainsi la formation d'une couche d'humus dont l'épaisseur augmente avec le temps (Hoogerkamp *et al.*, 1983). Les

teneurs totales en carbone et en azote augmentent dans les premières années puis stagnent, laissant place à une redistribution de ces éléments en profondeur (Hoogerkamp *et al.*, 1983; Jongmans *et al.*, 2003). C'est aussi le cas pour la teneur en calcite, elle diminue moins qu'en absence de vers (Jongmans *et al.*, 2003). Le ratio C/N a tendance à augmenter. Par ailleurs, le taux de carbone minéralisé est plus bas en présence de vers de terre, ce qui indique une meilleure efficacité d'utilisation des substrats par les microorganismes et/ou une meilleure protection physique. En présence de vers, les particules organiques sont fines (<50 microm) et sont encapsulées dans les turricules (Jongmans *et al.*, 2003; Pulleman *et al.*, 2005).

L'influence des vers sur l'agrégation et le cycle de la matière organique dépend donc des paramètres abiotiques et du type d'usage des sols de polders (Pulleman *et al.*, 2005) qui joue à la fois sur les réponses et les effets. Par exemple, dans les polders, plus le sol est riche en matière organique, plus il y a d'agrégats stables formés par les vers, plus ils contiennent de carbone protégé et plus la minéralisation est régulée (Marinissen et Hillenaar, 1997).

3.2 L'expérience des sols contaminés des mines de charbon à ciel ouvert : exemple de restauration d'anthroposols artificiels

Avant l'exploitation minière, les sols décapés sont couramment stockés en tas avant d'être réutilisés en couverture après l'arrêt des activités (Boyer et Wratten, 2010; Scullion, 1992). Lors de ces opérations, la structure du sol est détruite par foisonnement ou par mélange avec des sous produits de l'exploitation minière (Schwenke, 2000). Les propriétés écologiques du sol (abiotiques et biotiques) sont modifiées de manière drastique. Le sol nu est déstructuré, avec des conditions d'humidité et de température extrêmes et un manque de nourriture chronique pour la faune du sol (Curry et Cotton, 1983; Snyder et Hendrix, 2008). Durant l'excavation, la pyrite s'oxyde et entraîne une forte acidification, libérant des métaux comme l'aluminium, le fer et d'autres éléments traces (Boyer et Wratten, 2010; Lu *et al.*, 2005).

3.2.1 Réponses de la faune du sol

Des études à long terme ont mis en évidence la présence de nombreux représentants de la faune du sol (Dunger et Voigtländer, 2005; Dunger *et al.*, 2001; Frouz *et al.*, 2001) : pour la macrofaune : des vers de toute catégorie écomorphologique, des opilions, des araignées ; pour la mésofaune : des collemboles, des acariens, des protoures, des nématodes. A l'échelle d'un sol naturel, les premières contraintes sont inhérentes à la localisation géographique du site (Belyea et Lancaster, 1999; Hedde, 2006; Kelt *et al.*, 1995), puis viennent les contraintes de dispersion et d'habitat. Les contraintes de dispersion sont ici fondamentales, puisque le sol possède peu de faune lors de sa mise en place (Armstrong et Bragg, 1984). Pour les vers, les anéciques sont les derniers colonisateurs de ces espaces (Baker *et al.*, 2006).

Ensuite, la présence de la faune dans un milieu construit est inféodée à la nature du milieu où les contraintes d'habitat s'expriment (*e.g.* pratiques culturales, (Decaens *et al.*, 2008)). L'ensemble des modifications des propriétés du sol (*e.g.* pH, qualité et quantité de la matière organique) sont influencées par la végétation plantée (Dunger *et al.*, 2001; Frouz *et al.*, 2001) et vont avoir une influence sur les communautés de faune du sol présentes dans les friches minières par analogie avec les milieux naturels. D'autres contraintes peuvent s'exprimer tels que les pollutions en métaux qui peuvent être létales pour certains animaux (Cortet *et al.*, 1999) alors que d'autres présentent des mécanismes de résistance et/ou d'évitement (Boitaud *et al.*, 2006; Bonnard *et al.*, 2009; Caruso *et al.*, 2009; Cortet *et al.*, 1999; Gillet et Ponge, 2003). De multiples études existent sur les effets des métaux sur les communautés par exemple : de vers (Lukkari *et al.*, 2004; Nahmani *et al.*, 2002), de collemboles (Lock *et al.*, 2003), d'arthropodes (Migliorini *et al.*, 2004), de macrofaune (Nahmani et Lavelle, 2001), de décomposeurs (Haimi et Mätäsniemi, 2002). Les pollutions anthropiques jouent alors un rôle de filtre vis-à-vis des communautés.

En conclusion, les réponses de la faune sont globalement plus dépendantes de filtres environnementaux, en sols de friches minières qu'en sols naturels. Il n'existe pas à notre connaissance d'étude spécifique sur les interactions biotiques dans ces sols. Les contraintes de dispersion, les propriétés écologiques et polluantes perturbent l'implantation d'une communauté de faune diverse et pérenne. Du fait de l'exclusion de

certains groupes taxonomiques et/ou fonctionnels, il faut en général plusieurs dizaines d'années avant de retrouver une communauté similaire à celle des sols naturels (Dunger *et al.*, 2001; Scullion, 1992).

3.2.2 Effets de la faune du sol

Dans les sites miniers, ce sont les ingénieurs de l'écosystème qui ont le plus d'influence. La majeure partie des restaurations écologiques par la faune a fait l'objet d'inoculations volontaires de faune. L'inoculation de vers, d'espèces représentatives de prairies, augmente la porosité dans les 20 premiers centimètres du sol (Marashi et Scullion, 2004) et contribue également à la formation d'agrégats stables en surface dès 6 ans (Marashi et Scullion, 2003). Ces agrégats stables présentent souvent une porosité réduite sont corrélés avec l'abondance d'*Apporectodea longa*, d'*Apporectodea caliginosa* et de *Lumbricus terrestris*. L'inoculation de faune, par son effet sur la macroporosité, augmente cependant l'infiltration d'eau sans que ce drainage artificiel ne suffise à évacuer l'eau excédentaire (Marashi et Scullion, 2004). .

La teneur globale en matière organique ne change pas en présence de vers mais est mieux redistribuée : elle est significativement plus élevée dans le témoin qu'en présence de vers dans les 5 premiers centimètres et la situation s'inverse à partir de cette profondeur (Scullion et Malik, 2000). En revanche, la qualité de la matière organique change avec la présence de vers de terre : le C_{org} est mieux lié avec les argiles et on retrouve plus de carbohydrates qui participent à la stabilisation des agrégats. La protection physique de la matière organique résultant d'une association fine avec les minéraux et/ou une meilleure efficience des microorganismes aboutit à une baisse du taux de minéralisation dans tout le profil du sol. Ceci s'explique par le fait que le ver augmente la biomasse et diminue le quotient métabolique des microorganismes à la surface et inversement en profondeur (Scullion et Malik, 2000).

En conditions contrôlées de laboratoire, avec le gradient de faune suivant : (i) microorganismes seuls, (ii) microorganismes et mésofaune, (iii) microorganismes, mésofaune et décomposeurs de litière (macroarthropodes = millipèdes et larves de diptères), (iv) microorganismes, mésofaune et vers décomposeurs de litière (*Dendrobaena octaedra* et *Dendrodrilus rubidus*) et (v) microorganismes, mésofaune et

Lumbricus rubellus ; Frouz *et al.* (2007) ont montré que la présence de macrofaune conduisait à une disparition de litière significativement plus élevée dans les sites miniers restaurés. Dans les sites miniers non restaurés (qualité trophique de litière plus faible), seuls les vers de terre ont un impact sur la disparition de litière. Par ailleurs, cette disparition de litière est corrélée avec l'accumulation de carbone en profondeur pour les sites miniers restaurés et avec le carbone minéralisé pour les sites miniers non restaurés (Frouz *et al.*, 2007). Enfin, l'accumulation de carbone en profondeur entraîne un accroissement de la respiration et de la biomasse microbienne (Frouz *et al.*, 2007).

Une fois encore, l'influence des vers et plus généralement de la faune sur l'agrégation et le cycle de la matière organique des sites miniers dépend des paramètres abiotiques liés au type d'usage et de restauration des sols.

3.3 La faune du sol et les Technosols construits

La littérature concernant les Technosols construits *sensu stricto* est quasi inexistante. L'analogie doit alors être faite avec l'utilisation de faune dans la restauration de sites lors de dépôts de déchets organiques en surface.

3.3.1 Cas de l'utilisation de déchets organiques dans la restauration de surface des sols naturels et anthroposols

L'augmentation de la production mondiale de déchets industriels et urbains incite à proposer des solutions de valorisation (Boyer et Wratten, 2010). Dans le même temps, le succès de la restauration des sols dépend d'apports de matières organiques (Vetterlein et Hüttl, 1999a) et de l'inoculation de macrofaune (Baker *et al.*, 2006; Haimi, 2000). L'objectif est alors de caractériser les effets des ces amendements sur les réponses et les effets de la faune pour dégager des hypothèses quant aux interactions entre faune et Technosols construits. Ces derniers sont en effet plus que des dépôts de déchets car issus de mélanges raisonnés de matériaux technogéniques choisis.

3.3.1.1 Réponses de la faune du sol

Dans les sols naturels, il a été démontré qu'en présence d'amendements organiques (boues de papeterie, compost urbain), l'abondance, la biomasse et la densité des

populations de vers de terre augmentent (Lapied *et al.*, 2009; Piearce et George, 1998). Ceci est en accord avec le fait qu'augmenter la fertilité du sol par des amendements organiques influence positivement les populations de vers dans les sols agricoles (Berry et Karlen, 1993; Mäder *et al.*, 2002). Dans les sites miniers, la densité de population et la biomasse de vers de terre augmentent par l'application de déchets organiques (boue d'épuration, compost de boues d'épuration, compost de déchets verts) comparativement à des engrais minéraux (Emmerling et Paulsch, 2001). Dans le même contexte, la structure de la communauté de vers implantés intentionnellement change dans le temps et ceci en fonction de la nature et de la quantité du déchet organique considéré (Emmerling et Paulsch, 2001). Toutefois, si l'effet bénéfique des déchets organiques sur la faune du sol a été mis en évidence à court terme, des conséquences à long terme sont à envisager. Il est par exemple connu que le compost de déchets verts entraîne des effets sub-létaux sur les vers qui réduisent leur biomasse à long-terme (Kapanen et Itävaara, 2001).

3.3.1.2 *Effets de la faune du sol*

Dans les sols naturels, l'apport de déchets organiques contribue à une meilleure stabilité de l'agrégation qui peut être reliée à une meilleure activité du ver endogé et à la teneur plus élevée en matière organique du sol lorsqu'il est amendé (Lapied *et al.*, 2009). Il est connu que la stabilité d'un sol est positivement corrélée avec la porosité, la teneur en argile et en matière organique et négativement corrélé avec l'érosion et la compaction (Le bissonais, 1996). Dans les sites miniers également, l'ajout de déchets organiques (boue d'épuration, compost de boues d'épuration, compost de déchets verts) augmente la consommation de sols mixés à des déchets organiques chez *Apporectodea caliginosa* et augmente la création de macroporosité (nombre et longueur des galeries et nombre de branches) chez *Lumbricus terrestris* par rapport à l'ajout d'engrais minéraux (Emmerling et Paulsch, 2001). Ces améliorations substantielles par apport de déchets organiques sont expliquées par une augmentation des ressources en nutriments et une stabilisation des conditions d'humidité et de température dans l'horizon supérieur du sol.

3.3.2 Cas de la construction de sol

3.3.2.1 *Réponses de la faune du sol*

La faune du sol est présente dans des sols construits à partir de boues d'épuration (chaulées, digérées ou non digérées) et/ou d'écorces (compostées ou non) et/ou de sable et/ou de mull (Huhta *et al.*, 1979) : macrofaune (vers de toutes catégories écomorphologiques, macroarthropodes (chilopodes, araignées, coléoptères, larves de diptères), mésofaune (collemboles de toutes catégories écomorphologiques, acariens, enchytréides, nématodes) y sont présents. Encore une fois, les contraintes de dispersion et d'habitat vont jouer un rôle crucial dans la dynamique de successions des communautés. Lors de sa construction, le sol est en effet quasiment vierge de faune, ce qui joue sur les contraintes de dispersion, et l'Homme maitrise la formulation du sol, ce qui joue sur les contraintes d'habitat. Les interactions biotiques interviendront dans une moindre mesure.

Il en résulte ainsi que (i) les nématodes sont présents dans les matériaux utilisés dans la construction de sol et les insectes volants pondent des larves pendant quelques jours puis disparaissent progressivement, (ii) les collemboles sont plus nombreux au bout de quelques semaines et (iii) les oribates immigrent à des stades plus avancés. La communauté est dans les premiers stades, typique de celle rencontrée dans les bouses ou les milieux riches en matière organique décomposable. La succession est rapide puis ralentit pour aboutir à une communauté moins spécialisée. Toutefois, les communautés sont très différentes des sols arables témoins (Huhta *et al.*, 1979). Enfin, il semblerait qu'un effet combiné de la toxicité des boues (métaux) vis-à-vis des vers de terre et de leur vitesse de dispersion faible par rapport aux autres groupes taxonomiques réduise leur présence. Des expériences en laboratoire (Huhta *et al.*, 1979) sur *Apporectodea caliginosa* ont montré une mise en diapause et de sévères diminutions de biomasse. Cette étude a également mis en avant que le compostage des boues ainsi que le mélange des matériaux favorisait la succession des espèces comparativement aux matériaux bruts.

Dans un autre contexte, un sol construit a été formulé à partir de sol d'une décharge et de boues de papeteries (ratio 50:50) d'une hauteur de 40 centimètres, couvert d'une fine

couche de boues de papeteries. Des graines de plantes prairiales ont été semées. Pendant les premiers stades, les vers de terre sont rares et exclusivement composés d'espèces de compost (*Eisenia fetida* et *Eisenia andrei*) (Piearce *et al.*, 2003). L'abondance et la biomasse ont substantiellement augmenté pour toutes les espèces de vers (*Allolobophora chlorotica*, *Apporectodea caliginosa*, *Apporectodea limicola*, *Apporectodea longa*, *Apporectodea rosea*, *Lumbricus castaneus*, *Lumbricus rubellus* et *Lumbricus terrestris*) après leur inoculation (Piearce *et al.*, 2003).

3.3.2.2 Effets de la faune du sol

La seule étude concernant les d'effets de la faune concernant les Technosols construits conclut que la production de turricules est significativement augmentée après inoculations de vers (Piearce *et al.*, 2003).

En conclusion, les apports de matières organiques via des déchets organiques en surface ou lors de construction de sol plus élaborée favorisent la survie de la faune et sa contribution au fonctionnement du sol. Les réponses et les effets de la faune, au moins chez les vers, sont très liés à la nature, la quantité et le procédé de construction de sol (pour les Technosols construits) des déchets considérés.

4 Objectifs de la Thèse

L'état de l'art permet de constater les lacunes de connaissances sur la faune dans les Technosols construits. Toutefois, en élargissant à tous les sols anthropisés, les connaissances génériques suivantes se dégagent :

- les communautés de faune du sol mettent plusieurs années à s'installer, du fait des contraintes environnementales (dispersion, habitat, pollution) et biotiques qui excluent temporairement certains groupes fonctionnels ou groupes taxonomiques,
- la majeure partie des effets significatifs sur le fonctionnement et l'évolution des sols ont été observés lors :
    - ✓ de l'implantation d'individus de la macrofaune, essentiellement des vers de terre (Baker *et al.*, 2006; Butt, 1999; Curry et Cotton, 1983),

- ✓ et/ou de l'apport de matière organique en surface ou en mélange (Haimi, 2000)

qui sont deux opérations susceptibles d'enrichir rapidement le sol en matière organique et d'améliorer sa structure (Haimi, 2000) afin d'y instaurer une régulation naturelle par d'autres acteurs biologiques (autres membres de la faune du sol ; microorganismes).

La présente Thèse se focalisera exclusivement sur la macrofaune et la mésofaune et a pour vocation de répondre à plusieurs objectifs scientifiques et appliqués. Tout d'abord, l'objectif scientifique est de contribuer à l'acquisition des connaissances sur la pédogenèse des sols très anthropisés. Il s'agit d'évaluer l'effet de la faune du sol (macro- et méso-) et de sa diversité sur la pédogenèse des sols très anthropisés au travers d'un modèle, le Technosol construit. L'ensemble des processus pédogénétiques majeurs influencés par la faune seront suivis par des indicateurs fiables et courants en pédologie. Cette approche expérimentale sera complétée autant que possible par une approche modélisatrice. Par ailleurs, nous essaierons autant que possible de prendre en compte l'échelle spatiale en distinguant l'agrégatosphère de l'échelle du pédon. L'agrégatosphère sera définie comme l'échelle qui va de l'agrégat et du pore observés en ultrastructure (quelques nm à microm) à ceux visibles à l'œil nu (quelques cm). L'échelle du pédon sera considérée comme un ensemble d'agrégats et de pores d'une échelle supérieure à celui du cm pour atteindre un profil de sol modèle de l'ordre du mètre carré de surface sur plusieurs mètres de profondeur.

La Thèse se structure ainsi autour de trois questions fondamentales en lien avec les interactions « faune du sol »/ pédogenèse (Figure 6):

Question I : Quel type de faune du sol est susceptible de coloniser le Technosol construit ?

Hypothèse I : La survie de la faune du sol dans un Technosol construit dépend : (i) des contraintes environnementales (dispersion et habitat) et (ii) des interactions biotiques

Question I.1 : Quel est la dynamique des communautés de la faune dans un Technosol construit *in situ* ?

Question I.2 : Quel est l'effet d'un Technosol construit et de son procédé de construction sur la survie de la faune du sol ?

Question I.3 : Quels sont les effets des interactions biotiques internes au sein d'un assemblage composé d'espèces de groupes fonctionnels différents sur la survie de la faune dans un Technosol construit ?

Question II : Est ce que la faune du sol a un effet significatif sur la dynamique de structuration/agrégation, les transferts d'eau, de matière et de carbone au sein d'un Technosol construit ?

Hypothèse II : Les vers de terre ont un effet significatif sur les processus pédogénétiques précédemment cités dans le Technosol construit.

Question II.1 : Quelles sont la nature et l'intensité de cet effet à l'échelle de l'agrégat et en fonction du procédé de construction de sol ?

Question II.2 : Quelles sont la nature et l'intensité de cet effet à l'échelle du pédon ?

Question III : Est ce que la notion de diversité fonctionnelle de la faune existe dans un Technosol construit ?

Hypothèse III : La notion de diversité fonctionnelle existe dans un Technosol construit.

Question III.1 : Y a-t-il des différences de nature et d'intensité de contributions à l'échelle du pédon selon les assemblages de groupes fonctionnels ?

Question III.2 : Y a-t-il des différences de nature de contribution à l'échelle de l'agrégat en fonction du groupe fonctionnel écomorphologique impliqué ?

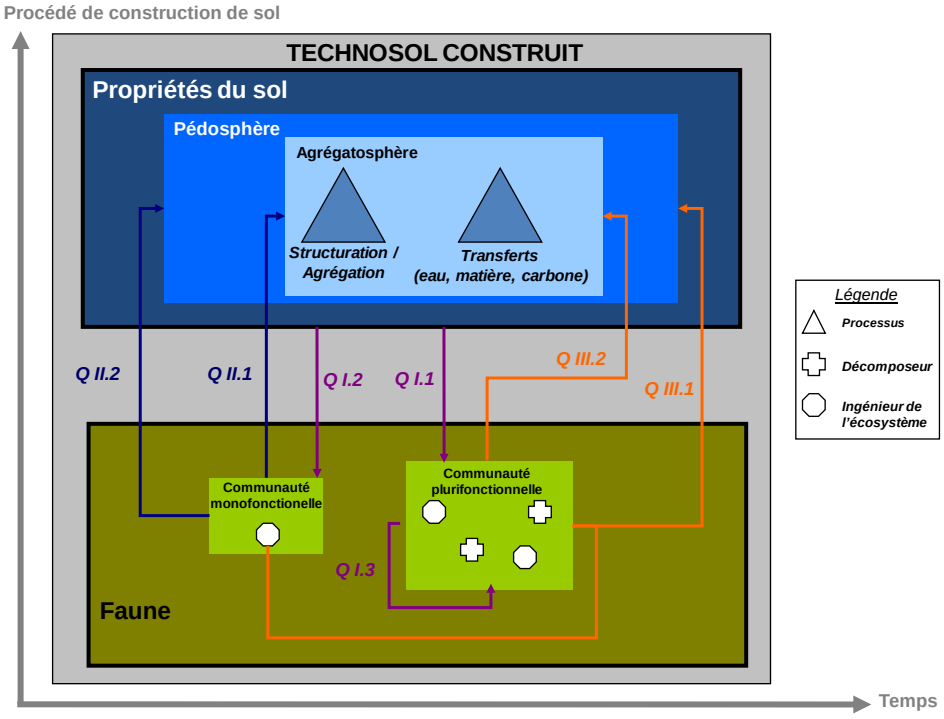


Figure 6. Schéma conceptuel du questionnement scientifique de la Thèse.

Le deuxième objectif de la Thèse est un objectif appliqué. Il s'agit d'évaluer la capacité de la faune du sol à être le catalyseur et/ou le régulateur des processus d'évolution des sols très anthropisés afin de caractériser et d'optimiser les procédés du génie pédologique. Les perspectives se focaliseront essentiellement sur des conseils de gestion de la faune *in situ* et/ou des inoculations potentielles de faune *in situ* dans les Technosols construits.

Chapitre II Matériels et méthodes

Les travaux de la Thèse s'articulent autour d'un modèle expérimental de Technosol construit préalablement décrit (Séré, 2007; Séré *et al.*, 2010; Séré *et al.*, 2008). La construction de sol consiste à combiner entre eux des matériaux technogéniques tels que du compost de déchets verts (CDV), du sous-produit papetier (SPP) ou encore de la terre industrielle traitée (TIT). Dans la première partie (Matériels), nous décrirons les matériaux bruts et les mélanges utilisés dans la construction du Technosol ainsi que les dispositifs expérimentaux dans lesquels ce Technosol construit sera étudié. Dans la deuxième partie (Méthodes), nous présenterons les différentes variantes du modèle de Technosol construit utilisées dans les expérimentations à différentes échelles.

1 Matériels

1.1 Les matériaux bruts et en mélanges

1.1.1 Le compost de déchets verts (CDV)

Le compost de déchets verts utilisé est un produit normalisé NFU 44-051 provenant de la plate-forme de compostage de la Communauté Urbaine de Strasbourg, résultant d'un procédé de fermentation aérobie à haute température de résidus de coupe de déchets verts. Deux approvisionnements de ce compost ont été réalisés au cours de la Thèse : CDV_1 en septembre 2007 et CDV_2 en décembre 2008. Ces composts se caractérisent par une teneur en carbone (C_{org}) très élevée, un rapport C/N faible, témoin d'une forte minéralisation passée, par une très forte capacité au champ (CAC), caractéristique des matériaux riches en matières organiques et par une capacité d'échange cationique (CEC) élevée (Tableau 1). Le CDV peut donc être assimilé à un matériau riche en ressources carbonées et azotées, avec une forte rétention hydrique imposée par les matières organiques qu'il renferme. Par analogie avec les analyses de terres, le CDV est constitué de 47,9 % de terre fine (< 2 mm), 21,9% de graviers et 30,2% de cailloux (> 5 mm) (Figure 7).

Tableau 1. Propriétés agronomiques des différents matériaux et des mélanges utilisés. CDV : compost de déchets verts ; TIT : terre industrielle traitée ; SPP : sous produit papetier (nd : non déterminé).

Paramètres analytiques	*unités*	*CDV_1*	*CDV_2*	*SPP*	*TIT*	*TIT/SPP_1*	*TIT/SPP_2*
argiles	$g.kg^{-1}$	202	225	179	49	113	519
limons fins	$g.kg^{-1}$	190	124	299	59	176	310
limons grossiers	$g.kg^{-1}$	136	102	196	72	86	121
sables fins	$g.kg^{-1}$	164	127	134	177	197	33
sables grossiers	$g.kg^{-1}$	308	288	192	643	428	16
pH		8.41	8,42	8,40	8,97	8,25	6,99
$CaCO_3$ total	$g.kg^{-1}$	124	128	484	245	402	<1
$CaCO_3$ actif	$g.kg^{-1}$	4,44	nd	12,5	nd	8,93	nd
C_{total}	$g.kg^{-1}$	nd	nd	nd	84	nd	nd
C_{org}	$g.kg^{-1}$	176	181	102	55	85,2	40,3
matières organiques	$g.kg^{-1}$	304	314	177	94	147	70
rapport C/N		16,6	14,7	28.3	63,1	38,2	10,5
N_{total}	$g.kg^{-1}$	10,60	12,40	3,61	0,90	2,23	3,84
$N0_3$ extractible	$cmol.kg^{-1}$	20	nd	6,44	0,002	76,6	nd
NH_4extractible	$cmol.kg^{-1}$	19,4	nd	173	0,001	6,42	nd
P_{0lsen}	$cmol.kg^{-1}$	0,351	0,404	0,045	0,049	0,037	0,164
CEC Metson	$cmol.kg^{-1}$	31,6	36	6,72	6,7	10,8	27,1
Ca échangeable	$cmol.kg^{-1}$	29,9	33,7	22,4	45,0	12,8	31,1
Mg échangeable	$cmol.kg^{-1}$	10,0	11,3	0,97	1,0	2,6	3,2
K échangeable	$cmol.kg^{-1}$	6,9	7,9	0,3	0,5	0,9	0,4
Na échangeable	$cmol.kg^{-1}$	0,8	0,8	0,07	0,1	0,4	0,1
Humidité massique à la capacité au champ	(%)	135,4	144,1	nd	nd	89,6	38,1

1.1.2 La terre industrielle traitée par désorption thermique (TIT)

La terre industrielle provenant d'une ancienne cokerie, initialement polluée aux hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), a été criblée (< 5-10 cm) puis traitée par un procédé de désorption thermique. Il consiste en un chauffage à une température

comprise entre 400 et 600°C qui permet la dégradation des polluants organiques, les fumées étant ensuite filtrées. Le matériau qui a été utilisé provenait du site de Homécourt (54) après traitement par la société Deepgreen. La terre industrielle traitée est classée dans la catégorie des déchets provenant de la décontamination des sols et des eaux souterraines (n°19 13) par le Décret n°2002-540 du 18/04/2002 de l'Union Européenne. La TIT se caractérise par une très forte teneur en sables fins et grossiers, une faible CEC et une très faible teneur en carbone total (C_{tot}) et C_{org} (Tableau 1). La très faible teneur en N conduit à un rapport C/N haut qui indique une minéralisation lente.

1.1.3 Le sous produit papetier (SPP)

Les sous-produits papetiers proviennent de deux sites distincts : l'usine Novacare (Laval-sur-Vologne, 88) et la papeterie de Raon (Raon-L'Etape, 88 pour obtenir un volume suffisamment important pour nos expérimentations. Le sous-produit papetier est un sous-produit d'épuration issu du recyclage du papier, dont la composition est très proche de celle du papier. Il est essentiellement composé de matières organiques d'origine végétale (cellulose, lignine) et d'une phase minérale constituée d'agents de collage et de minéraux (carbonate de calcium, kaolin, talc, sulfates). Le SPP se caractérise par une forte teneur en $CaCO_3$ et dans une moindre mesure en matières organiques (Tableau 1). C'est un matériau qui présente des similitudes avec le CDV, à savoir une forte teneur en matières organiques et une rétention hydrique fortement liée à cette teneur élevée en matière organique.

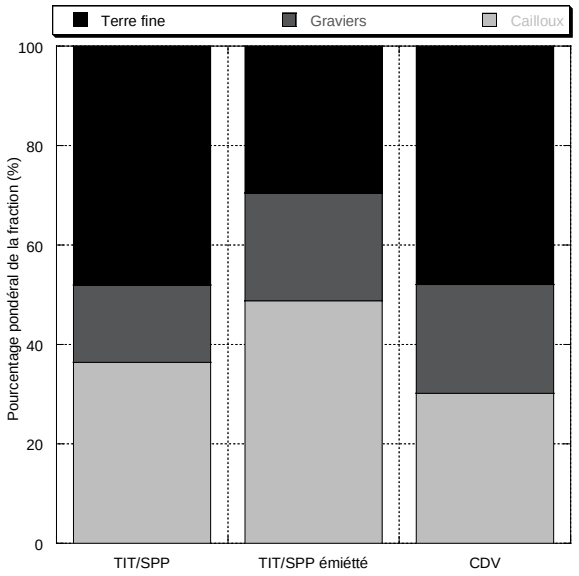


Figure 7. Répartition pondérale des différentes fractions (terre fine < 2mm, graviers < 5mm et cailloux > 5mm) du CDV_1 et du TIT/SPP_1.

1.1.4 Le mélange de terre industrielle et de sous-produit papetier (TIT/SPP)

Le mélange TIT/SPP est formé par 50% en volume de SPP et 50% en volume de TIT. Le mélange TIT/SPP a deux origines, selon le dispositif expérimental utilisé. Le mélange appelé TIT/SPP_1 résulte de l'utilisation des matériaux bruts et de leur mélange pour une mise en œuvre dans dispositifs expérimentaux en septembre 2007. Le mélange appelé TIT/SPP_2 y a été prélevé en décembre 2008 pour l'utilisation dans d'autres dispositifs expérimentaux. Le TIT/SPP_1 présente des caractéristiques communes aux deux matériaux parents, notamment le pH basique, la faible CEC, la forte teneur en $CaCO_3$. Il se présente souvent sous forme de boulettes associant intimement SPP et TIT. Par analogie avec les analyses de terres, le TIT/SPP_1 est formé de 29,6 % de terre fine (< 2 mm), 21,6% de graviers et 48,8% de cailloux (> 5 mm) (Figure 7). Lorsque les boulettes sont déstructurées à la main, le TIT/SPP_1 est formé de 48,1 % de terre fine (< 2 mm), 15,5% de graviers et 36,4% de cailloux (> 5 mm) (Figure 7).

Le TIT/SPP_2 présente des caractéristiques différentes qui témoignent de son évolution. Il présente une plus forte CEC, une plus faible CAC, moins de C_{org}, plus d'N, un pH neutre et un rapport C/N qui témoigne d'une minéralisation plus avancée que TIT/SPP_1. Si dans la partie « matériels et méthodes » il sera précisé l'origine des matériaux : CDV_1 ou CDV_2,

TIT/SPP$_1$ ou TIT/SPP$_2$, par la suite, ils seront regroupés sous des dénominations uniques, à savoir CDV et TIT/SPP.

1.2 Les dispositifs expérimentaux

Les dispositifs expérimentaux vont de la parcelle au cosme de laboratoire. Ils ont été choisis de manière à englober une grande variabilité d'échelles (du µm à quelques m) et de conditions expérimentales (de conditions climatiques réelles *in situ* aux conditions contrôlées de laboratoire).

1.2.1 Les dispositifs *in situ*

1.2.1.1 Les grandes parcelles

Une parcelle de Technosol construit a été mise en place en septembre 2007 sur la station expérimentale du Groupement d'Intérêt Scientifique sur les Friches Industrielles (GISFI ; www.gisfi.fr) à Homécourt, France, en collaboration avec la société TVD (Groupe Traitement Valorisation Décontamination). Cette parcelle (Figure 8) que l'on dénommera « grandes parcelles », est constituée de deux sous-parcelles de 0,5 ha présentant chacune une modalité différente de Technosol.

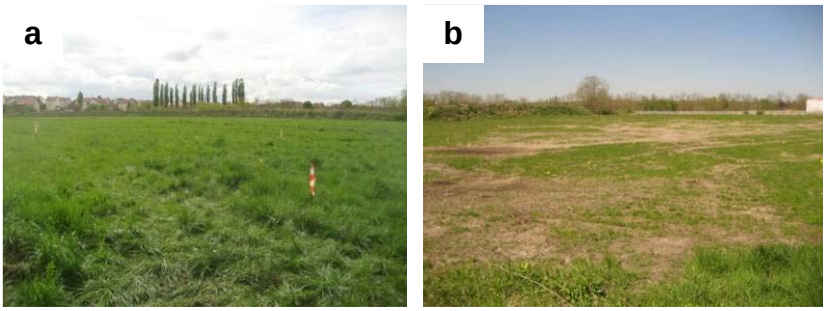


Figure 8. Photographies des grandes parcelles a) en mai 2008, b) en avril 2009.

1.2.1.2 Les différentes modalités de sol (grandes parcelles)

Le Technosol construit est formé d'un mélange de matériaux technogéniques formant un profil de sol à trois horizons distincts. Selon la nature du troisième horizon, on distingue deux modalités de construction de sol (Figure 9), à vocation différente :

- La modalité « éponge végétale » est formée :

- d'un horizon de « croissance » de compost de déchets verts (CDV_1) de 10 cm
- d'un horizon de « développement » d'un mélange de terre industrielle traitée et de sous produit papetier (TIT/SPP_1) (1 :1 en ratio volumique) de 100 cm
- d'un horizon « hydrique » de sous produit papetier (SPP) de 40 cm, destiné à assurer des réserves en eau utile pour les plantes et l'activité biologique en général.

- La modalité « confinement », est formée

- d'un horizon de « croissance » de compost de déchets verts (CDV_1) de 10 cm
- d'un horizon de « développement » d'un mélange de terre industrielle traitée et de sous produit papetier (TIT/SPP_1) (1 :1 en ratio volumique) de 100 cm
- d'un horizon de « confinement » de sous produit papetier chaulé et compacté (SPPc) de 35 cm, imperméable, permettant de confiner un substrat contenant des pollutions résiduelles.

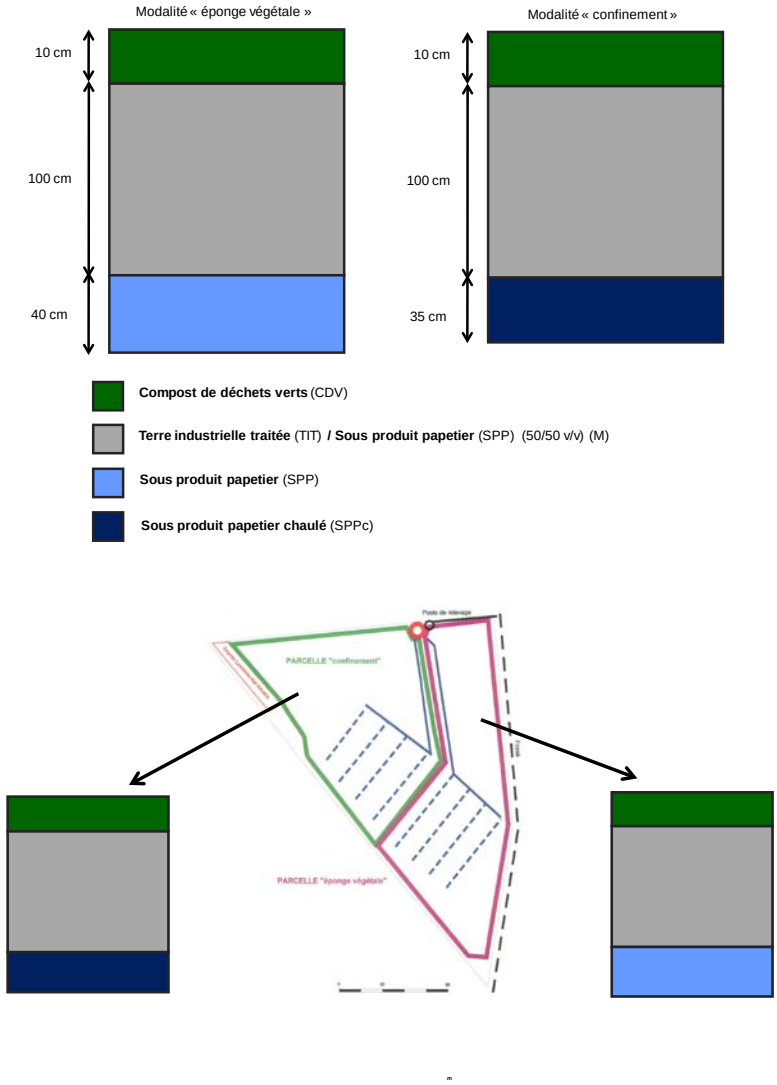


Figure 9. Modalités et plan du Technosol construit en place dans les « grandes parcelles ».

La mise en place des grandes parcelles s'est faite en Aout-Septembre 2007 (Figure 10). Au sein des « grandes parcelles », chacune des deux parcelles de 0,5 ha est respectivement formée par une des deux modalités de construction de sol présentées précédemment. La parcelle «confinement » présente un Technosol construit de la modalité « confinement » et la parcelle « éponge végétale » présente un Technosol construit de la modalité « éponge végétale» (Figure 10).



Figure 10. Photographies de la construction de sol, a) boues de papeteries, b) dépôt de compost, c) mélange de terre industrielle et de boues de papeteries, d) nivellage.

Faisant suite à la construction de sol, un semis de graines a été accompli en mars 2007 (40 % de fétuque (*Festuca L.*), 30 % de ray-grass (*Lolium perenne*) et 30 % de dactyle (*Dactylis*)).

1.2.1.3 Les parcelles lysimétriques

Lors de la thèse de Geffroy Séré, trois « parcelles lysimétriques » de Technosol construit (Figure 11) ont été mises en place en décembre 2003. Ces parcelles, de 100 m² (10 m X 10 m) sont isolées du substrat par une membrane étanche (géomembrane en PEHD) et renferment des sols construits suivant trois modalités.

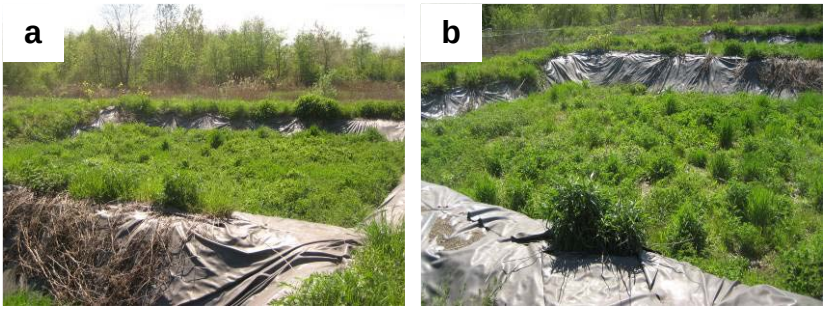


Figure 11. a) et b) Photographies des parcelles lysimétriques.

1.2.1.4 Les différentes modalités de sol (parcelles lysimétriques)

Deux des trois parcelles lysimétriques renferment respectivement chacune les modalités « éponge végétale » et « confinement » présentés précédemment. La modalité « Pap. » est la modalité « éponge végétale » avec du CDV_1 et du TIT/SPP_1. La modalité « Pap.Ch» est la modalité « confinement » avec du CDV_1 et du TIT/SPP_1.

La troisième parcelle renferme une modalité « témoin », formée :

- d'un horizon de « croissance » de compost de déchets verts (CDV_1) de 15 cm
- d'un horizon de terre industrielle traitée pure (TIT) de 60 cm

1.2.1.5 Les lysimètres

Les lysimètres sont des cylindres métalliques de 1 m^2 de surface pouvant contenir environ 3,5 tonnes de sol (Figure 12 & Figure 13a). Le sol est déposé dans le cylindre sur un lit de sable filtrant en bas de colonne. Le lysimètre repose sur des pesons qui assurent une pesée horaire d'une précision d'une centaine de grammes. Le lysimètre est équipé de diverses sondes (TDR, tensiomètres, Figure 13b) aux profondeurs de 50, 100 et 150 cm (Figure 13c & Figure 13d), et qui assurent le suivi hydrique horaire. Des bougies poreuses (500 mL) sont insérées à ces mêmes profondeurs et permettent de récupérer occasionnellement un volume de la solution de sol à la profondeur voulue. La force de succion appliquée aux bougies poreuses est réglable. Enfin, les percolats sont quantifiés et recueillis dans une bonbonne (20 L).

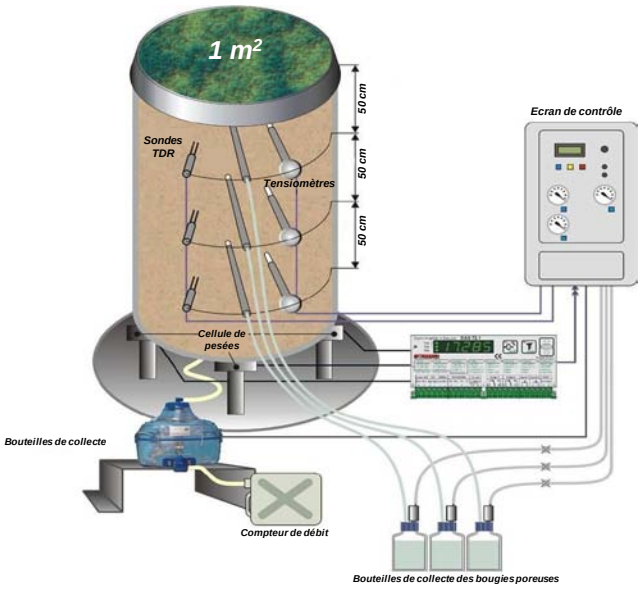


Figure 12. Schéma d'un lysimètre.

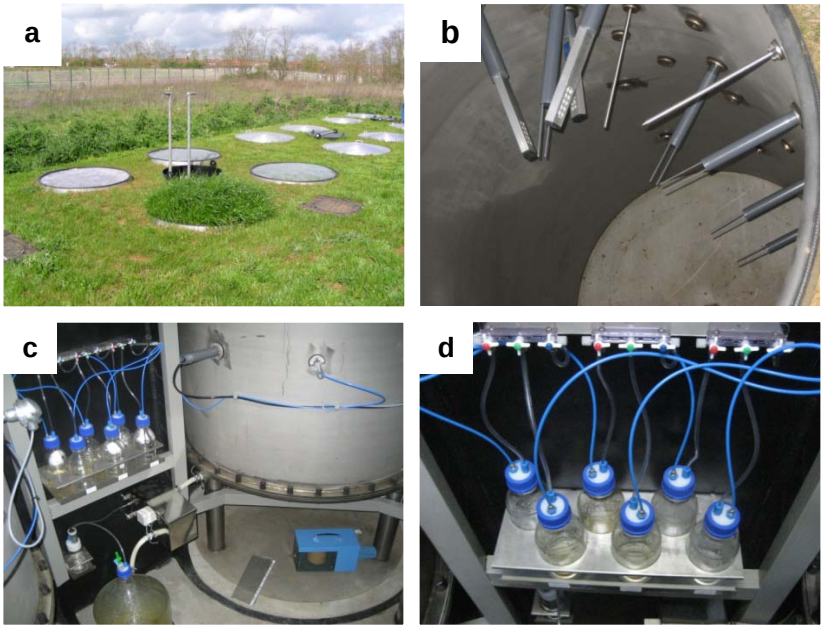


Figure 13. Photographies des lysimètres : a) extérieur d'une station lysimétrique à 4 lysimètres, b) sondes à l'intérieur de la colonne vide, c) vue d'ensemble de l'extérieur de la colonne de sol dans la station lysimétrique, d) bouteilles de collecte des bougies poreuses.

1.2.2 Les dispositifs en laboratoire : les cosmes

Les cosmes sont des cylindres pouvant contenir de quelques grammes à plusieurs kilogrammes de sol. Plusieurs échelles de cosmes ont été utilisées en laboratoire : des microcosmes constitués de boîtes de Pétri (diamètre = 11,2 cm, hauteur = 2,8 cm, Figure 14a), des mésocosmes constitués de cylindres en PVC (diamètre = 15 cm, hauteur = 10

cm, Figure 14b) et enfin des macrocosmes constitués de cylindres en PVC (diamètre = 19 cm, hauteur = 25 cm, Figure 14c).

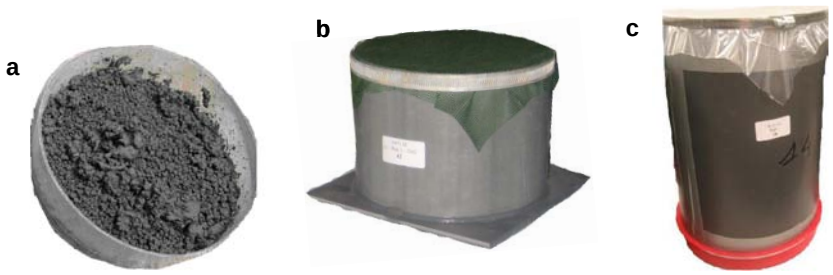


Figure 14. Photographies des cosmes : a) microcosme, b) mésocosme et c) macrocosme.

1.3 Les espèces de faune utilisées

Les espèces de faune utilisées ont eu deux vocations bien distinctes. Les premiers organismes ont été choisis pour évaluer l'impact du Technosol sur certains de leurs paramètres biotiques. Il s'agit du ver de terre *Eisenia fœtida* (*E. fœtida*), et du ver de terre *Lumbricus terrestris* (*L. terrestris*). Les seconds ont été choisis afin de représenter certains groupes fonctionnels présents au sein des communautés de faune du sol en milieu continental. Il s'agit à nouveau du ver de terre anécique *L. terrestris*, du ver de terre endogé *Apporectodea caliginosa* (*A. caliginosa*), du cloporte macrofragmenteur *Porcellio scaber* (*P. scaber*) et du collembole microdécomposeur *Folsomia fimetaria* (*F. fimetaria*). Le choix des groupes fonctionnels et des espèces utilisées sera discuté par la suite.

2 Méthodes

2.1 Les expérimentations *in situ*

2.1.1 L'expérimentation sur les grandes parcelles

Sur les grandes parcelles, une caractérisation géolocalisée complète (biologique, chimique et physique) a été réalisée en avril 2008 (t=8mois) selon un maillage de maille élémentaire de 20 mètres (Figure 15a). Ce travail s'inscrit dans le programme GESSOL BIOTECHNOSOL. En ce qui concerne la Thèse, les résultats concernant la macrofaune et les microarthropodes seront utilisés (Figure 15b). Les grandes parcelles ont ainsi fait

l'objet de 20 prélèvements de lombriciens par la technique du formol (UMR 6553 Ecobio)(Bouché et Aliaga, 1986), de 20 prélèvements de macrofaune par excavation (CNRS UMR 7146 LIEBE)(Edwards, 1991) et enfin de 96 prélèvements de microarthropodes (UMR 1120 Sols et Environnement)(ISO, 2004). Pour chaque point de prélèvement de microarthropodes, une mesure d'humidité massique et d'épaisseur de compost a été réalisée (UMR 1120 Sols et Environnement).

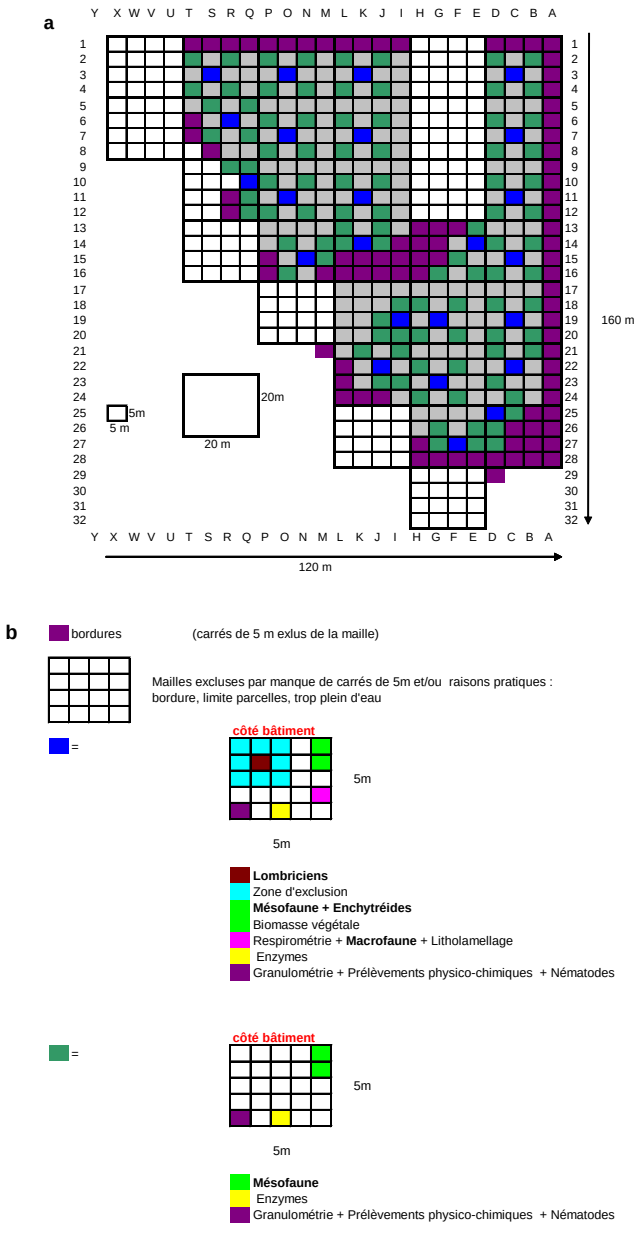


Figure 15. a) Maille de prélèvements des « grandes parcelles », b) légende des prélèvements effectués (en gras ceux qui concernent la faune).

2.1.2 Les parcelles lysimétriques

Un unique échantillonnage de microarthropodes a été réalisé antérieurement à cette Thèse en 2006. Pour chaque modalité de sol, 20 prélèvements ont été effectués selon un échantillonnage aléatoire. Un échantillonnage de macrofaune a eu lieu en novembre 2007. Pour chaque modalité de sol, un prélèvement de macrofaune par excavation (Edwards, 1991) a été réalisé.

2.1.3 L'expérimentation en lysimètres

2.1.3.1.1 Modalités en lien avec l'activité biologique (lysimètres)

Le modèle expérimental de Technosol construit a été mis en place pour sa modalité « éponge végétale » dans trois lysimètres en septembre 2007. Cette modalité a été choisie, car elle présente plus d'intérêt, eu égard à l'écoulement de l'eau, que la modalité « confinement », dont la couche de sous-produit papetier compactée et chaulée entrave l'écoulement gravitaire de l'eau.

Trois modalités d'activités biologiques différentes sont réalisées (Figure 16) :

- lysimètre « nu » : sans végétation ni faune
- lysimètre « végétation » : semis de Ray-Grass (*Lolium perenne*) en mars 2007 à une densité de semis de 10 grammes par mètre carré
- lysimètre « faune » : lysimètre « végétation » et inoculation de faune effectuée en octobre 2008

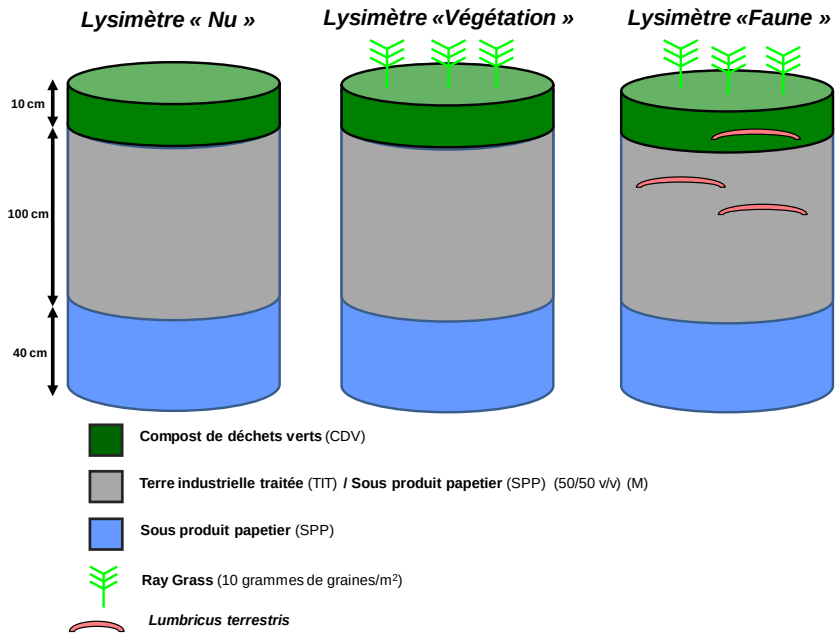


Figure 16. Modalités « activité biologique » mise en place sur le Technosol construit en lysimètres.

Pour éviter des contaminations extérieures et/ou une fuite de la faune inoculée, des cloches en moustiquaire PVC de maille 1mm, avec une armature métallique ont été installées de manière permanente au dessus des trois lysimètres (Figure 17). Les cloches ont été conçues de manière à limiter les pertes d'eau de pluie par écoulements sur les côtés du lysimètre afin de perturber au minimum le fonctionnement hydrique de la colonne de sol.

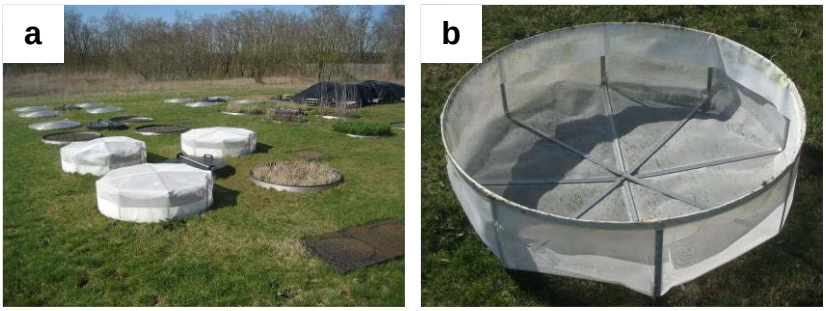


Figure 17. Photographies des cloches à lysimètres, a) vue d'ensemble des trois lysimètres, b) intérieur de la cloche et son armature métallique.

2.1.3.2 L'inoculation de la faune

Parmi les invertébrés du sol, les ingénieurs de l'écosystème, et plus particulièrement les vers de terre ont une grande influence sur les processus chimiques, physiques et

biologiques du sol (Jouquet *et al.*, 2006). Ceci a orienté le choix d'un ver de terre pour l'inoculation et plus particulièrement d'un ver épi-anécique, *Lumbricus terretris*, pour les raisons suivantes :

- ce ver présente des comportements à la fois d'épigés et d'anéciques, en créant des galeries sub-verticales permanentes à grande profondeur, en transportant de la matière organique en profondeur et en mixant intimement dans son intestin des particules minérales et de la matière organique (Brown *et al.*, 2000). Ces aspects fonctionnels sont primordiaux dans le contexte d'un Technosol construit néoformé. Ce sol est en effet structuré en couches distinctes de propriétés contrastées : organique pour le CDV de surface, organo-minéral pour le TIT/SPP médian.
- bien que premier colonisateur des terres arables et des prairies jeunes (Topoliantz *et al.*, 2000), il ne semble pas coloniser aussi facilement les milieux restaurés et/ou néoformés (Baker *et al.*, 2006; Marinissen et Van den Bosch, 1992) tels que les Technosols construits.

Le choix de l'espèce *L. terrestris* est lié au fait que ce ver a été largement étudié et est, après *E. fœtida*, le ver le plus utilisé en conditions expérimentales, notamment pour sa large taille (Lowe et Butt, 2005).

Il existe trois différentes méthodes d'inoculation de vers de terre en plein champ (Butt *et al.*, 1997) :

- Le « turf cutting and relaying » qui consiste à transférer une couche mince d'un sol existant au sol d'étude.
- L'extraction physique ou chimique de vers de terre suivie de leur implantation directe sur le sol d'étude.
- L' « Earthworm Inoculation Unit » qui consiste à placer quelques vers de terre dans un microenvironnement (sac en plastique) en laboratoire pendant quelques semaines puis de transférer le sac dans le sol d'étude.

Chaque méthode possède ses avantages et ses inconvénients (Tableau 2). La méthode du « turf cutting and relaying », est écartée car nous avons choisi d'inoculer une espèce en particulier. Or cette méthode implante un pool d'espèce, qui est le plus souvent composé

par des vers de terre épigés. D'autre part, sur deux des lysimètres, un couvert végétal est déjà installé. Une inoculation directe aurait pu être envisagée du fait de la présence des cloches en moustiquaire qui limitent la prédation des oiseaux. Toutefois, d'autres menaces existent toujours comme les stress abiotiques (température, eau disponible). La méthode qui présente le plus d'avantages est l'EIU « Eathworm Inoculation Unit ». Elle assure le choix de l'espèce inoculée, la présence d'un microenvironnement et le transfert de cocons qui limitent les pertes par stress abiotiques et/ou assurent une nouvelle génération suite à une trop forte prédation par les oiseaux. De plus, cette méthode sera également appliquée aux grandes parcelles.

Tableau 2. Avantages et inconvénients des techniques d'inoculation de lombriciens* in situ *(adapté de Butt* et al.*, 1997)

Technique	***Avantages***	***Inconvénients***
Turf cutting and relaying	Microenvironnement protecteur Transfert de cocons	Faible densité Pool d'espèces Vers épigés Transfert de sol
Extraction/Inoculation	Choix de(s) l'espèce(s) Haute densité	Pas de microenvironnement protecteur Pas de transfert de cocons Vers de terre endogés/anéciques Dommages aux vers possible Coûteux en temps
Eathworm Inoculation Unit (EIU)	Choix de(s) l'espèce(s) Haute densité Microenvironnement protecteur Transfert de cocons	Transfert de sol Coûteux en temps

Ainsi, 9 sacs plastiques hermétiquement fermés (« grands EIU »), finement percés pour permettre une aération, ont été préalablement remplis de 2500g de TIT/SPP à 30% de la $CAC_{TIT/SPP}$ (Tableau 3). Deux cent grammes de bouses de vache à 30% de la $CAC_{bouses\ de\ vache}$ (Tableau 3) ont été placés en surface (Butt *et al.*, 1997) afin que les vers ne manquent pas d'apport trophique. Quatre *L. terrestris* adultes (24,37 g ± 2,19 (0,53%)) y ont été introduits.

Tableau 3. Humidité massique à la capacité au champ des deux matériaux (TIT/SPP et bouses de vache) utilisés dans les EIU (Earthworm Inoculation Unit).

	$CAC_{TIT/SPP}$ (%)	**$CAC_{bouses\ de\ vache}$ (%)**
Moyenne (4 répétitions)	89,6	376,6
Ecartype	2,1 (=2,30%)	6,9 (=1,9%)

Les sacs ont été placés pendant douze semaines à 18±2°C (Figure 18a), afin d'enclencher une reproduction. Après 12 semaines, 4 sacs ont été sacrifiés afin de peser les individus adultes et de dénombrer les cocons (Tableau 4). Les 5 sacs restants ont été inoculés sur le lysimètre « faune ».

Tableau 4. Mortalité, biomasses initiale et finale et nombre de cocons produits par* Lumbricus terrestris *dans les EIU (Earthworm Inoculation Unit).

	Nombre de vers vivants au temps initial	***Biomasse globale moyenne initiale***	***Nombre de vers vivants après 12 semaines***	***Biomasse globale moyenne après 12 semaines***	***Nombre de cocons retrouvés après 12 semaines***
Moyenne	4	24,37	3,5	30,32	18,3
Ecart-type	0	2,19 (=0,53%)	0,58 (=16,5%)	5,40 (=17,80 %)	9,3 (=50,30 %)

Considérant la mortalité des vers adultes lors de l'incubation, quatre « petits EIU » d'appoint ont été confectionnés. Quelques jours avant l'inoculation, des petits sacs plastiques, également hermétiques et finement percés pour permettre une aération ont été remplis de 800 g de TIT/SPP à 35% de la $CAC_{TIT/SPP}$ avec 30 g de tourbe sèche. Huit *L. terrestris* adultes (46,06 g ± 0,73 (1,57%)) y ont été introduits. L'ensemble des sacs a été inoculé en octobre 2008 sur le lysimètre « faune » (Figure 18b, Figure 18c & Figure 18d).

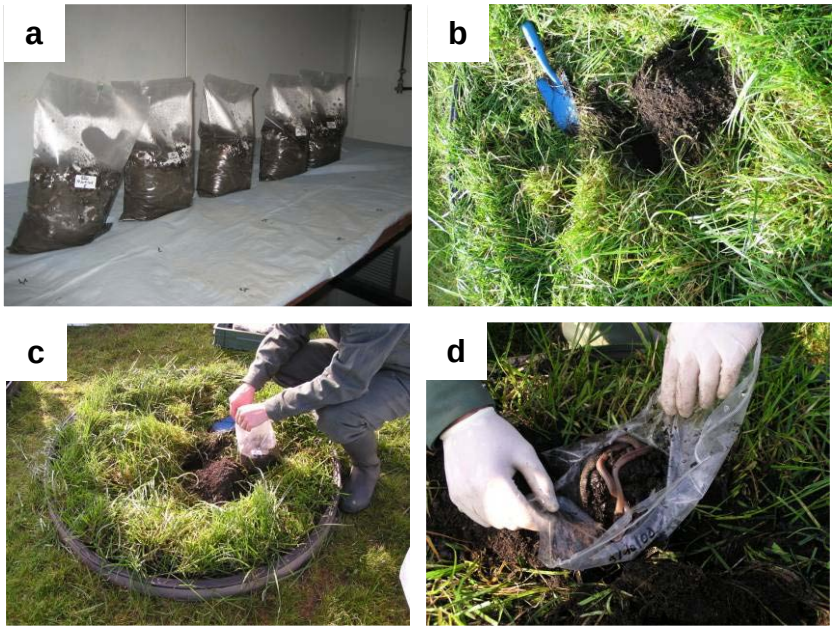


Figure 18. Photographies de l'inoculation de* Lumbricus terrestris *sur les lysimètres, a) les EIU (Eathworm Inoculation Unit) en incubation, b) trou préalable à l'implantation de l'EIU, c) ouverture d'un grand EIU, d) intérieur d'un petit EIU.

La surface du lysimètre a été creusée sur 10 cm selon neuf points (Figure 19) et le contenu des sacs plastiques y a été délicatement placé. Par souci d'homogénéité avec les deux autres modalités de lysimètres, une quantité identique de TIT/SPP a été placée aux mêmes endroits dans les deux autres lysimètres. Si l'on se réfère aux sacs qui ont été sacrifiés, le lysimètre « faune » a reçu alors 5*3,5 = **17,5 vers** d'une biomasse de 5*30,32 = **151 g**, et 5*18,3 = **91,5 cocons** par les grands EIU ; puis 4*8 = **32 vers** d'une biomasse de 4*46,06= **184,24 g** par les petits EIU. Soit au total **49,5 vers** d'une biomasse totale d'environ **335, 24 g** et **91,5 cocons**.

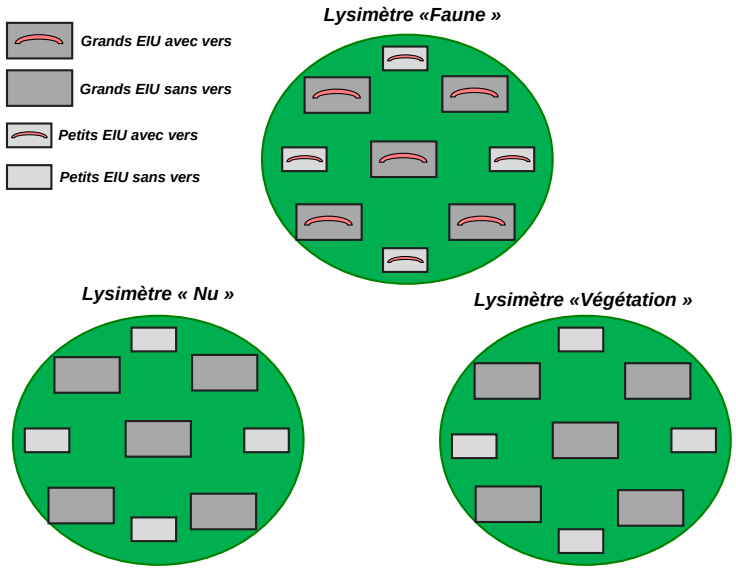


Figure 19. Emplacement des EIU (Earthworm Inoculation Unit) sur les trois modalités de lysimètres.

2.1.3.3 Le suivi des lysimètres

Une coupe de la végétation a été effectuée à chaque fois que la hauteur des pousses gênait la fermeture des cloches à lysimètres. Les résidus ont été déposés à la surface du sol. Un échantillon de percolat de 125 mL a été prélevé à une fréquence mensuelle, au minimum, de décembre 2007 à juillet 2009. Après chaque prélèvement, la bonbonne a été entièrement vidée et nettoyée lorsqu'un dépôt de matière était visible. Un échantillon de solution de sol d'au maximum 125 mL a été prélevé à l'aide des bougies poreuses à une fréquence bimensuelle, au minimum, de septembre 2008 à juillet 2009. Chaque prélèvement a fait l'objet d'analyses en laboratoires : ammonium (NH_4^+), nitrates (NO_3^-), carbone organique (C_{org}) et l'azote total (N). Les données de poids des lysimètres, de débit des percolats, d'humidité massique du sol (50, 100 et 150 cm de profondeur) et de température du sol (50, 100 et 150 cm de profondeur) ont été compilées dans un fichier excel au fur et à mesure de leur acquisition.

2.2 Les expérimentations en laboratoire

2.2.1 Expérimentation « survie » : effet des matériaux du Technosol sur la survie, la biomasse et la reproduction d'*Eisenia fœtida*

La première expérimentation a pour objectif d'évaluer l'effet des matériaux constitutifs du Technosol sur le cycle de vie (survie, biomasse, reproduction) d'un représentant de la faune du sol. Le ver de terre *E. fœtida* a été choisi pour son cycle de vie court (45-51 jours) (Edwards, 2004). Ce ver est également caractérisé par une distribution ubiquiste, une tolérance à de grandes variations de températures et d'humidité, et une relative résistance à la manipulation. Ces caractéristiques ont fait de lui un animal modèle pour les études écotoxicologiques, physiologiques ou génétiques (Domínguez, 2004).

Les matériaux utilisés lors de cette expérience ont été le compost de déchets verts (CDV_2), le mélange de terre industrielle traitée et de sous produit papetier (1:1 ratio volumique) (TIT/SPP_2) et le sol OCDE (OECD, 1984), couramment utilisé comme matrice dans les tests écotoxicologiques. Le sol OCDE est constitué de 69,5% de sable, 20% de kaolinite, 10% de tourbe et 0,5% de $CaCO_3$ pour ajuster le pH à 6,0±0,5. Le TIT/SPP_2 a été prélevé dans l'horizon médian (entre 10 et 100 cm de profondeur) de la modalité « éponge végétale » des grandes parcelles en décembre 2008. Les matériaux ont été préalablement séchés et tamisés à 2 mm. Ils ont été défaunés en les soumettant à des cycles de séchage (+20°C) et de congélation (-20°C) durant 8 jours, excepté que le sol était sec et non humide comme le conseille le protocole de défaunation (Krogh, 1995) du fait de la très forte rétention hydrique des matériaux. Les vers de terre *E. fœtida* ont été acheté chez un fournisseur biologique (Blades Biological). Les cosmes étaient des mésocosmes, cylindres de PVC (Figure 14b) percés au niveau de leur socle par neuf trous permettant une remontée capillaire d'eau.

Les matériaux ont été mélangés à un substrat standard OCDE (OECD, 1984), pour les diluer et ainsi établir une gamme de « concentrations » en matériaux à tester formant 8 modalités : (i) 100%CDV, (ii) 75%CDV- 25%OCDE, (iii) 50%CDV - 50%OCDE, (iv) 25%CDV - 75%OCDE, (v) 100%TIT/SPP, (vi) 75%TIT/SPP - 25%OCDE, (vii) 50% TIT/SPP - 50%OCDE, (viii) 25%TIT/SPP - 75%OCDE (Tableau 5).

Tableau 5. Modalités de sol de l'expérience « survie » et ses compositions volumiques en matériaux. TIT/SPP : terre industrielle traitée et sous produit papetier, CDV : compost de déchets verts, OCDE : sol OCDE.

	Nom de la modalité	*CDV (% volumique)*	*TIT/SPP (% volumique)*	*OCDE (% volumique)*
(i)	100%CDV	100	0	0
(ii)	75%CDV- 25%OCDE	75	0	25
(iii)	50%CDV - 50%OCDE	50	0	50
(iv)	25%CDV - 75%OCDE	25	0	75
(v)	100%TIT/SPP	0	100	0
(vi)	75%TIT/SPP - 25%OCDE	0	75	25
(vii)	50% TIT/SPP - 50%OCDE	0	50	50
(viii)	25%TIT/SPP - 75%OCDE	0	25	75
(ix)	OCDE	0	0	100
(x)	OCDE+Cd	0	0	100

Une modalité formée exclusivement de sol OCDE : (ix) OCDE, joue le rôle du témoin positif. Une modalité composée de sol OCDE, contaminé par le cadmium (Cd) (50 $mg.kg^{-1}$ de sol sec), qui correspond à la valeur d'EC_{50} (concentration entraînant une diminution de 50 % de la reproduction des vers) dans un sol OCDE pour *E. fœtida* (Spurgeon *et al.*, 1994) jour le rôle de témoin négatif (x). Le Cd est en effet connu comme l'un des métaux les plus toxiques pour ces organismes (Malecki *et al.*, 1982).

Six cent grammes de sol sec de chacun des mélanges (Tableau 5) ont été introduits dans des mésocosmes. Les cosmes ont été ensuite immergés de quelques millimètres dans de l'eau déionisée pendant 3-5 jours, permettant ainsi la remontée capillaire de l'eau et l'humectation des matériaux. Les trous des socles des cosmes ont été rebouchés et un film plastique perforé a été placé à sa partie supérieure pour éviter l'évaporation de l'eau et la fuite des vers. Pour chaque cosme, dix vers adultes (clitellés) ont été pesés globalement et inoculés. Tous les cosmes ont été inoculés avec une biomasse de vers similaires (4,23g ± 0,42 (10%)). Un total de 50 cosmes a été lancé correspondant à 10 modalités et 5 répétitions (Figure 20). Les cosmes ont été stockés à l'obscurité à

température ambiante. Une pesée des cosmes a été réalisée chaque semaine pour contrôler leur variation d'humidité.

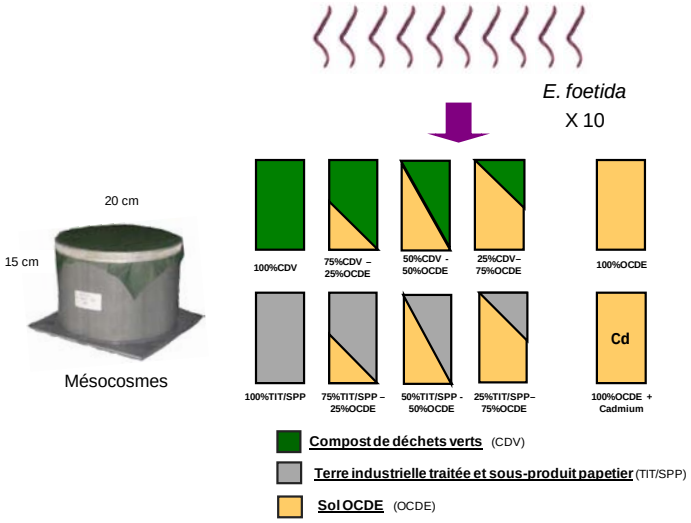


Figure 20. Représentation schématique de l'expérience « survie ».

Au 28ème jour, pour chaque mésocosme, les vers de terre ont été ont été récupérés manuellement et pesés globalement pour toutes les modalités (Figure 21). Les matériaux du cosme, ainsi que les cocons qu'ils contenaient, ont ensuite été remis à incuber dans les cosmes. Au 56ème jour, les matériaux ont été tamisés à 5 mm, les cocons et les juvéniles ont été dénombrés, mais uniquement pour les modalités 100%CDV, 50%CDV - 50%OCDE, 100%TIT/SPP, 50% TIT/SPP - 50%OCDE, OCDE et OCDE +Cd (Figure 21).

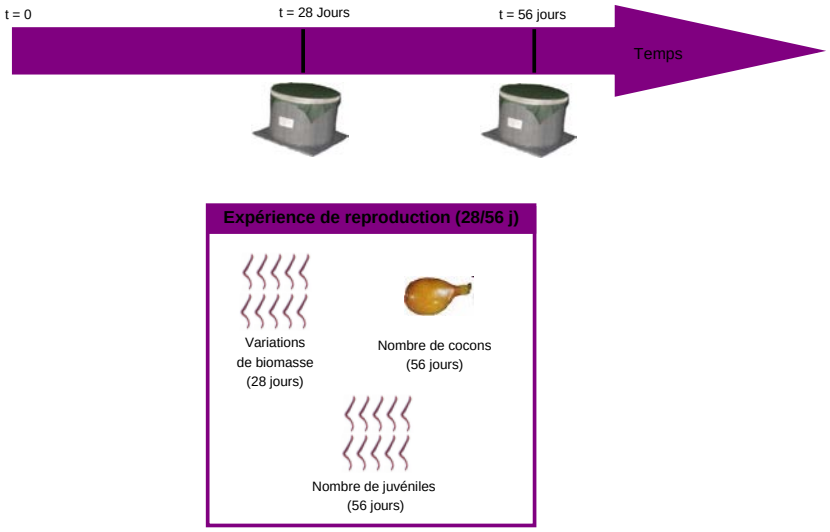


Figure 21. Déroulement de l'expérience « survie ».

Ainsi, au 28ème jour : la variation de biomasse globale des vers restants en vie a été exprimée par rapport au poids initial. Au 56ème jour : la production de cocons et de juvéniles ont été évaluées.

2.2.2 Expérimentation « comportement » : effet du procédé de construction du Technosol construit sur la biomasse et la contribution fonctionnelle de *Lumbricus terrestris*

La deuxième expérimentation a pour objectif d'évaluer l'effet du procédé de construction des matériaux constitutifs du Technosol construit sur la biomasse et la contribution fonctionnelle d'un représentant de la faune du sol.

Cette expérimentation se divise en deux sous-expérimentations :

- la première sous expérience vise à déterminer l'effet à court terme (7 jours) du procédé de construction du Technosol construit sur la biomasse et sur la production de turricules d'un unique ver dans un microcosme.
- la deuxième sous expérience, afin de se rapprocher des conditions *in situ*, vise à déterminer l'effet à moyen terme (14 et 30 jours) du procédé de construction du Technosol construit sur la biomasse et sur l'activité de creusement et la production de turricules de plusieurs vers dans un mésocosme.

Le choix de l'espèce *L. terrestris* s'est fait pour les mêmes raisons que celles présentés lors de la description de l'expérimentation des lysimètres. En l'utilisant dans cette expérience, nous répondons à deux questions distinctes. *L. terrestris* survit-il dans les milieux néoformés que sont les Technosols ? Quelles sont la nature et l'intensité de son impact sur le sol?

Les matériaux utilisés lors de cette expérience sont le compost de déchets verts (CDV_1) et le mélange de terre industrielle traitée et de sous produit papetier (1:1 ratio volumique) (TIT/SPP_1). Le TIT/SPP_1 a été prélevé avant mise en place dans les grandes parcelles en septembre 2007. Les matériaux ont été préalablement séchés et tamisés à 2 mm. Ils ont été également défaunés en les soumettant à des cycles de séchage (+20°C) et de congélation (-20°C) durant 8 jours excepté que le sol était sec et non humide comme le conseille le protocole de défaunation (Krogh, 1995) du fait de la très forte rétention hydrique des matériaux. Les vers de terre *L. terrestris* proviennent d'un fournisseur

biologique (Biotopia). Les cosmes utilisés sont des microcosmes, boîtes de Pétri (Figure 14a) pour l'expérience de « survie » et des mésocosmes cylindres de PVC (Figure 14b) couverts par une moustiquaire de maille 1mm pour assurer une ventilation et afin d'éviter la fuite des animaux.

Ces matériaux ont été disposés en horizons pour former 5 modalités : (i) 100%CDV, (ii) 75% CDV - 25% TIT/SPP, (iii) 50% CDV - 50% TIT/SPP, (iv) 25% CDV - 75% TIT/SPP, (v) 100%TIT/SPP (Tableau 6) Les matériaux n'ont pas été mélangés. Le CDV a toujours été placé au dessus du TIT/SPP pour former deux horizons de sol.

Tableau 6. Modalités de sol de l'expérience « comportement » et ses compositions volumiques en matériaux. TIT/SPP : terre industrielle traitée et sous produit papetier, CDV : compost de déchets verts.

Nom de la modalité	*CDV (% volumique)*	*TIT/SPP (% volumique)*
100% CDV	100	0
75% CDV - 25%TIT/SPP	75	25
50% CDV - 50% TIT/SPP	50	50
25% CDV - 75% TIT/SPP	25	75
100%TIT/SPP	0	100

- Première sous expérience

Une centaine de grammes de matériaux de sol humide de chacun des mélanges (Tableau 6) ont été introduits dans des microcosmes. Le TIT/SPP a été humidifié à hauteur de 40% de sa CAC et le CDV à hauteur de 49% de sa CAC. Pour chaque microcosme, un ver de terre préalablement pesé a été introduit (Figure 22). Pour chaque modalité, 20 vers ont été inoculés séparément dans 20 microcosmes ; soit un total de 100 microcosmes et 25 microcosmes témoins sans ver de terre, ce qui correspond à 5 modalités, 10 réplicats et 1 date (7 jours). Les microcosmes ont été stockés à 12±2°C dans le noir. De l'eau a été pulvérisée à la surface tous les deux jours pour compenser les pertes par évaporation mesurées par pesées.

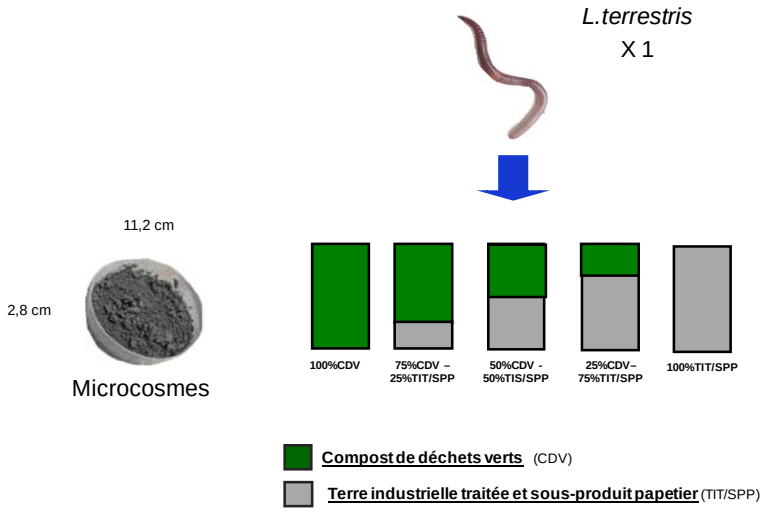


Figure 22. Représentation schématique de la première sous expérience de l'expérience « comportement ».

Au 7ème jour (Figure 24) : la variation de biomasse a été exprimée par rapport au poids initial et la production de turricules a été évaluée.

- Deuxième sous expérience

Quelques kilogrammes (2 à 3 kg selon les modalités) de matériaux de sol humide de chacun des mélanges (Tableau 6) ont été introduits dans des mésocosmes. Les matériaux (CDV_1 et TIT/SPP_1) ont été placés à 35% de la capacité au champ. Pour chaque mésocosme, 4 vers de terre préalablement pesés ont été introduits (Figure 23). Toutes les modalités, pour un même réplicat, ont reçu la même biomasse de ver (14,00g±1,24 (8,86%)). Un total de 60 mésocosmes a été lancé correspondant à 5 modalités, 5 réplicats et 2 dates (14 et 30 jours). Les mésocosmes ont été stockés à 18±2°C dans le noir. De l'eau a été pulvérisée à la surface toutes les semaines pour compenser les pertes par évaporation mesurées par pesées.

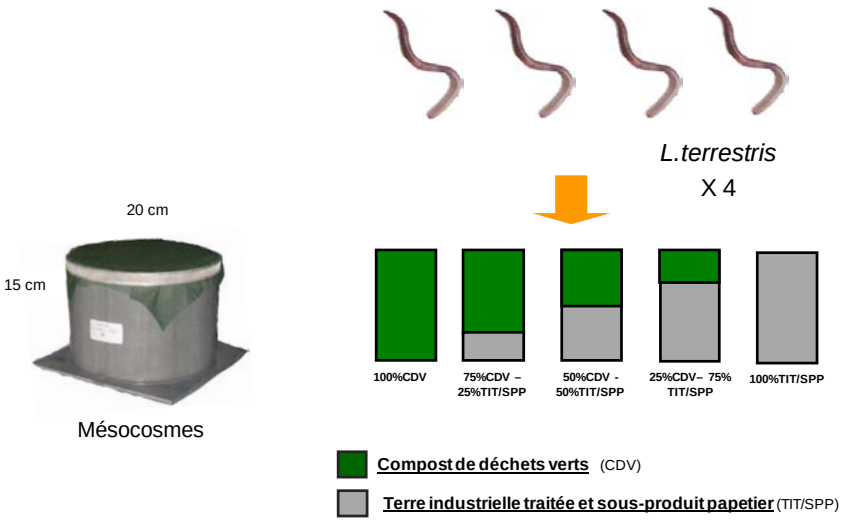


Figure 23. Représentation schématique de la deuxième sous expérience de l'expérience « comportement ».

Pour les quatre premiers réplicats, au 14ème jour et au 30ème jour (Figure 24):

- la variation de biomasse des 4 vers a été exprimée par rapport au poids initial. La biomasse des vers morts (ou non retrouvés) a été considérée comme nulle.
- la production de turricules de surface a été estimée.
- la teneur en C_{tot} et en C_{org} des turricules de surface a été mesurée.

Pour le cinquième et dernier réplicat (Figure 24),

- au 30ème jour, quelques turricules de surface ont été conservés pour les analyses ultrastructurales.
- au 14ème jour et au 30ème jour, la macroporosité a été estimée à l'aide de la tomographie à rayons X (Capowiez *et al.*, 1998) ainsi que le déplacement de matière de la couche de TIT/SPP dans la couche de CDV pour les modalités bimodales.

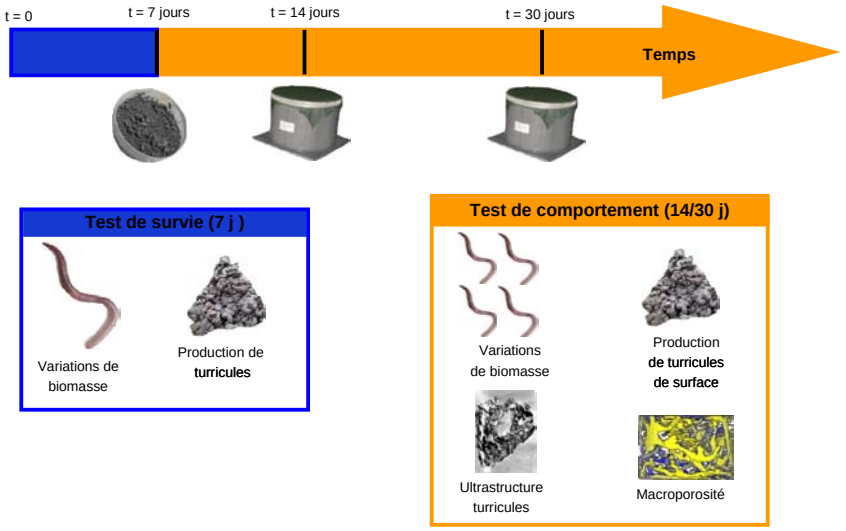


Figure 24. Déroulement de l'expérience « comportement ».

Les teneurs en C_{tot} et en C_{org} des matériaux parents (CDV mp et TIT/SPP mp) ont été mesurées. Elles ont servi de support pour comparer pour chaque modalité, les teneurs du mélange initial aux teneurs des turricules de surface. Par exemple, les teneurs de carbone du mélange initiale de la modalité 25%CDV-75%TIT/SPP sont obtenues selon la formule suivante : 25%CDV-75%TIT/SPP mi = 0,25*(CDV mp) + 0,75*(TIT/SPP mp) et ont été comparé aux teneurs de carbone des turricule de surface de cette même modalité (25%CDV-75%TIT/SPP).

2.2.3 Expérimentation « diversité » : effet de la faune et de sa diversité fonctionnelle sur le Technosol

La troisième expérimentation a pour objectif d'évaluer l'effet de la faune et de sa diversité sur des processus pédogénétiques majeurs du Technosol. Les éléments de faune du sol de cette expérience ont été choisis afin de constituer un écosystème de laboratoire qui puisse dans la mesure du possible représenter la plus grande diversité fonctionnelle. La faune du sol peut se décomposer en deux grands groupes fonctionnels, les ingénieurs de l'écosystème et les décomposeurs. Les ingénieurs de l'écosystème sont essentiellement composés en milieu continental par les vers de terres (épigés, anéciques et endogés). Deux ingénieurs du sol et deux décomposeurs ont été choisis. Le ver de terre *L. terrestris* a été choisi une nouvelle fois comme représentant des vers épi-anéciques pour les mêmes raisons que celles citées dans la partie précédente (2.1.3.2).

Le ver de terre *A. caliginosa* a été choisi comme représentant des vers endogés. Le ver de terre endogé, également ingénieur du sol, a été choisi pour sa manière différente des autres catégories écologiques de vers d'influencer les processus du sol (physique, chimique et biologique) et de modifier la disponibilité des ressources pour les autres organismes. La localisation en partie en profondeur de son activité, comparativement aux autres groupes fonctionnels de vers en fait un candidat potentiel dans l'évolution de l'horizon de TIT/SPP, enfoui sous l'horizon de compost. L'espèce *A. caliginosa* a été choisie du fait de sa présence dans les prairies âgés ou permanentes (Topoliantz *et al.*, 2000). Le cloporte *P. scaber* a été choisi comme représentant des macro-décomposeurs. En effet, parmi les macrodécomposeurs, les cloportes, avec les millipèdes sont essentiels dans les processus de décomposition. L'espèce *P. scaber* qui est une espèce commune et largement répandue, a été choisie du fait de son utilisation courante en écotoxicologie (Hopkin *et al.*, 1986; Løkke et Van Gestel, 1997) et en écologie (Zimmer et Topp, 1997). Le collembole euédaphique *F. fimetaria* a été choisi comme représentant des microdécomposeurs. L'espèce *F. fimetaria* qui est une espèce commune et largement répandue a été choisie du fait de son utilisation courante en écotoxicologie (Løkke et Van Gestel, 1997). Un collembole euédaphique a été privilégié en raison de son action localisée en profondeur. Comme le ver endogé, mais à une moindre profondeur, il aura potentiellement tendance à influer l'horizon de TIT/SPP sous le compost, mais il peut aussi occuper la surface du sol (Rusek, 1998).

Les matériaux utilisés lors de cette expérience sont le compost de déchets verts (CDV_2) et le mélange de terre industrielle traitée et de sous produit papetier (1:1 ratio volumique) (TIT/SPP_2). Le TIT/SPP_2 a été prélevé dans l'horizon médian (entre 10 et 100 cm de profondeur) de la modalité « éponge végétale » des grandes parcelles en décembre 2008. Les matériaux ont été préalablement séchés et tamisés à 2 mm. Ils ont été également défaunés en les soumettant à des cycles de séchage (+20°C) et de congélation (-20°C) durant 8 jours excepté que le sol était sec et non humide comme le conseille le protocole de défaunation (Krogh, 1995) du fait de la très forte rétention hydrique des matériaux. La litière utilisée est une litière de ray-grass (*Lolium perenne*) et de trèfle (*Trifolium*). *Lumbricus terrestris* et *P. scaber* proviennent d'un fournisseur biologique (Carolina Biological). *Apporectodea caliginosa* a été collecté sur le domaine expérimental de la Bouzule. Enfin, *F. fimetaria* provient d'un élevage de laboratoire

(University of Aarhus, Danemark). Les cosmes utilisés sont des macrocosmes, cylindres de PVC (Figure 14c) couverts par un cache plastique finement percé pour assurer une ventilation et afin d'éviter la fuite des animaux.

Chaque espèce de faune du sol a été placée en combinaisons mono-, bi-, tri- et quadrispécifiques pour un total de 15 combinaisons possibles en plus du traitement « témoin » sans faune (Figure 25).

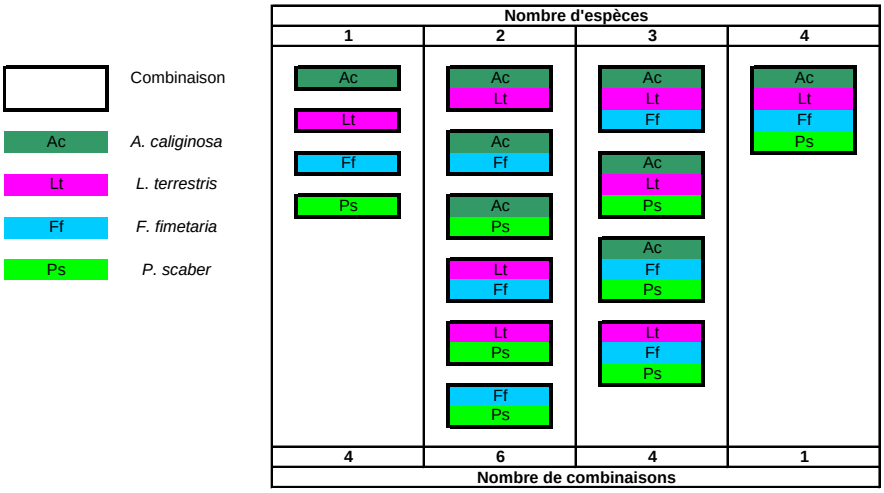


Figure 25. Ensemble des combinaisons d'espèces testées dans l'expérience « diversité ».

Environ huit kilogrammes de sol ont été introduits dans les macrocosmes. Ces matériaux ont été disposés pour former une seule et même modalité de sol, formé par : une couche de 2 cm de CDV au-dessus d'une couche de 23 cm de TIT/SPP. Le CDV a été placé à 65% de la capacité au champ et le TIT/SPP à 95%. Quatre grammes de litière sèche ont été placés à la surface des cosmes. La même abondance (2 x *L. terrestris*, 3 x *A. caliginosa*, and 4 x *P. scaber*) et la même biomasse (respectivement 9,67±0,29 g, 1,38±0,12 g et 0,299±0,050 g) de macrofaune a été introduite (dans chaque cosme qui le nécessitait). La même abondance (20 individus) de mésofaune a été introduite (dans chaque cosme qui le nécessitait). Ainsi, un total de 48 macrocosmes, correspondant à 16 modalités, 3 réplicats et une date (75 jours) ont été lancés (Figure 26). Les macrocosmes ont été stockés à 15 ± 2 ºC avec une photopériode (12 lumière/12h nuit). De l'eau a été pulvérisée à la surface toutes les semaines pour compenser les pertes par évaporation mesurées par pesées.

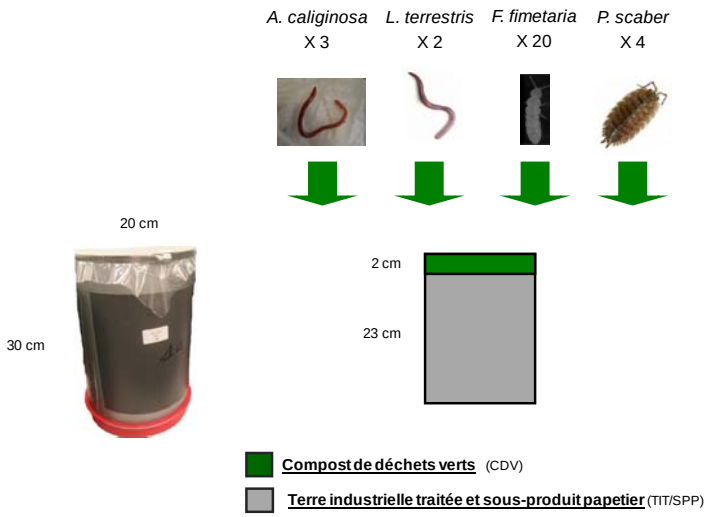


Figure 26. Représentation schématique de l'expérience « diversité ».

Au 75ème jour, les macrocosmes ont été divisés en trois horizons pour effectuer l'échantillonnage (Figure 27 & Figure 28) :

- « l'horizon CDV » qui représente la couche de CDV
- « l'horizon A » qui est la couche de sol allant de l'interface du CDV et du TIT/SPP à la moitié de la couche de TIT/SPP
- « l'horizon B » qui est la couche de sol allant de la moitié de la couche de TIT/SPP au fond du cosme.

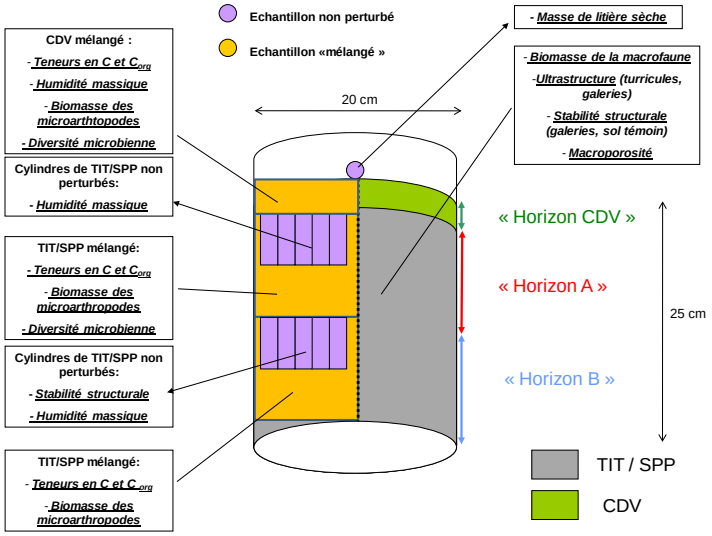


Figure 27. Représentation schématique des analyses effectuées sur les macrocosmes de l'expérience « diversité » à t=75 jours. TIT/SPP : terre industrielle traitée et sous produit papetier, CDV : compost de déchets verts.

Pour l'ensemble du macrocosme :

- la masse de litière sèche restante a été estimée.
- la variation de biomasse moyenne pour chaque représentant de la macrofaune a été exprimée par rapport au poids initial. La biomasse des individus morts (ou non retrouvés) a été considéré comme nulle.
- la macroporosité a été estimée à l'aide de la tomographie à rayons X.
- des galeries bien visibles et le « bulk soil » correspondant (du même horizon) ont été prélevés pour les analyses ultratructurales.
- la stabilité structurale de galeries de *L. terrestris* prélevées aléatoirement dans le TIT/SPP a été comparée à celle du « bulk soil » TIT/SPP de la modalité témoin.

Pour chaque horizon de chaque macrocosme :

- la biomasse des microarthropodes a été évaluée.
- les teneurs en C_{tot} et en C_{org} ont été mesurées.
- l'humidité massique a été mesurée.

Pour « l'horizon B » seulement :

- la stabilité structurale a été mesurée

Pour l'horizon « CDV » et « A » des modalités témoin, monospécifique et quadrispécifique :

- la quantité d'ADN microbien et la diversité microbienne a été évaluée

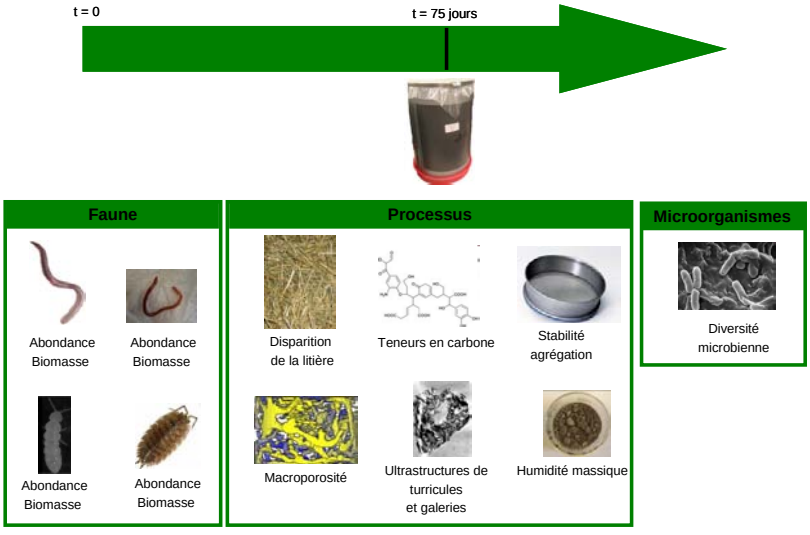


Figure 28. Déroulement de l'expérience « diversité ».

2.3 Les analyses

2.3.1 Matrices biologiques

2.3.1.1 La macrofaune

- Les analyses *in situ* (Grandes parcelles & Parcelles lysimétriques)

L'échantillonnage des lombriciens *in situ* s'est faite par la technique d'extraction au formol (Bouché et Aliaga, 1986) qui consiste à pulvériser des solutions formolées de plus en plus concentrées sur une surface donnée pour en extraire les vers de terre. Les lombriciens sont ensuite identifiés au niveau intraspécifique suivant une clé de détermination mise au point par Cluzeau (non publiée, communication personnelle), basée sur des travaux antérieurs (Bouche, 1972).

L'échantillonnage de la macrofaune *in situ* (lombriciens y compris) s'est faite par la technique d'excavation du sol (Edwards, 1991). Un bloc de 25cm*25cm*25cm de sol est excavé. Le sol est ensuite trié manuellement pour récupérer les animaux qui sont comptés et ensuite identifiés (Geoffroy, 1992,1993; Hopkin, 1991).

- Les analyses en laboratoire (Expériences en laboratoire)
    - Les lombriciens

Pour la mesure de biomasse dans l'expérience « survie », les vers de chaque cosme ont été pris globalement en compte. Pour chaque ver, les caractères sexuels ont été notés : absence/présence du puberculum, absence/présence du clitellum. Les vers ont ensuite été lavés, délicatement séchés sur du papier absorbant puis pesés au dixième de grammes près. La biomasse finale de l'ensemble des vers a été rapportée à la biomasse initiale pour exprimer une variation de biomasse en %. Dans les autres expérimentations (Expériences « comportement » et « diversité »), chaque ver a été pris individuellement en compte. Pour chaque ver, les caractères sexuels ont été notés : absence/présence du puberculum, absence/présence du clitellum. Chaque ver a ensuite été lavé, délicatement séché sur du papier absorbant puis pesé au dixième de grammes près. Puis les biomasses finales des vers du même cosme ont été additionnées et rapporté à la biomasse initiale introduite pour exprimer une variation de biomasse en

%. Pour toutes les pesées, les vers n'ont pas été dépurés pour éviter de réduire leur vitalité.

Les mesures de production de cocons et de juvéniles de vers ont été effectuées simultanément (Expérience « survie »). L'intégralité du sol du cosme est passé à travers une série de tamis (5mm, 2mm, 1mm, 500 microm, 200 microm) immergé par un circuit d'eau en continu. Une fois la majeure partie du sol évacuée par l'eau à travers les tamis, les cocons et juvéniles à la surface des différents tamis ont été décomptés (Butt *et al.*, 1994).

- Les isopodes

Chaque cloporte (Expérience « diversité ») a été pris individuellement en compte. Il a été débarrassé délicatement d'éventuels morceaux de sol collés à son tégument. Il a ensuite été pesé au dixième de grammes près. Les biomasses finales des cloportes du même cosme ont été additionnées et rapporté à la biomasse initiale introduite pour exprimer une variation de biomasse en %.

2.3.1.2 Les microarthropodes

- Les analyses *in situ* (Grandes parcelles & Parcelles lysimétriques)

L'échantillonnage des microarthropodes s'est fait au moyen d'un cylindre PVC, carottier, pouvant contenir environ 200g de sol frais. Le carottier est inséré au niveau du lieu de prélèvement. Une fois prélevé, le carottier est pesé, placé pendant 8 jours dans un extracteur à haut gradient de température (MacFadyen type, Takeda 303 1979). Le carottier est alors pesé à nouveau. Une valeur d'humidité massique est obtenue (%). Les microarthropodes sont alors extraits dans une solution d'acide benzoïque (2.9 $g.l^{-1}$). Ils sont ensuite conservés dans de l'éthanol à 70%, comptés sous la loupe binoculaire et identifiés sous microscope. Les collemboles ont été identifiés au niveau de l'espèce (Bretfled, 1999; Gisin, 1960; Hopkin, 2007; Potapow, 2001; Thibaud *et al.*, 2004) et les acariens au niveau du sous ordre (Krantz, 1978). Les larves d'insectes et autres invertébrés ont été comptés. On obtient ainsi un nombre d'espèces et d'individus par volume de sol prélevé ou par unité de surface.

- Les analyses en laboratoire (Expérience « diversité »)

Une quantité standard de sol provenant de la zone de prélèvement a été homogénéisée délicatement au préalable avant d'être déposé dans le carottier en PVC. L'ensemble de la procédure est ensuite identique à celle que l'on utilise *in situ*. Une valeur d'humidité massique est ainsi obtenue. Les individus, n'appartenant qu'à la même espèce (*F. fimetaria*), ont été comptés sous loupe binoculaire. Toutefois, le sol a été déstructuré pendant le prélèvement, il est donc impossible de raisonner en terme d'abondance par unité de volume. Une valeur d'abondance par masse de sol sec a été utilisée. Puis, à partir de la littérature qui fournit une longueur moyenne de taille pour l'espèce *F. fimetaria* et à partir d'équations qui transforment la longueur des collemboles en biomasse (Cortet *et al.*, 2003; Petersen, 1975), la biomasse des collemboles a été établie à partir de l'abondance. On obtient au final une valeur de biomasse par unité de sol sec.
De petites contaminations par d'autres espèces sont apparues dans les échantillons (< 0,30%). Les collemboles « étrangers » ont alors été identifiés au niveau de l'espèce et les acariens « étrangers », les larves d'insectes et autres invertébrés au niveau des sous-ordres.

2.3.1.3 Les microorganismes

Après extraction de l'ADN des échantillons de sol, les concentrations d'ADN totales ont été estimées à l'aide d'un spectromètre. Une fois amplifiés par PCR, les diversités des ADN bactériens et fongiques ont été estimées par TTGE (Temporal Temperature Gradient gel Electrophoresis). Les quantités spécifiques d'ADN bactérien et d'ADN fongique ont ensuite été estimées par q-PCR (PCR en temps réel). Ces caractérisations ont été réalisées au LIMOS, CNRS à Vandœuvre-lès-Nancy. Les protocoles figurent en annexes (Annexe I).

2.3.2 Matrices liquides

Les matrices liquides (percolats, solution du sol) ont été filtrées au préalable à 0,45 µm à l'aide de filtres de cellulose pour éliminer les matières particulaires.

2.3.2.1 Dosage des ions ammonium (NH_4^+) et nitrates majeurs (NO_3^-)

Les matrices liquides ont été analysées directement ou diluées (10 ou 100 fois selon la concentration) par chromatographie ionique (IC 25, Dionex) (Expérience Lysimètres).

2.3.2.2 Dosage du carbone organique, inorganique et de l'azote total

Les matrices liquides, diluées 10 fois, ont été analysées par un analyseur de carbone et d'azote (Total Organic Carbon Analyser, Shimadzu) (Expérience Lysimètres).

2.3.3 Matrices solides

Les mesures des paramètres agronomiques des matériaux (Tableau 1) ont été réalisées au Laboratoire d'Analyse des Sols (INRA, Arras) et au LSE.

2.3.3.1 Analyses chimiques

Les matériaux parents ont subi des mesures de : pHeau, calcaire total, calcaire actif, C_{tot}, matière organique, C_{org}, azote total, azote minéral, phosphore assimilable, cations échangeables (calcium (Ca), magnésium (Mg), potassium (K), sodium (Na) (acétate d'ammonium)) et capacité d'échange cationique. Le rapport C/N est obtenu en effectuant le rapport de la teneur en C_{org} et la teneur en azote total.
Les matériaux expérimentaux (Expériences « comportement » & « diversité ») ont subi des mesures de : teneur en C_{tot} et teneur en C_{org} avec des protocoles différents. L'ensemble des protocoles figurent en annexes (Annexe II).

2.3.3.2 Analyses physiques

Les matériaux parents ont subi une granulométrie sans décarbonatation et une mesure de capacité au champ. La disparition de la litière de l'expérience « diversité » a été évaluée après séchage de la litière au temps final par pesée. La macroporosité ainsi que le déplacement de matière dans les galeries dans l'expérience « comportement » ont été mesurés à l'aide de la tomographie à rayons X (Capowiez *et al.*, 1998). Les stabilités structurales des échantillons de sol et des agrégats des galeries ont été évaluée par deux méthodes différentes adaptées de Le bissonais (Le bissonais, 1996). La production de turricules de l'expérience « comportement » a été évaluée après tamisage et séchage par pesées (Capowiez *et al.*, 2009). La production de turricules de surface de l'expérience « comportement » a été évaluée après séchage par pesées. L'humidité massique de l'expérience de « diversité » a été évaluée par mise à l'étuve à 105°C et par pesée.

L'observation d'échantillons ultrastructuraux par microscope électronique à transmission (Expériences « comportement » et « diversité ») a nécessité la fixation chimique des échantillons de sol et de fractions granulométriques de ces mêmes échantillons, leur déshydratation et enfin leur coupe ultra-fine.

Les protocoles complets figurent en annexes (Annexe III).

2.4 Le traitement des données

2.4.1 Calculs d'indices de diversité (collemboles)

Les données acquises sur les collemboles nous ont permis de calculer différents indices de diversité : la richesse taxonomique (S), la diversité spécifique ou indice de Shannon-Weaver (H'x) et l'équitabilité indiquant la répartition (E) des espèces dans les échantillons (Annexe IV).

2.4.2 Organisation des données lysimétriques

Pour les données des lysimètres, les débits de percolats ont été sommés au fur et à mesure afin de présenter des hauteurs d'eau par lysimètre. Les mesures d'humidité seront présentés brutes par lysimètre. Pour les analyses en laboratoire des percolats, dans un premier temps les valeurs de concentration qui ont été mesurés directement dans le percolat prélevé seront présentées brutes. Dans un deuxième temps, afin de quantifier les quantités lixiviées, on a multiplié la concentration en élément X à un temps t par le volume percolé entre la mesure t-1 à la mesure t. En sommant au fur et à mesure les quantités lixiviées, une estimation cumulative de la quantité lixiviée dans le temps de l'élément X sera présentée. Enfin pour les analyses en laboratoire des bougies poreuses, les valeurs de concentration qui ont été mesurées directement dans la solution du sol seront présentées brutes. En effet, ne connaissant pas le volume de solution du sol prélevé et disponible au sein de l'horizon considéré, il est impossible d'estimer les quantités présentes dans la solution du sol. Ces concentrations ne représentent ainsi qu'un état des lieux à un instant donné.

2.4.3 Analyses de données

Les données des grandes parcelles, à savoir les facteurs abiotiques (humidité, épaisseur de compost) et les paramètres des microarthropodes (*e.g.* indices de diversité, abondances) en distinguant les deux modalités ont fait l'objet d'une analyse en composantes principales non paramétrique (Spearman, α=5%) (Addinsoft, 2009) du fait de la présence de valeurs extrêmes (valeur nulle). Par le biais d'un autre outil d'analyse de données (WEKA) (Witten *et al.*, 1999), les valeurs d'épaisseur de compost puis d'humidité ont été mises en relation avec les paramètres biotiques afin de dégager des arbres de régression explicatifs (M5P).

Les données des parcelles lysimétriques, facteurs abiotiques et paramètres des microarthropodes ont fait l'objet d'une analyse en composante principale non paramétrique (Spearman, α=5%) (Addinsoft, 2009).

L'ensemble des données de l'expérience « diversité » (exceptées les données des microorganismes dont les mesures n'ont été effectuées que sur une partie des modalités) ont subi une analyse en composantes principales non paramétrique (Spearman, α=5%) (Addinsoft, 2009) du fait du faible nombre de répétitions de cette expérience (= 3).

2.4.4 Tests statistiques

Afin d'établir une différence entre les modalités « confinement » et « éponge végétale » des grandes parcelles, les paramètres des microarthropodes et paramètres abiotiques ont subi une comparaison de moyenne non paramétrique (Mann-Whitney, α=5%) (Addinsoft, 2009).

Un test de corrélation non paramétrique (Spearman, α=5%) (Addinsoft, 2009) a été effectué entre la distance à la bordure et l'abondance de collemboles.

Pour comparer les différentes modalités des parcelles lysimétriques, l'homoscédasticité des moyennes ainsi que la normalité des paramètres des microarthropodes et paramètres abiotiques ont été vérifiée. Ils ont subi ensuite une comparaison de moyenne paramétrique (ANOVA, α=5%) suivi d'un test post-hoc (Tukey) ou non

paramétrique (Kruskal-Wallis, α=5%) suivi d'un test post-hoc (Conover-Iman) (Addinsoft, 2009).

Les données des expériences en laboratoire : variations de biomasse, nombre de cocons, nombre de juvéniles, masse de turricules totale et de surface, masse des fractions pondérales du test de stabilité du sol et des galeries, teneurs en C_{tot} et C_{org} du sol et des turricules, masse finale de litière de surface, humidités massiques (CDV, horizons A et B), quantités d'ADN bactérien et fongique, ont subi une comparaison de moyennes non paramétriques (Mann-Whitney ou Kruskal-Wallis, α=5%) suivi (si n>2) d'un test post-hoc non paramétrique (Conover-Iman) (Addinsoft, 2009).

Chapitre III Le Technosol construit : support de vie de la faune du sol ?

Pour envisager la faune du sol comme un facteur de pédogenèse, une présence continue des organismes dans la matrice sol semble une condition nécessaire. Dans les sols naturels, cette présence dépend de contraintes abiotiques ou environnementales (biogéographique, dispersion, habitat) et d'interactions biotiques. La question majeure de ce chapitre est alors de savoir quelles sont les réponses de la faune du sol face aux contraintes que lui impose un Technosol ?

Dans le cas du Technosol construit, nous envisagerons les contraintes abiotiques sous l'angle du procédé de construction de sol choisi (Figure 29). Cette hypothèse est liée au fait que ce filtre dépend entièrement de l'Homme via le processus de construction par génie pédologique. Nous considérerons ensuite l'effet des interactions biotiques au niveau des groupes fonctionnels de faune (Figure 29). Ce choix répond à deux arguments forts. D'une part, il apparaît plus démonstratif de raisonner sur les interactions entre groupes fonctionnels dans une logique de restauration des fonctions du sol que sur tout autre approche faunistique (*e.g.* taxonomique, trophique). D'autre part, l'Homme peut agir en partie sur ce filtre par le génie pédologique, en inoculant des groupes fonctionnels dans le Technosol.

Les deux filtres retenus dans le contexte des Technosols construits sont donc *a priori* les filtres les plus ajustables des grandes familles de filtres connus de la littérature.

Des données de la littérature, rares pour les Technosols mais concernant d'autres contextes d'étude proches (matériaux technogéniques organiques brutes ou déposés à la surface de sol) indiquent que la construction des sols pourrait engendrer une modification de la variable populationnelle. Le caractère néoformé des sols construits impose en effet un profil marqué, constitué horizons distincts de matériaux contrastés. Ces sols sont ainsi exempts de macrofaune, et ne possèdent que peu de formes de mésofaune initialement (quelques espèces apportées par le compost).

Par ailleurs, les études ne prennent quasiment jamais en compte la notion de diversité fonctionnelle. Ainsi, aucune hypothèse ne peut être émise quant à l'effet des interactions biotiques, notamment au niveau fonctionnel, sur la composition faunistique du Technosol construit.

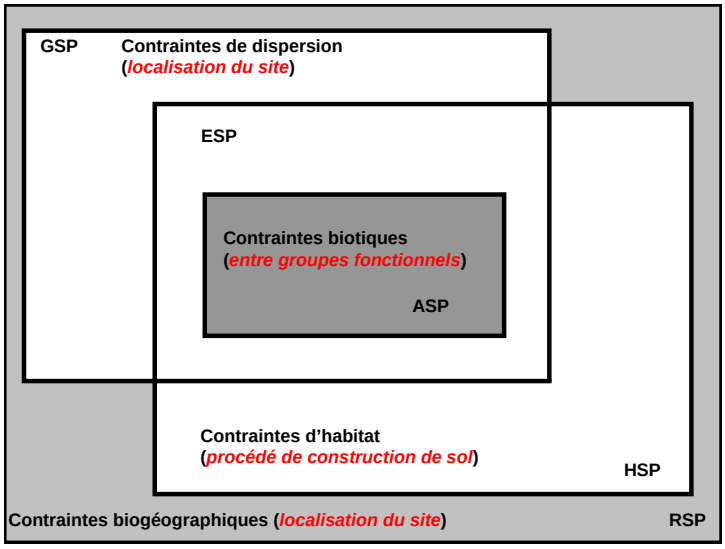


Figure 29. Réduction du pool d'espèces de la faune du sol avec les changements d'échelles. RSP = Groupes d'espèces régionales ; HSP = Groupes d'espèces d'habitat ; GSP = Groupes d'espèces géographiques; ESP = Groupes d'espèces écologiques; ASP = Groupes réels d'espèces (Belyea et Lancaster, 1999; Hedde, 2006; Kelt* et al.*, 1995).

Nous avons décidé d'avoir une approche réductrice, à savoir que nous commencerons par des observations à grandes échelles (de temps, d'habitat et d'interactions biotiques) pour progressivement réduire ces échelles en décomposant au maximum les facteurs d'influence. La première étape doit permettre de caractériser et de quantifier la communauté de la faune du sol susceptible de coloniser et de vivre à l'échelle du profil de sol. Cette approche renseignera à la fois sur l'effet du profil de sol sur la faune au cours du temps et sur les interactions biotiques résultantes. L'étape suivante consiste alors à évaluer l'effet de la contrainte d'habitat qu'on envisagera sous la forme du procédé de construction de sol (nature, formulation et proportion) sur des paramètres de vie de la faune (reproduction, variations de biomasse) en s'affranchissant des interactions biotiques. Cette approche permet de considérer la contrainte d'habitat en jouant sur le procédé de construction : du matériau pur au profil de sol. Finalement, différentes interactions biotiques à l'échelle des groupes fonctionnels seront caractérisées en s'affranchissant de la contrainte d'habitat.

Nous présenterons d'abord les résultats de l'étude sur plusieurs années de la dynamique populationnelle *in situ* des communautés au sein du Technosol construit. Les interprétations se feront d'un point de vue fonctionnel et seront reliées aux facteurs environnementaux, dans une logique de transition vers les deux autres questionnements de cette partie, Figure 30). En effet, le suivi des grandes parcelles (t=8 mois) et des parcelles lysimétriques (t=30 mois) permettra de décrire une dynamique temporelle du système sol-faune. Les résultats sur l'effet de la nature des matériaux, de la formulation et des proportions des matériaux parents sur les paramètres de vie d'individus modèles (*E. fœtida et L. terrestris*) seront utilisés pour estimer l'influence du procédé de construction du Technosol construit (Expériences « survie » & « comportement », Figure 30). Enfin, les résultats obtenus en laboratoire basés sur l'utilisation de groupes fonctionnels nous permettront d'évaluer l'effet des interactions biotiques des groupes fonctionnels entre eux dans une même modalité de construction de sol (Expérience « diversité », Figure 30).

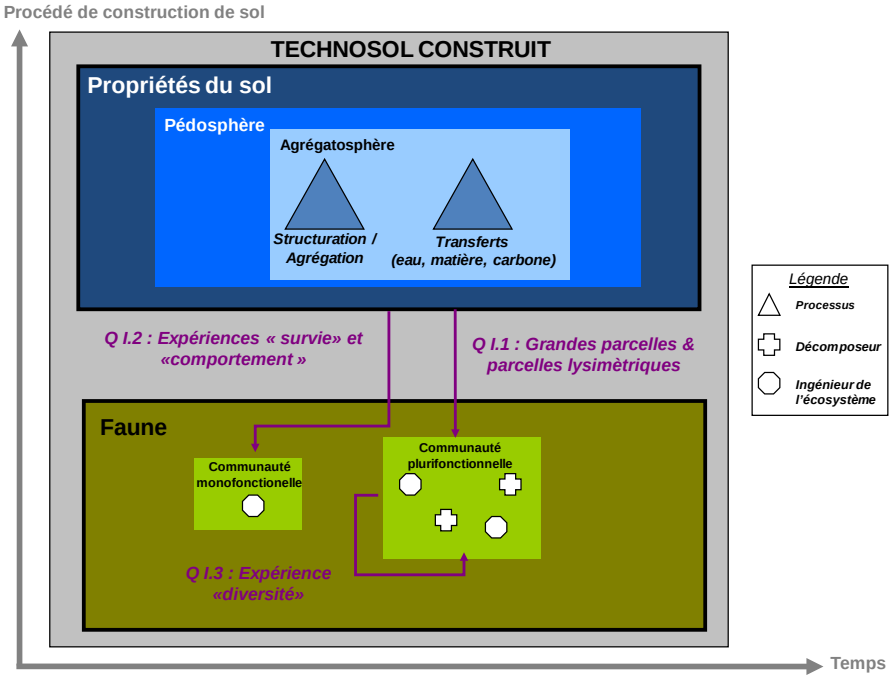


Figure 30. Schéma directeur du chapitre III : le Technosol construit : support de vie de la faune du sol ?

1 Dynamique des communautés de faune du Technosol construit *in situ*

1.1 Etat des lieux de la colonisation d'un Technosol construit après 8 mois (grandes parcelles)

1.1.1 La macrofaune

Lors de l'échantillonnage à 8 mois, aucune macrofaune n'a été trouvée, que ce soit par la technique du formol ou par la technique d'excavation.

1.1.2 Les microarthropodes

1.1.2.1 Description du système

Quatre vingt dix sept pourcents des échantillons prélevés sur les grandes parcelles contenaient au moins un individu appartenant aux microarthropodes (Figure 31). L'abondance (nombre d'individus) s'échelonne de 0 à 204810 individus par mètre carré (ind/m^2), pour une moyenne de 11547 ind/m^2. En moyenne, la communauté de microarthropodes est formée par 63,5% de collemboles, 28,6% d'acariens et 7,9% d'autres Arthropodes (Figure 31).

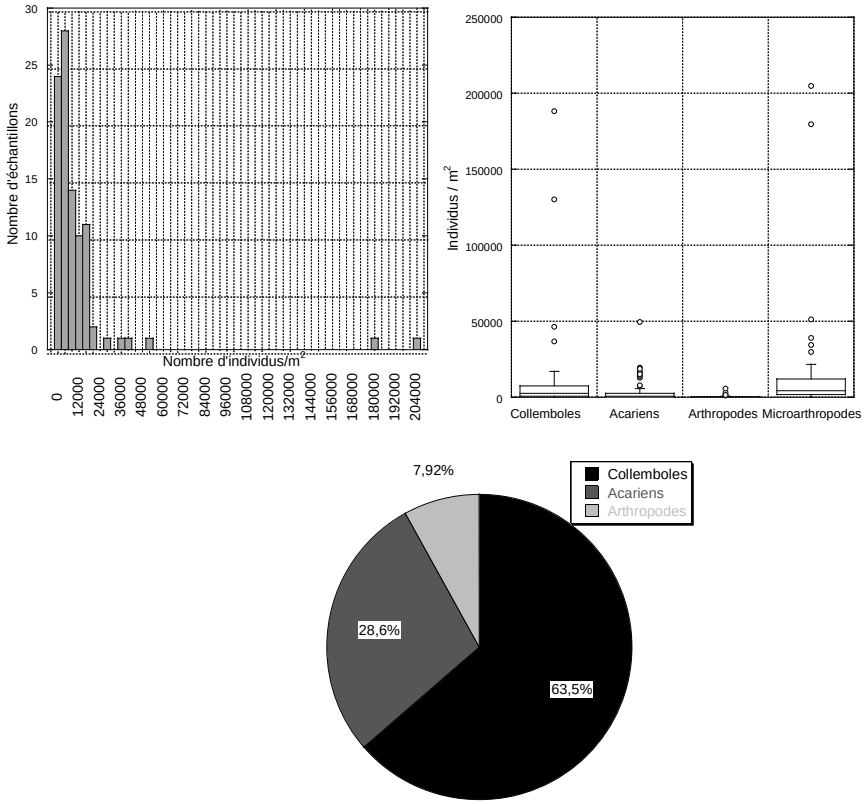


Figure 31. Description statistique des microarthopodes dans les Technosols construits des grandes parcelles à t=8mois : en haut à gauche, fréquence des échantillons en fonction de l'abondance des microarthropodes, en haut à droite, box-plots de l'abondance des microarthropodes et de ses composantes : abondances de collemboles, d'acariens et autres arthropodes, en bas, pourcentage des abondances de collemboles, d'acariens et autres arthropodes par rapport à l'abondance des microarthropodes.

L'abondance des acariens s'échelonne de 0 à 49522 ind/m² pour une moyenne de 2953 ind/m² (Figure 32). En moyenne, la communauté d'acariens est formée de 87,8% de Gamasida, 9,6% d'Oribatida et de 2,6% d'Actinedida (Figure 32).

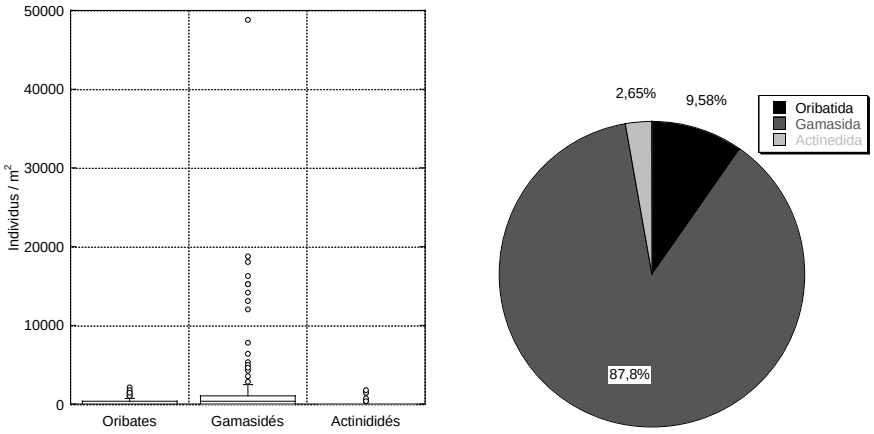


Figure 32. Description statistique des acariens dans les Technosols construits des grandes parcelles à t=8mois : à gauche, box-plots des abondances de Gamasida, Oribata et Actinedida et à droite pourcentage des abondances de Gamasida, Oribata et Actinedida par rapport à l'abondance des acariens.

L'abondance des collemboles s'étend de 0 à 188185 ind/m^2 pour une moyenne de 8259 ind/m^2 (Figure 33). On décompte une richesse de 2,97 taxons en moyenne par échantillon, allant de 0 à 8 taxons au maximum (Figure 33). L'indice de Shannon-Weaver (calculé pour les échantillons avec 2 espèces au minimum) est en moyenne de 0,99, preuve d'une faible diversité. L'équitabilité en moyenne égale à 0,54 est une valeur basse d'équitabilité et indique une mauvaise répartition de la richesse spécifique (Figure 33).

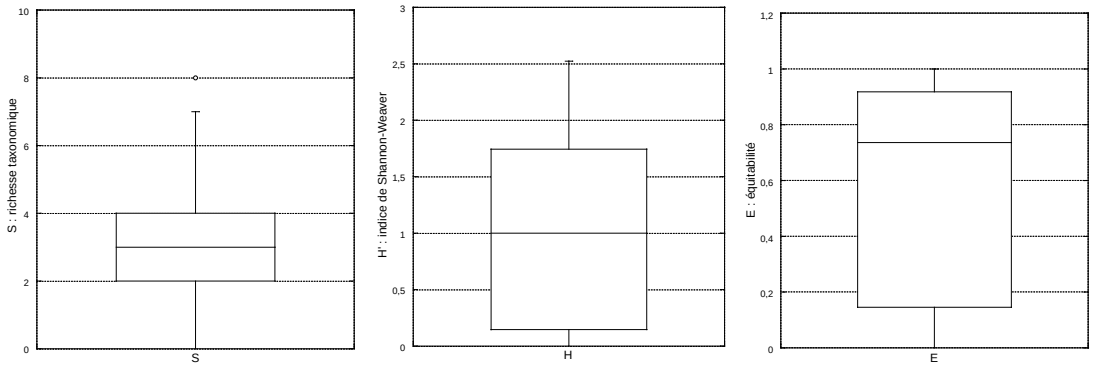


Figure 33. Box-plots des indices de diversité (S : richesse, H' : indice de Shannon-Weaver et E : équitabilité) calculés à partir des abondances des espèces de collemboles retrouvés dans les Technosols construits des grandes parcelles à t=8mois.

L'identification des collemboles nous a permis de retenir 19 taxons, dont 17 au niveau de l'espèce et 2 au niveau du genre (Tableau 7). En effet, pour le genre *Mesaphorura* nous avons identifié deux espèces qui sont *Mesaphorura macrochaeta* et *Mesaphorura*

florae. Toutefois, nous n'avons pu identifier tous les individus récoltés. Par ailleurs pour le genre *Entomobrya*, l'espèce n'a pu être déterminée.

Tableau 7. Liste des espèces de collemboles retrouvés dans les Technosols construits des grandes parcelles à t=8mois.

Famille	Genre	Espèce	Catégorie Ecologique
Isotomidae	*Cryptopygus*	*thermophilus*	hémiédaphique
	Isotomodes	*productus*	euédaphique
	Isotomurus	*antennalis*	épiédaphique
	Isotoma	*viridis*	épiédaphique
	Parisotoma	*notabilis*	hémiédaphique
	Proisotoma	*minuta*	hémiédaphique
	Folsomia	*penicula*	euédaphique
	Folsomia	*candida*	euédaphique
Entomobryidae	*Entomobrya*	*sp*	épiédaphique
	Heteromurus	*major*	hémiédaphique
	Lepidocyrtus	*violaceus*	hémiédaphique
	Lepidocyrtus	*cyaneus*	hémiédaphique
Tullbergiidae	*Mesaphorura*	*macrochaeta*	euédaphique
	Mesaphorura	*sp*	euédaphique
	Mesaphorura	*florae*	euédaphique
Hypogastruridae	*Hypogastura*	*manubrialis*	hémiédaphique
Katiannidae	*Sminthurinus*	*elegans*	hémiédaphique
Sminthurididae	*Sphaeridia*	*pumilis*	hémiédaphique
Bourletiellidae	*Deuterosminthunus*	*pallipes*	épiédaphique

Les microarthropodes sont très largement représentés par 5 espèces qui avec les Gamasida constituent 89% de l'abondance totale des microarthropodes présents (Figure 34). Deux espèces, *Proisotoma minuta* (24%) et *Hypogastura manubrialis* (22%) représentent à elles seules les deux tiers de l'abondance totale des microarthropodes. *Parisotoma notabilis*, avec 51% de fréquence d'apparition, est l'espèce la plus constante (Figure 34). Il s'agit d'une espèce ubiquiste. Six taxons sont des espèces accessoires qui n'apparaissent qu'une fois.

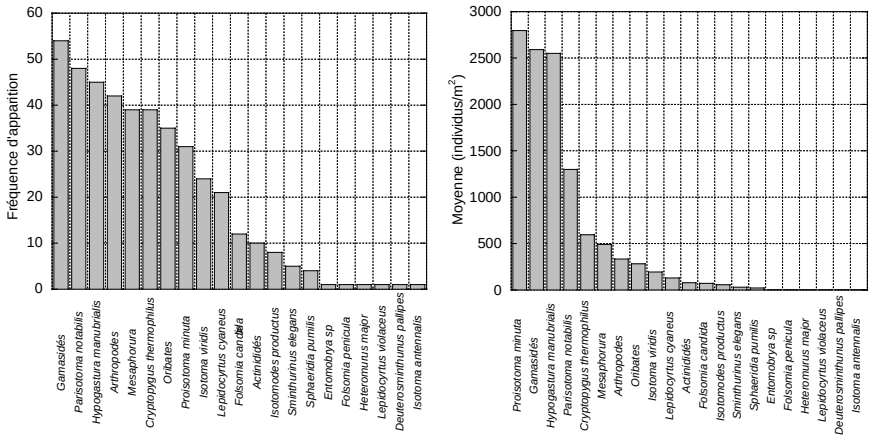


Figure 34. Fréquences d'apparition décroissante (à gauche) et moyenne des abondances décroissante (à droite) des espèces de collemboles et des genres d'acariens retrouvés dans les Technosols construits des grandes parcelles à t=8mois.

La classification des espèces selon leur appartenance écomorphologique : épi-, hémi- ou euédaphique, présente une répartition déséquilibrée (Figure 35) avec 90% d'hémiédaphiques, 7,5% d'euédaphiques et enfin 2,5% d'épiédaphiques. La fréquence d'apparition est de 84,2% pour les hémiédaphiques, 51,6% pour les euédaphiques et 28,4% pour les épiédaphiques.

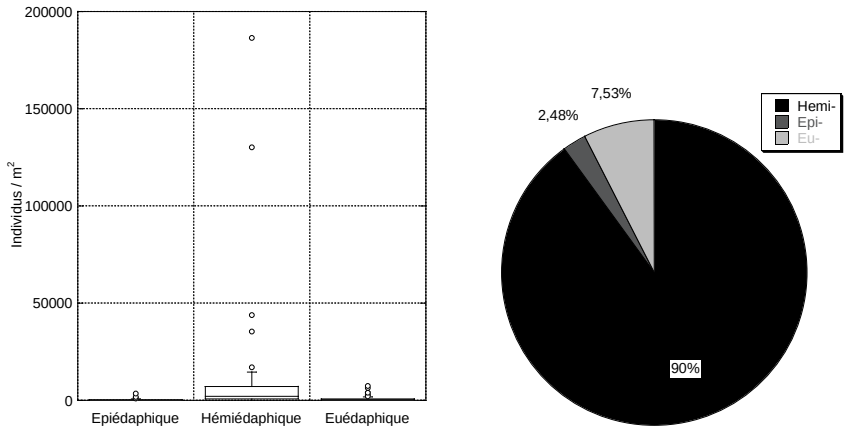


Figure 35. Description statistique des groupes fonctionnels de collemboles dans les Technosols construits des grandes parcelles à t=8mois : à gauche, box-plots des abondances de collemboles épiédaphiques, hémiédaphiques et euédaphiques et à droite pourcentage des abondances de collemboles épiédaphiques, hémiédaphiques et euédaphiques Gamasida par rapport à l'abondance de collemboles.

1.1.2.2 Mise en relation de la faune et des facteurs environnementaux

- Effet des modalités de construction de sols

Les représentations spatiales des abondances totales des microarthropodes, de collemboles, des indices calculés (Annexe V) et les tests de Mann-Whitney ne montrent pas de différence significative entre les deux modalités « éponge végétale » et « confinement » (Tableau 8). La répartition spatiale des acariens ainsi que le test de Mann-Whitney dévoilent une abondance plus élevée pour la modalité « confinement » que pour la modalité « éponge végétale ». Seul le sous-ordre des *Gamasida* engendre une différence au test de Mann-Whitney, preuve que la différence d'abondance des *Gamasida*, groupe le plus représenté des acariens explique la différence d'abondance des acariens entre les deux modalités. Pour l'ensemble des différences, c'est la modalité confinement qui présente la valeur la plus élevée d'abondance.

Tableau 8. Synthèse des tests statistiques (Mann-Whitney) effectués sur l'ensemble des attributs de mesure de l'abondance des microarthropodes en fonction des deux modalités de Technosol construits (« éponge végétale » et « confinement ») des grandes parcelles à t=8mois.

Paramètres	Valeur de U	P-value	Significativité
Microarthropodes	1299,5	0,185	NS
Collemboles	1021	0,450	NS
Acariens	1490,5	0,005	**S**
Autres arthropodes	1141,5	0.872	NS
Oribatida	1233	0,337	NS
Gamasida	1450	0,010	**S**
Actinedida	1139,5	0,806	NS
S	1101	0,874	NS
H'	1057,5	0,630	NS
E	1027	0,475	NS
Epiédaphique	938,5	0,084	NS
Hémiédaphique	1031	0,495	NS
Euédaphique	1193,5	0,568	NS
Humidité	1253	0,328	NS
Epaisseur de compost	1271	0,260	NS

- Effet des bordures des parcelles expérimentales

La représentation spatiale des microarthropodes semble indiquer un léger effet de colonisation de bord sur la parcelle « éponge végétale ». Une corrélation de Spearman (R = -0,380) entre l'abondance de collemboles et leurs distances les plus proches à la bordure vient confirmer cette observation (Tableau 9). Plus on est près de la source de colonisation, plus l'abondance est élevée. Toutefois, cette corrélation reste faible puisque si on calcule le R^2 = 14%, on comprend qu'à une distance fixée, seulement 15% de la variance de l'abondance de collemboles est expliquée. Une situation similaire est mise en évidence pour l'abondance des collemboles hémiédaphiques (R = -0,385 ; R^2=15%). La non-corrélation des autres groupes fonctionnels avec la distance s'explique par le fait que les hémiédaphiques représentent 90% des collemboles.

Tableau 9. Synthèse des tests de corrélation (Spearman) effectués entre la distance la plus proche du bord de la parcelle d'un échantillon et respectivement l'abondance de collemboles et l'abondance de collemboles hémiédaphiques de ce même échantillon dans la modalité éponge végétale de construction de sol des grandes parcelles à t=8mois.

Corrélations de Spearman				
	Coefficient de corrélation =R	**R^2**	**P-value**	**Significativité**
Distance - collembole	-0,380	0,4	<0,001	**S**
Distance - hémi	-0,385	0,15	<0,001	**S**

- Effets des facteurs abiotiques : humidité relative des échantillons de sol et épaisseur de compost

Les représentations spatiales et les tests de Mann-Whitney concernant l'humidité des matériaux et l'épaisseur de compost ne montrent pas de différence significative selon les modalités. On peut donc exploiter l'ensemble des données des deux parcelles pour évaluer le lien entre les microarthropodes et les paramètres abiotiques en s'affranchissant des deux modalités.

L'analyse en composantes principales (Figure 36) a été effectuée avec tous les attributs mesurés de la faune du sol, excepté les attributs correspondant aux taxons de collemboles, limités aux 5 espèces les plus représentées. La projection des échantillons sur le plan formé par les axes 1 et 2 ne montre pas de distinction entre les deux modalités « éponge végétale » et « confinement ». En s'attachant à la matrice des

corrélations, on ne retrouve aucune corrélation significative entre les facteurs environnementaux (épaisseur de compost et humidité) avec un quelconque attribut. Des corrélations positives logiques sont observées, *e.g.* le genre *Mesaphorura*, euédaphique le plus représenté avec l'abondance des euédaphiques dont la description ne nous apprend pas plus que les résultats précédents (Annexe VI).

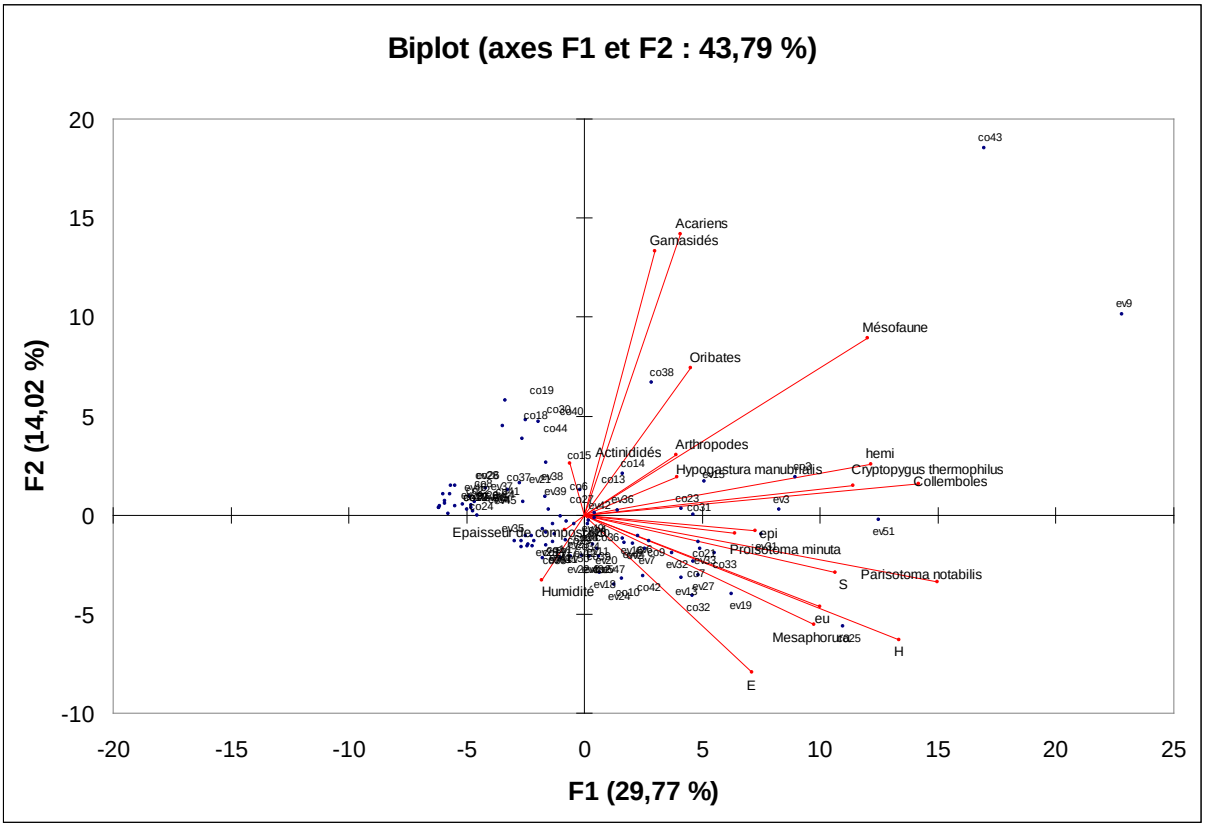


Figure 36. Projection des axes des attributs de l'ACP effectuée avec tous les attributs mesurés des microarthropodes, excepté que les attributs des taxons des collemboles ont été limités aux 5 espèces les plus représentées dans Technosols construits des grandes parcelles à t=8mois. co=confinement ; ev=éponge végétale.

Des analyses d'extraction de données (« data mining ») ont été réalisées en essayant d'expliquer l'humidité d'une part, et l'épaisseur de compost d'autre part, par l'ensemble des paramètres de microarthropodes (abondance par espèces de collemboles et genre d'acariens) et les paramètres agrégés (indices de diversité, abondance par groupe écomorphologique de collemboles et genre d'acariens) (Tableau 10).

Tableau 10. Synthèse des simulations de data mining effectuées avec l'ensemble des attributs des abondances de microarthropodes dans les Technosols construits des grandes parcelles à t=8mois.

Paramètre d'étude	*Facteurs explicatifs*	*R*
Humidité des matériaux constitutifs du Technosol	abondance de collemboles, d'acariens et autres arthropodes, indices de diversité, abondance par groupe écomorphologique de collemboles, épaisseur de compost	-0,0048
Epaisseur de la couche de compost	abondance de collemboles, d'acariens et autres arthropodes, indices de diversité, abondance par groupe écomorphologique de collemboles, humidité	-0,1176

Aucune des simulations ne permet de mettre en relation les paramètres abiotiques aux paramètres de faune du sol qu'ils soient basiques ou agrégés (Annexe VII).

1.1.3 Discussion

Il semble logique, 8 mois seulement après la construction de sol, de ne retrouver aucune macrofaune. En effet, l'essentiel des éléments colonisateurs de la macrofaune sont inféodés à la présence de végétation (Boyer et Wratten, 2010; Haimi, 2000; Snyder et Hendrix, 2008) qui en avril 2008 (t=8mois) est encore quasiment absente.

A t=8mois, on peut considérer que les deux modalités de Technosol construit présentent quasiment la même typologie et la même abondance de microarthropodes. Seule l'abondance des Gamasida diverge d'une parcelle à l'autre. Ces résultats nous permettent de considérer les « grandes parcelles » dans leur globalité, quelle que soit la modalité considérée. L'abondance des microarthropodes dans les grandes parcelles (11547 ind/m^2) est légèrement plus faible que celle rencontrée en milieu naturel représenté par des sols de forêts, de prairies et arables (17864 ind/m^2) (Cluzeau *et al.*, 2009). La communauté de microarthropodes rencontrée dans les grandes parcelles avec 71,5% de collemboles et 26% d'acariens se situe plus proche d'une communauté de type « sol agricole cultivé » avec 65% de collemboles et 32% d'acariens.

En ce qui concerne la communauté d'acariens, les abondances dans la modalité « confinement » (4590 ind/m^2) et la modalité « éponge végétale » (870 ind/m^2) sont plus faibles comparativement aux sols naturels (6754 ind/m^2). Les Gamasida sont surreprésentés dans les grandes parcelles avec 87,6% des acariens alors qu'en sol naturel, le taxon majoritaire est celui des Oribatida (Petersen, 1982). Ceci est d'autant

plus vrai pour la modalité « confinement », dont les Gamasida représentent 91,5% alors que la modalité « éponge végétale » seulement 74,0%.

Pour la communauté de collemboles, avec 8249 ind/m^2, l'abondance est inférieure à celle rencontrée dans les prairies (16253 ind/m^2) et les grandes cultures (12347 ind/m^2), mais plus proche d'une abondance rencontrée dans les forêts (9879 ind/m^2) (Cluzeau *et al.*, 2009). Le nombre d'espèces retrouvées (17) et les indices de diversité (H' et E) sont différents dans les grandes parcelles (17 ; 0,99 ; 0,54) de ceux retrouvés en sols naturels (6,14 ; 1,33 ; 0,6). L'ensemble des espèces n'est pas typique des sols anthropisés mais plutôt de sols naturels. Ce sont des espèces ubiquistes et/ou de compost, généralement pionnières. Enfin, la répartition des catégories écomorphologiques est très différente de celles rencontrées en milieu naturel avec une surreprésentation d'hémiédaphiques avec 90% hémi-, 7,5% d'eu- et 2,5% épiédaphiques contre 63% hémi-, 20% d'eu- et 18% épiédaphiques en prairies.

En conclusion, pour les grandes parcelles de sols construits, le système présente moins de microarthropodes qu'un système naturel, mais dont les proportions des grands groupes s'apparentent un système naturel de type « grande culture ». Par opposition, la répartition des sous-ordres des acariens et des catégories écomorphologiques de collemboles ne relève en rien d'un milieu naturel ou n'est pas en accord avec le type « grande culture » comme pourrait le laisser croire la répartition des groupes. La couche de compost en surface, ainsi que l'absence de végétation expliquent ainsi la prédominance des collemboles hémiédaphiques (Hopkin, 1997). Les collemboles euédaphiques ont un faible pouvoir de colonisation et les collemboles épiédaphiques étant quasi-absents, bien que pionniers, sont inféodés à la végétation qui n'est pas encore présente à t=8mois. Toutefois, aucune corrélation n'a pu être mise en évidence entre l'humidité et l'épaisseur de compost avec quelque groupe de faune que ce soit. On peut émettre l'hypothèse que ces deux facteurs ne sont pas limitant pour la croissance de la faune. On peut supposer que la prédominance de collemboles hémiédaphiques explique la prédominance des gamases, prédateurs de collemboles et agissant à la surface du compost (Koehler, 1997). Les grandes parcelles représentent ainsi à t=8mois un milieu ouvert et dynamique, occupé par des microarthropodes pionniers et de

compost, peu nombreux, peu diversifiés fonctionnellement (mais on note une grande diversité spécifique) inégalement répartis.

1.2 Etat des lieux de la colonisation d'un Technosol construit après 30 mois (parcelles lysimétriques)

1.2.1 La macrofaune

Une approche qualitative de la présence de macrofaune sur les sols construits des parcelles lysimétriques renseigne sur le pool d'espèces qui peut se développer sur ces Technosols. Les deux parcelles de sols construits présentent des espèces de vers épigés et endogés, des fragmenteurs de litière (diplopode et cloporte), des prédateurs (chilopode) qui ont pu être déterminés (Tableau 11). Elles comportent aussi une pléiade d'autres individus (araignées, insectes rampants, larves d'insectes, drosophiles, gastéropodes) dont les espèces n'ont pas pu être déterminées. La parcelle témoin contient la même diversité spécifique à l'exception des vers endogés et cloportes absents. Le traitement statistique des données n'a pas été réalisé du fait du nombre réduit de prélèvements (2 par modalité).

Tableau 11. Liste des espèces de macrofaune retrouvées dans les parcelles lysimètriques à t=30 mois.

Nom commun	*Ordre*	*Sous-ordre*	*Famille*	*Genre*	*Espèce*	*Catégorie fonctionnelle*
Vers de terre	*Haplotaxida*	*Lumbricina*	*Lumbricidae*	*Allobophora*	*chlorotica*	Endogé
				Eisenia	*eiseni*	Epigé
Cloporte	*Isopoda*	*Oniscidea*	*Porcellionidae*	*Porcellio*	*spinicornis*	Fragmenteur de litière
				Porcellio	*scaber*	Fragmenteur de litière
Chilopode	*Lithobiomorpha*			*Lithobies*		Prédateur
Diplopode	*Iuliformia*			*Iulida*	*iulida*	Fragmenteur de litière
					blaniulidoidea	

1.2.2 Les microarthropodes

Les deux modalités de construction de sol et la parcelle témoin présentent des abondances de microarthropodes différentes (Figure 37) qui sont en moyenne dans l'ordre décroissant de 101644 ind/m² pour la modalité Pap, 70746 ind/m² pour la

modalité PapCh et enfin 43014 ind/m² pour le témoin. Cette tendance se retrouve pour les abondances de collemboles, d'acariens et autres arthropodes. La communauté de microarthropodes est formée de 90% de collemboles, de 8% d'acariens et de 2% d'autres arthropodes pour la modalité Pap et de 91% de collemboles, de 7% d'acariens et de 2% d'autres arthropodes pour la modalité PapCh (Figure 37). Pour le témoin, la communauté est légèrement différente avec 82% de collemboles, 16% d'acariens et 2% d'autres arthropodes.

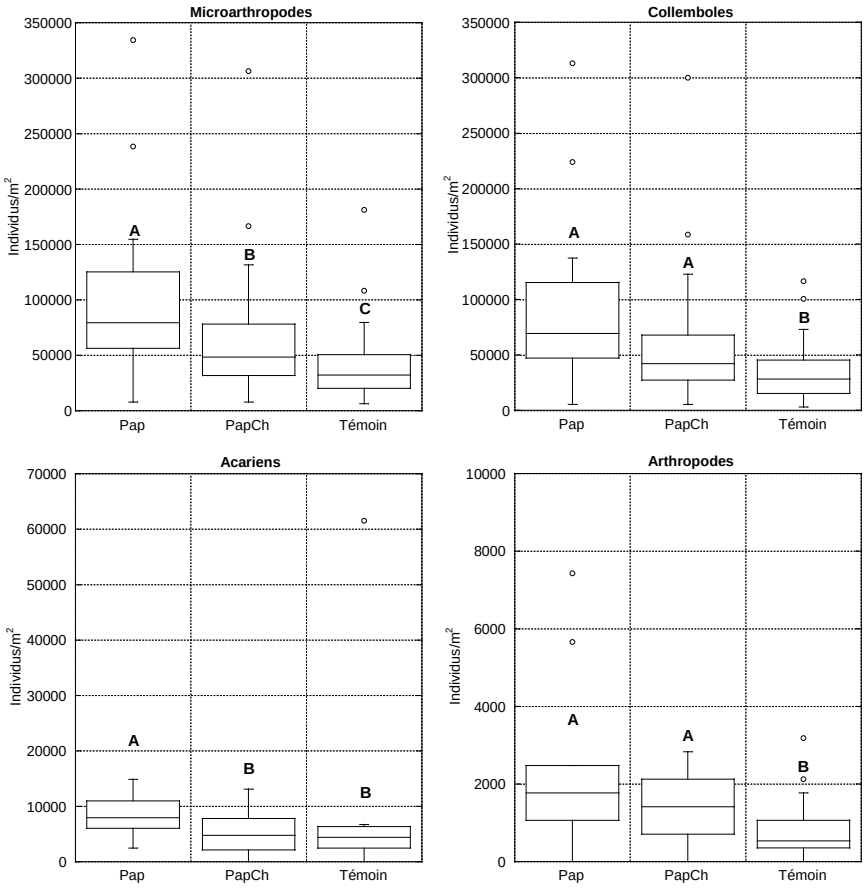


Figure 37. Description statistique des microarthropodes dans les Technosols construits dans les parcelles lysimétriques à t=30mois : en haut à gauche, box-plot de l'abondance de microarthropodes, en haut à droite box-plot de l'abondance de collemboles, en bas à gauche, box-plot de l'abondance d'acariens, en bas à droite, box-plot de l'abondance d'arthropodes. Les lettres indiquent les résultats des tests statistiques et post-hoc correspondants (Kruskal-Wallis, p<0,05 suivi de Conover-Iman ou ANOVA, p<0,05 suivi de Tukey). Pap=modalité « éponge végétale » ; PapCh=modalité « confinement ».

Les abondances d'acariens sont différentes (Figure 38). Elles sont en moyenne de 8330 ind/m² pour la modalité Pap, 4952 ind/m² pour la modalité PapCh et enfin 7004 ind/m² pour le témoin. Les acariens sont répartis de manière similaire dans les modalités Pap et

PapCh, avec respectivement 73 et 74% de Gamasida, 20 et 17% d'Actinedida et 8 et 9% d'Oribatida. Pour le témoin, la communauté est complètement différente avec de 46% de Gamasida, 49% d'Actinedida et 5% d'Oribatida. L'ordre des modalités observées pour l'abondance des acariens se retrouve chez les gamases (Figure 38). Ils représentent la classe la plus représentée dans les deux sols construits (Pap et Papch).

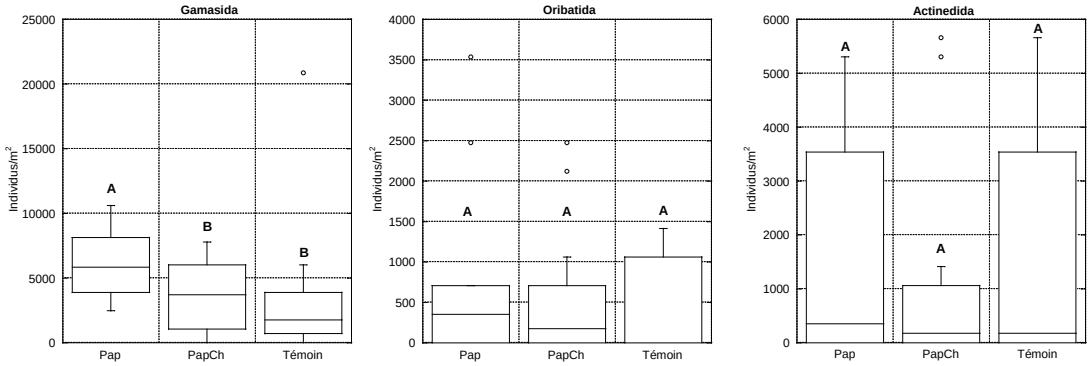


Figure 38. Description statistique des acariens dans les Technosols construits dans les parcelles lysimétriques à t=30mois : à gauche, box-plots des abondances de Gamasida, au centre d'Oribata et à droite d'Actinedida. Les lettres indiquent les résultats des tests statistiques et post-hoc correspondants (Kruskal-Wallis, p<0,05 suivi de Conover-Iman ou ANOVA, p<0,05 suivi de Tukey). Pap=modalité « éponge végétale » ; PapCh=modalité « confinement ».

L'abondance des collemboles est en moyenne de 91298 ind/m^2 pour la modalité Pap, 64379 ind/m^2 pour la modalité PapCh et de 35214 ind/m^2 pour le témoin (Figure 37). Les deux modalités de Technosols construits se détachent statistiquement du témoin.

On décompte une richesse de 8,55 taxons pour la modalité Pap, 7,50 pour la modalité PapCh et enfin 6,95 pour le témoin sans mettre en évidence de différences significatives (Figure 39). L'indice de Shannon-Weaver moyen est respectivement de 1,40, 1,66 et 1,88 (Figure 39). Enfin, l'équitabilité est de 0,48 et de 0,56 pour les modalités Pap et PapCh et de 0,70 dans le témoin (Figure 39).

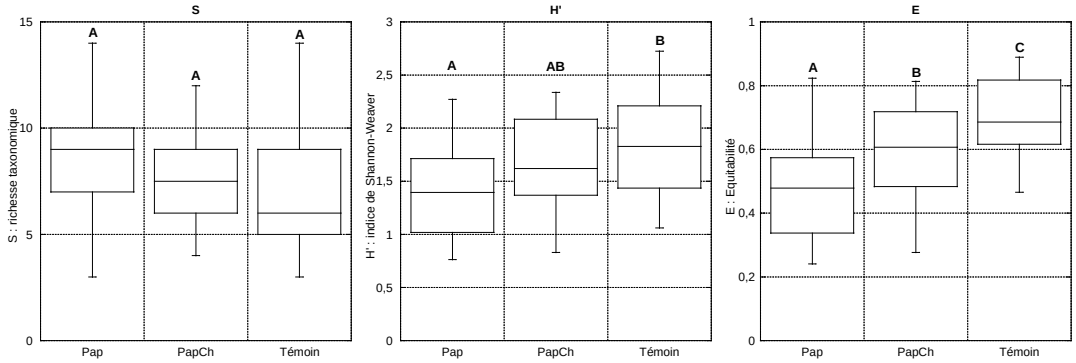


Figure 39. Box-plots des indices de diversité (S : richesse, H' : indice de Shannon-Weaver et E : équitabilité) calculés à partir des abondances des espèces de collemboles en fonction des modalités de construction de sols dans les parcelles lysimétriques à t=30mois. Les lettres indiquent les résultats des tests statistiques et post-hoc correspondants (Kruskal-Wallis, p<0,05 suivi de Conover-Iman ou ANOVA, p<0,05 suivi de Tukey). Pap=modalité « éponge végétale » ; PapCh=modalité « confinement ».

L'identification des collemboles a permis de mettre en évidence 25 espèces et 2 genres (Tableau 12). Une espèce n'a pas pu être déterminée. Les individus appartenant au genre *Orchesella* n'ont pas pu être identifiés jusqu'à l'espèce, sauf pour l'espèce *villosa*. Le genre *Mesaphorura* regroupe les espèces *macrochaeta* et *florae*, les autres individus n'ayant pas pu être déterminés jusqu'à l'espèce.

Tableau 12. Liste des espèces de collemboles retrouvés dans les Technosols construits des parcelles lysimétriques à t=30mois.

Famille	*Genre*	*Espèce*	*Catégorie Ecologique*
Isotomidae	*Cryptopygus*	*thermophilus*	hémiédaphique
	Cryptopygus	*bipunctatus*	hémiédaphique
	Isotoma	*viridis*	épiédaphique
	Desoria	*olivacea*	épiédaphique
	Parisotoma	*notabilis*	hémiédaphique
	Proisotoma	*minuta*	hémiédaphique
	Folsomia	*diplophthalma*	hémiédaphique
	Folsomia	*quadrioculata*	hémiédaphique
Entomobryidae	*Orchesella*	*sp*	épiédaphique
	Orchesella	*villosa*	épiédaphique
	Entomobrya	*lanuginosa*	épiédaphique
	Entomobrya	*maginata*	épiédaphique
	Heteromurus	*major*	hémiédaphique
	Lepidocyrtus	*lanuginosus*	hémiédaphique
	Lepidocyrtus	*lignorum*	hémiédaphique
	Lepidocyrtus	*cyaneus*	hémiédaphique
	Pseudosinella	*halophila*	hémiédaphique
	Pseudosinella	*pettersenis*	hémiédaphique
	Pseudosinella	*sexoculata*	hémiédaphique
	Sinella	*tenebricosa*	hémiédaphique
Tullbergiidae	*Mesaphorura*	*macrochaeta*	euédaphique
	Mesaphorura	*sp*	euédaphique
	Mesaphorura	*florae*	euédaphique
Hypogastruridae	*Ceratphysella*	*gibbosa*	hémiédaphique
	Hypogastura	*manubrialis*	hémiédaphique
	Willemia	*anophtalma*	euédaphique
Neelidae	*Megalothorax*	*minimus*	euédaphique
Katiannidae	*Sminthurinus*	*aureus*	hémiédaphique
Sminthurididae	*Sphaeridia*	*pumilis*	hémiédaphique

Pour les modalités de Technosols construits, l'abondance des microarthropodes est représentée par plus de 60% en abondance par une seule espèce : *Parisotoma notabilis*. Les trois premières espèces en abondance sont des collemboles hémi-édaphiques (Figure 40). Pour le témoin, le genre le plus représenté en abondance est *Mesaphorura* avec 30,1% du total (Figure 40).

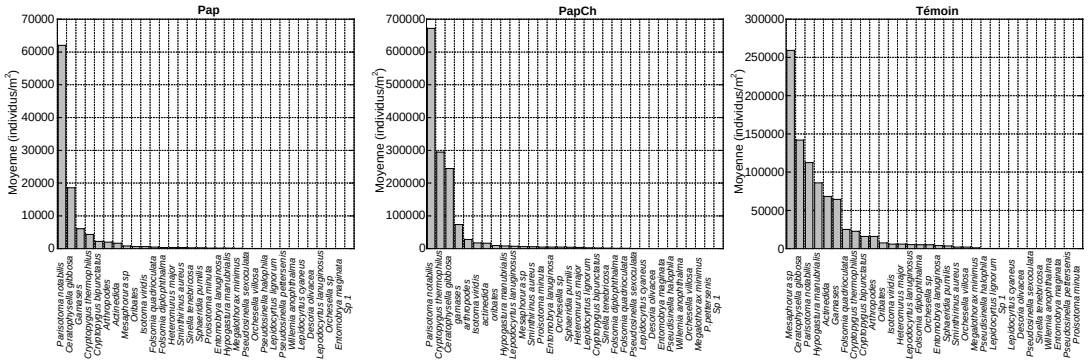


Figure 40. Moyenne décroissante des abondances des espèces de collemboles et des genres d'acariens en fonction des modalités de construction de sol dans les parcelles lysimétriques à t=30mois. Pap=modalité « éponge végétale » ; PapCh=modalité « confinement ».

L'approche fonctionnelle distingue clairement les deux modalités de Technosols construits du témoin avec 98 et 97 % d'hémiédaphiques, 1 et 2% d'épiédaphiques, et enfin 1 et 1% d'euédaphiques pour les modalités Pap et PapCh (Figure 41). Pour ce dernier, les proportions sont complètement différentes avec 61% d'hémiédaphiques, 2% d'épiédaphiques, et enfin 37% d'euédaphiques. Il est à noter des différences d'abondances des collemboles euédaphiques pour les deux modalités de Technosols construits (Figure 41).

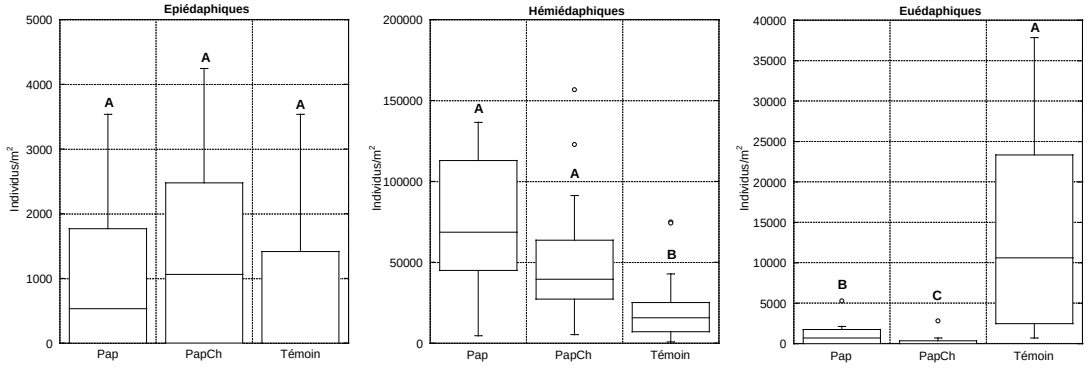


Figure 41. Description statistique des groupes fonctionnels de collemboles dans les Technosols construits dans les parcelles lysimétriques à t=30mois : à gauche, box-plots des abondances de collemboles épiédaphiques, au centre des collemboles hémiédaphiques et à droite des collemboles euédaphiques. Les lettres indiquent les résultats des tests statistiques et post-hoc correspondants (Kruskal-Wallis, p<0,05 suivi de Conover-Iman ou ANOVA, p<0,05 suivi de Tukey). Pap=modalité « éponge végétale » ; PapCh=modalité « confinement ».

Tableau 13. Synthèse des tests statistiques effectués sur l'ensemble des attributs de mesure de l'abondance des microarthropodes en fonction des modalités de Technosols (« éponge végétale » et « confinement » (Kruskal-Wallis ou ANOVA, p<0,05) à t=30 mois.

Paramètres	*Type de test*	*Valeur de F ou de K*	*P-value*	*Significativité*
Microarthropodes (ind/m²)	Kruskal-Wallis	13,68	0,001	**S**
Collemboles (ind/m²)	Kruskal-Wallis	13,04	0,001	**S**
Acariens (ind/m²)	Kruskal-Wallis	13,01	0,001	**S**
Autres arthropodes (ind/m²)	Kruskal-Wallis	10,86	0,004	**S**
Oribatida (ind/m²)	Kruskal-Wallis	2,28	0,319	NS
Gamasida (ind/m²)	Kruskal-Wallis	15,90	<0,001	**S**
Actinedida (ind/m²)	Kruskal-Wallis	1,10	0,578	NS
S	Kruskal-Wallis	4,44	0,109	NS
H'	ANOVA	5,83	0 ,005	**S**
E	ANOVA	12,92	< 0,0001	**S**
Epiédaphique (ind/m²)	Kruskal-Wallis	2,66	0,265	NS
Hémiédaphique (ind/m²)	Kruskal-Wallis	21,84	< 0,0001	**S**
Euédaphique (ind/m²)	Kruskal-Wallis	38,08	< 0,0001	**S**

Une analyse en composantes principales a été effectuée avec tous les attributs mesurés des microarthropodes. Les attributs des taxons des collemboles ont été limités aux 7 espèces les plus représentées. La projection des échantillons sur le plan principal de l'ACP montre une distinction nette entre les deux modalités de Technosol construits et le témoin. En s'attachant à la matrice des corrélations, on note des corrélations négatives entre *Mesaphorura*, abondant dans le témoin, et les euédaphiques, avec *Cryptopigus thermophilus*, abondants dans les sols construits. Finalement, de nombreuses corrélations positives sont observées entre certaines espèces de collemboles hémiédaphiques (*Paristoma notabilis, Ceratophysella gibbosa* et *Cryptopygus bipunctatus*) et le genre Gamases (Annexe VIII).

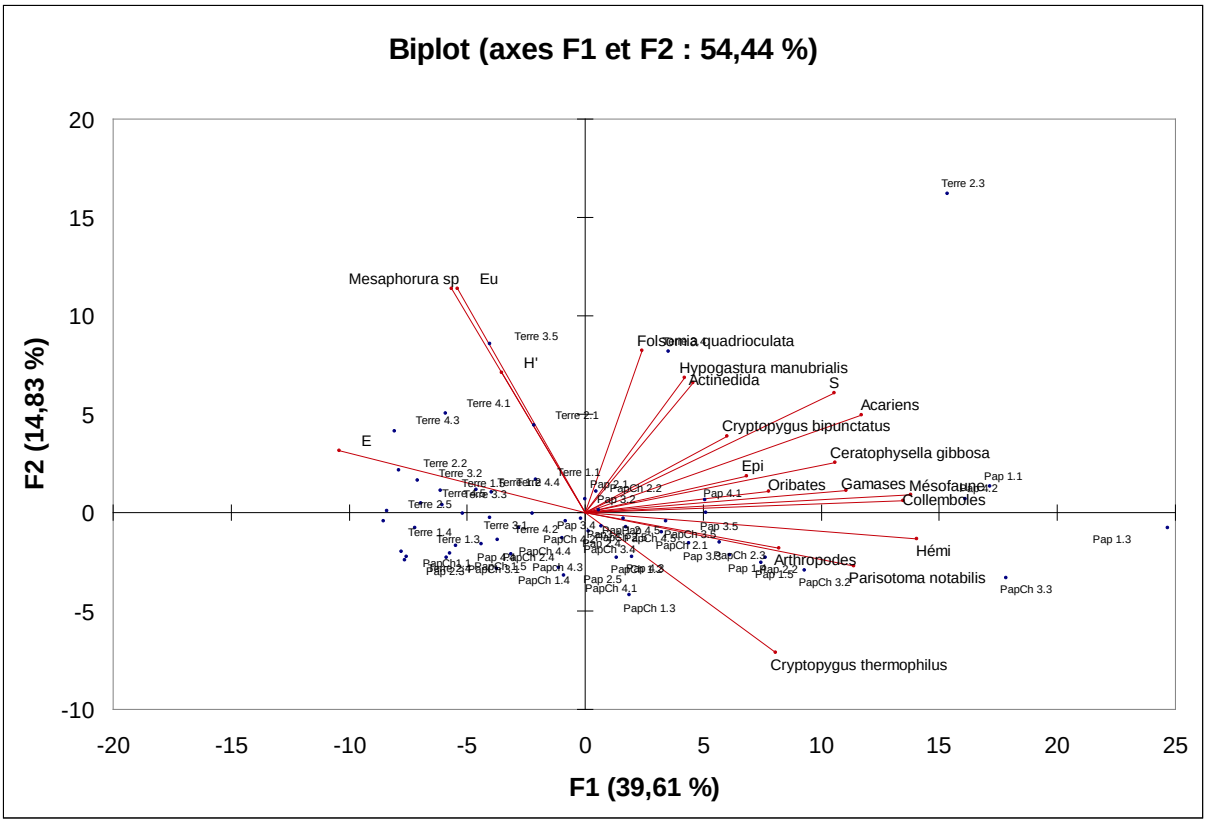


Figure 42. Représentation des axes des attributs de l'ACP effectuée avec tous les attributs mesurés des microarthropodes, excepté que les attributs des taxons des collemboles ont été limités aux 7 espèces les plus représentées dans les parcelles lysimétriques à t=30mois. Pap=modalité « éponge végétale » ; PapCh=modalité « confinement ».

1.2.3 Discussion

Il semblerait que le développement de végétation supérieure sur les modalités de Technosols construits par rapport au témoin ait permis un développement de macrofaune en quantité et en diversité. En effet, le sol témoin ne présente par exemple pas de cloportes ou bien de vers endogés. Ceci est sans doute la conséquence de la présence d'horizons contenant de la boue de papeterie qui augmente la réserve d'eau utile. Les cloportes ainsi que le ver endogé *Allobophora chlorotica* sont connus pour leur forte dépendance vis-à-vis de l'eau (Bouche, 1972; Løkke et Van Gestel, 1997). Dans les parcelles de Technosols construits, on observe l'ensemble des catégories fonctionnelles présentes dans les sols « naturels » exceptés les vers anéciques (absents également sur le témoin). Il est connu que les vers anéciques sont les derniers colonisateurs des sols néoformés (Baker *et al.*, 2006; Marinissen et Van den Bosch, 1992). Par ailleurs, la

présence des deux espèces de vers des parcelles lysimétriques peut être liée aux matériaux constitutifs du Technosol. Le ver de terre épigé *Eisenia eiseni*, est connu pour vivre dans les premiers centimètres du sol dans des horizons holorganiques comme le compost. Le ver de terre endogé *Allobophora chlorotica*, est connu pour vivre dans des couches profondes de sols hydromorphes (Bouche, 1972), comme la couche TIT/SPP dont la boue de papeterie peut présenter des teneurs en eau élevées. Ces considérations, doivent être prises avec précaution du fait du nombre réduits de prélèvements.

A t=30mois, on observe essentiellement des différences de communautés de microarthropodes entre les deux modalités de Technosols construits et le témoin, mais aussi quelques différences entre Technosols construits.

Les abondances de microarthropodes dans les modalités « éponge végétale » et « confinement » (101645 et 70746 ind/m^2) et celle du témoin (43013 ind/m^2) sont très supérieures aux moyennes d'abondances rencontrées classiquement en milieu naturel (17864 ind/m^2) (Cluzeau *et al.*, 2009). Les communautés de microarthropodes rencontrées dans les parcelles lysimétriques avec environ 90-91% de collemboles et 7-8% d'acariens et le témoin avec 82% de collemboles et 16% d'acariens se distinguent de systèmes naturels.

En ce qui concerne la communauté d'acariens, l'abondance dans la modalité « confinement » (8330 ind/m^2) et la modalité « éponge végétale » (4952 ind/m^2) sont dans les ordres de grandeur des sols naturels (6754 ind/m^2). Il en est de même avec le témoin (7004 ind/m^2). Les gamases sont surreprésentés dans les parcelles lysimétriques avec environ 73-74% des acariens, alors qu'en sol naturel, le taxon majoritaire est celui des Oribatida (Petersen, 1982) comme pour le témoin avec des proportions plus faibles (49% d'Oribatida et 46% d'Actinedida).

Pour la communauté de collemboles, les abondances dans les modalités « éponge végétale » (91299 ind/m^2), « confinement » (64379 ind/m^2) et témoin (35214 ind/m^2) sont largement supérieures à celle rencontrées dans le plus peuplé des milieux naturels : les prairies (16253 ind/m^2). Le nombre d'espèces retrouvées (20-22) est bien supérieur aux sols naturels (6,14) (Cluzeau *et al.*, 2009). Les diversités spécifiques (H') sont toutes supérieures (1,40 pour l'« éponge végétale » ; 1,61 pour le « confinement » et 1,88 pour le témoin) aux sols naturels (1,33). L'équitabilité (E) est inférieure pour les modalités de

Technosol construit (0,48 ; 0,56) par rapport aux sols naturels (0,6) mais supérieure pour le témoin (0,70). Les espèces qui sont les plus abondantes sont des espèces pionnières ou de compost. Toutefois, quelques espèces caractéristiques des milieux anthropiques sont apparues (e.g. *Pseudosinella halophila*, *Sinella tenebricosa*). Enfin, la répartition des catégories écomorphologiques est une nouvelle fois très différente de celles rencontrées en milieu naturel avec une surreprésentation d'hémiédaphiques avec 97-98% hémi-, 1% d'eu- et 1-2% épiédaphiques. Le témoin, se distingue également avec 2% hémi-, 37% d'eu- et 61% épiédaphiques.

En résumé, après 30 mois d'évolution depuis leur mise en place, les Technosols construits (parcelles lysimétriques) présentent des abondances en microarthropodes bien plus élevées qu'en systèmes naturels (facteur 6,65 à 8,80 pour l'abondance moyenne de microarthropodes). Ce sont les collemboles qui contribuent à cette forte abondance. La proportion des grands groupes, la répartition des sous-ordres des acariens et enfin les groupes écomorphologiques de collemboles ne s'apparentent pas à un système naturel. Les collemboles hémiédaphiques sont une nouvelle fois surreprésentés sans doute pour les mêmes raisons qu'après 8 mois d'évolution des Technosols construits (grandes parcelles). En amalgamant les données des parcelles de Technosol construit, des corrélations négatives ont été trouvées entre des collemboles hémiédaphiques (*Cryptopigus thermophilus*) et des collemboles euédaphiques. Ceci laisse penser que les collemboles euédaphiques ne peuvent pas croître à l'endroit où sont présents les hémiédaphiques. Par ailleurs, des corrélations entre espèces de collemboles hémiédaphiques de compost (*Paristoma notabilis, Ceratophysella gibbosa* et *Cryptopygus bipunctatus*) et les Gamases viennent confirmer la relation proie-prédateur des gamases pour ces collemboles. Il existe des différences entre les deux modalités de Technosols à savoir une plus grande abondance de microarthropodes, d'acariens dont les gamases, d'euédaphiques et une moins bonne diversité spécifique pour la modalité « éponge végétale » par rapport au « confinement ». La modalité témoin se démarque significativement des deux modalités de construction de sols avec un système différent qui lui-même ne s'apparente pas à un système naturel. Les parcelles lysimétriques représentent aussi un milieu ouvert, avec des microarthropodes abondants, toujours spécialisés fonctionnellement et divers sur le plan taxonomique. Les espèces sont mal réparties et les microarthropodes sont caractérisés par une prépondérance de Gamasida

et de collemboles hémiédaphiques et ce d'autant plus sur la modalité « éponge végétale » que sur la modalité « confinement ». Cette différence pourrait s'expliquer par la nature de l'horizon le plus profond du sol construit qui dans la modalité « éponge végétale » a un rôle de réservoir d'eau qui pourrait être mise à disposition de la faune d'une manière plus intense que dans la modalité « confinement ».

1.3 Conclusion sur les études *in situ*

Les résultats obtenus à différentes échelles de temps permettent de comparer la dynamique de la faune sur les profils de Technosols construits *in situ*. Concernant la macrofaune, on est passé d'un système initial avec une absence totale de macrofaune, à un système présentant une communauté proche qualitativement de celle observée en sol naturel. De nombreux groupes fonctionnels sont présents, exceptés le groupe des vers de terre anéciques. Cela confirme les résultats de la littérature (Baker *et al.*, 2006; Marinissen et Van den Bosch, 1992) selon lesquels les vers anéciques seraient les vers les moins aptes à coloniser horizontalement des zones vierges d'activité biologique. Ceci est en lien avec leurs faibles capacités de mouvements et leur reproduction de type K. En ce qui concerne les microarthropodes, une très forte augmentation de l'abondance globale entre 8 et 30 mois d'évolution des Technosols construits est observée. Ce phénomène est accentué en proportion pour les collemboles. Malgré l'apparition de la végétation, les collemboles hémiédaphiques sont encore plus nombreux en proportion. On attribue cette surreprésentation des hémiédaphiques par la présence de la couche épaisse de compost qui constitue un milieu favorable pour cette catégorie écologique. Par ailleurs, cette augmentation de collemboles hémiédaphiques s'accompagne d'une augmentation de l'abondance des Gamases, prédateurs de collemboles à la surface du sol, même s'ils diminuent en proportion d'acariens. Il semblerait ainsi que la communauté de microarthropodes présente soit très corrélée à au procédé de construction du sol avec sa couche de compost de surface. Ceci est sans doute consécutif à l'abondance des ressources qui ne limitent aucun taxon représenté *in situ*.

En résumé, les Technosols construits ont subi une colonisation centripète par des microarthropodes spécialisés vis-à-vis du compost. Même si le nombre d'espèces augmente, elles sont toutes spécialisées, typiques de composts et/ou pionnières. Les

espèces de la macrofaune sont intimement liées aux caractéristiques des matériaux parents. L'influence du filtre abiotique semble prédominante dans la réponse de la faune du sol dans le contexte du Technosol construit *in situ*. Ceci est d'autant plus marqué pour les microarthropodes pour lesquels le Technosol semble présenter une ressource non limitante pour les communautés qui ont réussi à s'implanter. En complément, comme dans des systèmes naturels, des interactions biotiques ont été observées, essentiellement des relations proies-prédateurs et des exclusions de certains groupes écomorphologiques par d'autres (*e.g.* euédaphiques et hémiédaphiques dans les grandes parcelles).

2 Etude des effets du procédé de construction du Technosol sur les paramètres de vie de la faune du sol en conditions contrôlées

2.1 La survie : variations de biomasse[1]

2.1.1 Effets des matériaux en mélange avec du sol OCDE (sol modèle en écotoxicologie) sur la biomasse d'*Eisenia fœtida*

Les résultats de la variation de biomasse à 28 jours de l'expérience « survie » présentent des tendances nettes (Figure 43). Les modalités riches en sol OCDE (>50%) présentent des fortes pertes de biomasse (de -18,13 à -21,54%) par rapport aux autres modalités. En deçà de 50% de TIT/SPP et de 25% de CDV en mélange avec du sol OCDE, la perte de biomasse est proche de celle de la modalité 100% sol OCDE. Lorsque la teneur en sol OCDE est inférieure à 50%, la perte de biomasse est moins élevée pour le CDV que pour

[1] Les variations de biomasse ont été mesurées en considérant qu'un ver absent ou mort a une biomasse de 0g. Cette mesure nous permet, avec un indicateur unique, de renseigner à la fois les effets létaux et sub-létaux du sol sur le ver. Cette approche a été privilégiée du fait de la faible mortalité rencontrée dans nos expériences. Par exemple, la mortalité au cours de l'expérience I (2%), non inféodée à une modalité est également répartie, ce qui nous fait penser qu'elle est due essentiellement à la manipulation des vers de terre par l'expérimentateur.

le TIT/SPP (-3,19 à -13%), à quantité égale. Enfin, la modalité 100% CDV présente une variation positive de biomasse (9,18 %). Le test statistique vient confirmer ces tendances (Figure 43).

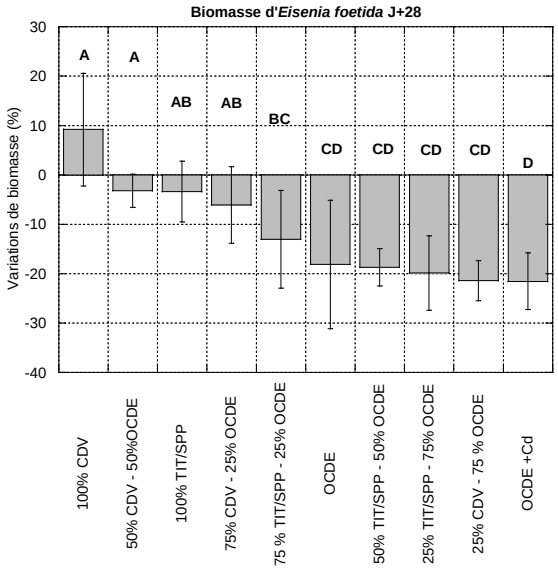


Figure 43. Variations de biomasse (moyennes et écart-types) d'*Eisenia fœtida *à t=28 jours en fonction des modalités contenant les matériaux constitutifs du sol construit, expérience « survie ». Les lettres indiquent les résultats du test statistique et post-hoc (Kruskal-Wallis, p<0,0004 suivi de Conover-Iman). TIT/SPP=terre industrielle traitée et sous produit papetier ; CDV=compost de déchet vert ; Cd=Cadmium à 50mg/kg sol sec.

2.1.2 Effets du procédé de construction du Technosol construit sur la biomasse de *Lumbricus terrestris*

Le test de Kruskal-Wallis pour la variation de biomasse des vers à 7 jours, dévoile trois groupes significativement distincts (Figure 44). Les modalités avec plus de 50% de compost entraînent une perte évidente de biomasse du ver de terre (de -30,5% à -34,25%). Par ailleurs, la modalité 100% TIT/SPP a un effet positif visible sur la variation de biomasse (+14,12%) tandis que la modalité 25% CDV - 75% TIT/SPP conduit à une légère baisse (-2,53%).

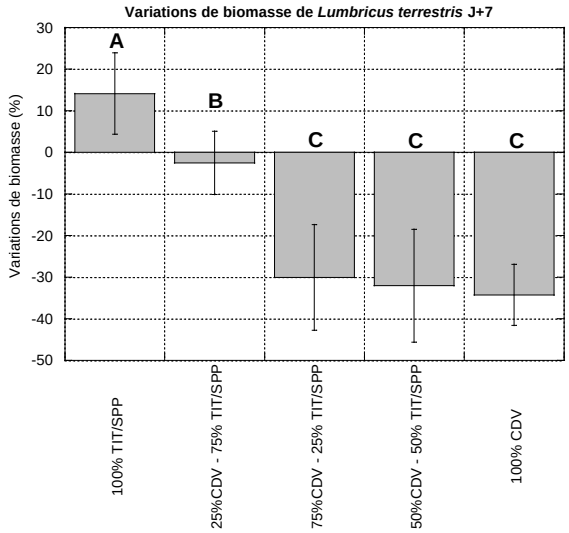


Figure 44. Variations de biomasse (moyennes et écart-types) de* Lumbricus terrestris *à t=7 jours en fonction des modalités de construction de sol construit, expérience « comportement ». Les lettres indiquent les résultats du test statistique et post-hoc (Kruskal-Wallis, p<0,0001 suivi de Conover-Iman). TIT/SPP=terre industrielle traitée et sous produit papetier ; CDV=compost de déchet vert.

A 14 jours, deux groupes significatifs se distinguent (Figure 45, à gauche). Le 100% CDV montre une variation de biomasse négative (-46,26%). A l'opposé, les modalités avec 50% et 25% de compost sont associées à une faible perte (-0,08%) et à un gain (+6,75%) respectivement. Entre les deux, figurent la modalité 100% TIT/SPP et la modalité 75% CDV - 25% TIT/SPP avec des pertes faibles à fortes (-1,98 et -27,74%). Globalement, les modalités avec une forte teneur en compost provoquent plutôt une perte de biomasse, tandis que celles avec une teneur faible ou nulle sont associées avec une perte légère ou un gain. Après 30 jours (Figure 45, à droite), seule la modalité 25%CDV-75%TIT/SPP se détache statistiquement en affichant une variation de biomasse positive (+8,54%). La modalité 100% CDV présente la plus forte perte de biomasse observée (-85,44%). Les modalités restantes présentent des valeurs intermédiaires avec des pertes de biomasse, allant de -35,41% à 15,84%.

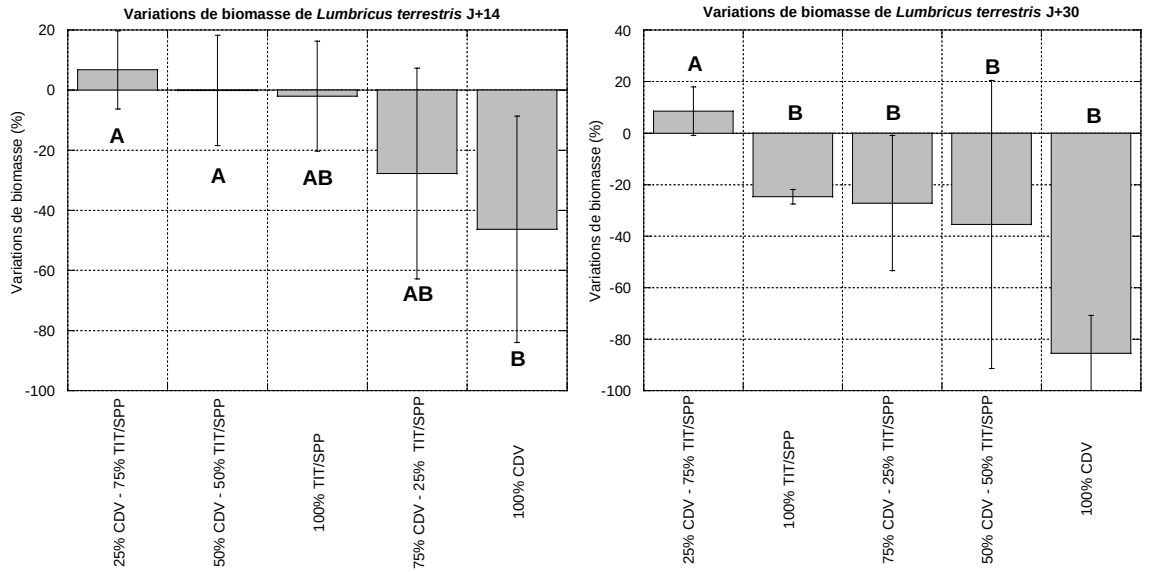


Figure 45. Variations de biomasse (moyennes et écarts-types) de* Lumbricus terrestris *à t=7 jours et à t=30 jours en fonction des modalités de construction de sol construit, expérience « comportement ». Les lettres indiquent les résultats des tests statistiques et post-hoc (Kruskal-Wallis, p<0,098 et p<0,048, suivi de Conover-Iman). TIT/SPP=terre industrielle traitée et sous produit papetier ; CDV=compost de déchet vert.

2.2 La reproduction

2.2.1 Effets des matériaux du Technosol construit en mélange avec du sol OCDE sur la production de cocons *d'Eisenia fœtida*

Le test de Kruskal-Wallis pour la production de cocons à 56 jours de l'expérience « survie » met en évidence deux groupes significativement distincts (Figure 46). Les modalités OCDE présentent un nombre de cocons produits faibles (3,4 à 5). Les autres modalités contenant du CDV et du TIT/SPP arborent un nombre de cocons produits plus élevé (de 12,8 à 21,2) avec des valeurs sensiblement plus élevées pour les modalités contenant du CDV. Néanmoins, la distribution des données conduit à de forts écart-types pour ces quatre modalités, qui ne permettent pas de mettre en évidence de différences significatives.

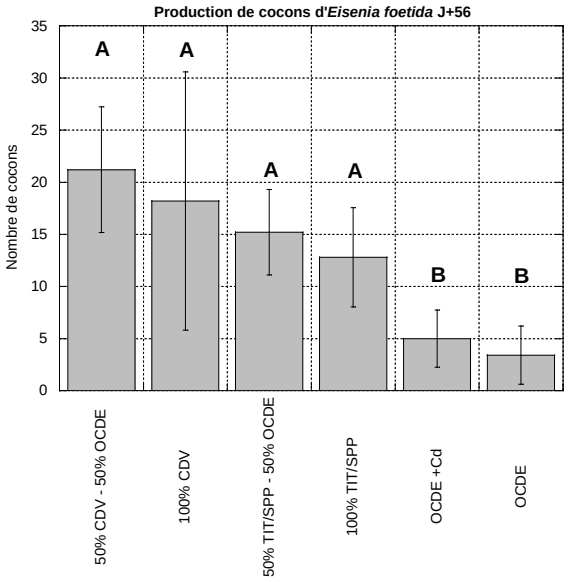


Figure 46. Nombre de cocons produits (moyennes et écart-types) par* Eisenia fœtida *à t=56 jours en fonction des modalités contenant les matériaux constitutifs du sol construit, expérience « survie ». Les lettres indiquent les résultats du test statistique et post-hoc (Kruskal-Wallis, p=0,003 suivi de Conover-Iman), TIT/SPP=terre industrielle traitée et sous produit papetier ; CDV=compost de déchet vert ; Cd=Cadmium à 50mg/kg sol sec.

2.2.2 Effets des matériaux du Technosol construit en mélange avec du sol OCDE sur la production de juvéniles d'*Eisenia fœtida*

La production de juvéniles à 56 jours pour l'expérience « survie » présente des différences significatives (Figure 47). Les modalités contenant du CDV se détachent avec un nombre de juvéniles élevé (87,4 à 138,6). La modalité 100% CDV se détache visuellement de la modalité 50% CDV – 50% OCDE sans pour autant aboutir à une différence significative. Il s'en suit les modalités 50 % TIT/SPP – 50% OCDE et 100% TIT/SPP qui présentent des productions de juvéniles moyennes et significativement différentes. Enfin, comme pour la production de cocons, les modalités OCDE présentent de très faibles productions de juvéniles (<5,8).

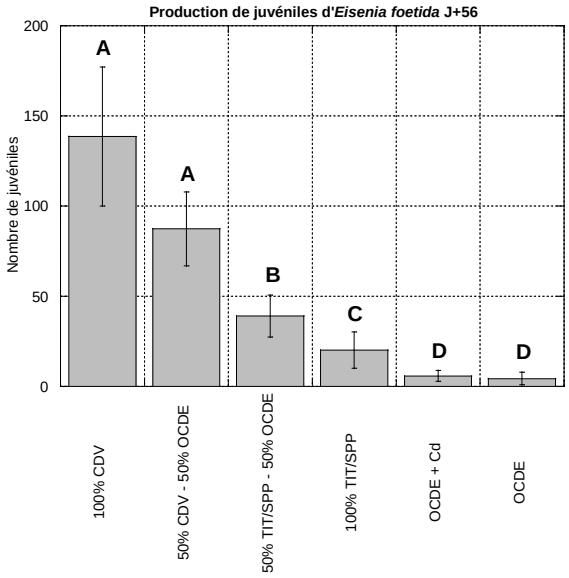


Figure 47. Nombre de juvéniles produits (moyennes et écart-types) par* Eisenia fœtida *à t=56 jours en fonction des modalités contenant les matériaux constitutifs du sol construit, expérience « survie ». Les lettres indiquent les résultats du test statistique et post-hoc (Kruskal-Wallis, p<0,0001 suivi de Conover-Iman). TIT/SPP=terre industrielle traitée et sous produit papetier ; CDV=compost de déchet vert ; Cd=Cadmium à 50mg/kg sol sec.

2.3 Discussion

Les variations de production de biomasse des deux vers sont fortement influencées par les modalités de construction de sol : nature des matériaux et proportion en mélange avec du sol OCDE pour *Eisenia fœtida* ; nature des matériaux, proportions pour une formulation en horizons pour *L. terrestris*. Pour *Eisenia fœtida*, le CDV est un matériau favorable à la croissance tandis que le TIT/SPP entraîne une faible diminution de biomasse. Le sol OCDE, qu'il soit contaminé ou pas en cadmium représente un matériau pauvre en matière organique et engendre donc de forte pertes de biomasse sur des durées de plus de deux semaines (Spurgeon *et al.*, 1994). Pour *L. terrestris*, les tendances ne sont pas aussi nettes que pour le ver *Eisenia fœtida.* Le TIT/SPP permet un gain de biomasse à court terme. Les modalités avec de fortes teneurs en CDV conduisent à de fortes décroissances de biomasse. Enfin, la modalité 25% CDV-75% TIT/SPP est la seule à assurer une croissance de biomasse à long terme.

La variation de biomasse des vers de terre est considérée comme un indicateur de leur santé générale (Capowiez *et al.*, 2005). Cette variation de biomasse est explicitée par de

nombreux facteurs abiotiques et biotiques. Dans des conditions expérimentales de cosmes de laboratoire où les facteurs biotiques sont maîtrisés, le C/N des matériaux explique souvent en grande partie les résultats obtenus car il contrôle les taux d'ingestion du ver (Curry et Schmidt, 2007; Schönholzer *et al.*, 1998). Par ailleurs, l'appétence de la litière consommée est en général négativement corrélée à la teneur en polyphénols (Hendriksen, 1990).

Pour *Eisenia fœtida*, l'ajout de matériaux technogéniques au sol OCDE au delà de 50% en teneur engendre des pertes de biomasse beaucoup moins prononcées. Ceci prouve la bonne qualité trophique des deux matériaux constitutifs des Technosols construits. L'effet est visible à plus faible dose pour le CDV que pour le TIT/SPP. Ceci dénote une meilleure qualité trophique pour le CDV. Cette hiérarchie est en accord avec le C/N des deux matériaux, puisque le CDV possède un C/N égal à 20,4 alors que celui du TIT/SPP est largement supérieur à 27,5. Ainsi, en mélange avec le sol OCDE, le CDV, du fait de sa qualité trophique plus élevée, compenserait à plus faible dose le manque de matière organique du sol OCDE que ne le ferait le TIT/SPP. Le CDV est d'ailleurs le seul matériau à engendrer une croissance positive en cosme, preuve de sa qualité trophique indéniable. Le TIT/SPP quant à lui, n'est pas un matériau à effet létal pour le ver de terre. Toutefois, sa qualité trophique est moindre. Bien que renfermant de la boue de papeterie, dont le bénéfice sur la croissance a été largement prouvé (Butt, 1993; Piearce et George, 1998; Piearce *et al.*, 2003), le mélange contient 50% de terre industrielle minérale qui dilue cette matière organique qui est alors moins disponible et/ou assimilable par le ver.

Pour *L. terrestris*, la modalité 100% TIT/SPP, avec son C/N élevé, permet un gain temporaire de biomasse avant de décroître rapidement à 14 puis 30 jours. En effet, comme précisé dans la partie précédente, la faible qualité trophique du TIT/SPP assure les besoins trophiques du ver dans un premier temps avant que celui-ci n'épuise le matériau en matière organique assimilable. Pour le CDV, à l'opposé des observations sur *Eisenia fœtida*, la modalité 100% CDV conduit dès 7 jours à de fortes pertes de biomasse. Il en est de même pour les modalités riches en CDV (50 et 75%). Cette forte perte de biomasse est en grande partie due à une mortalité élevée. Ainsi, l'effet positif du TIT/SPP sur la croissance à court terme n'arrive pas à contrebalancer l'effet négatif du CDV à de

telles proportions de compost dans ces modalités. Par ailleurs, l'effet négatif potentiel des polyphénols du compost, additionné de l'effet négatif à long terme du TIT/SPP, ne suffit pas à expliquer une telle perte de biomasse si rapide dans le temps. En effet et à l'opposé, la modalité 25%CDV-75%TIT/SPP, cible d'une perte de biomasse toute relative par rapport aux modalités renfermant du CDV à fortes doses à 7 jours, devient la seule modalité à engendrer une croissance positive à 14 et 30 jours. Qu'elle en est l'explication ? Il est connu que la biomasse des vers est fortement influencée par la teneur en eau du sol (Kretzschmar et Bruchou, 1991). Or dans cette expérience, le TIT/SPP contient plus d'eau disponible que le CDV. Le CDV en surface, malgré sa bonne qualité trophique, pourrait ainsi être responsable de la forte mortalité observée. Dans les modalités avec les deux matériaux, le ver présenterait des pertes de biomasse moins importante voir un gain de biomasse (modalité 25%CDV-75%TIT/SPP) par le fait que le TIT/SPP constitue un réservoir d'eau en profondeur. Cette hypothèse sera à confirmer.

La reproduction d'*Eisenia fœtida* est fortement influencée par les modalités. La nature des matériaux et leur proportion en mélange avec le sol OCDE en sont responsables. La distinction entre les cocons vides et les cocons pleins n'a pas été effectuée. Un cocon plein peut libérer des juvéniles tandis qu'un cocon vide se décompose rapidement. Ainsi, le nombre de cocons et le nombre de juvéniles doivent être appréhendés comme deux mesures distinctes de la reproduction des vers. Le nombre de cocons renseigne sur une dynamique instantanée de reproduction, tandis que le nombre de juvéniles renseigne sur la résultante de l'éclosion des cocons et intègre donc la reproduction dans le temps. Trois typologies de reproduction sont discernées :

- un groupe pour lequel la production de cocons ainsi que la production de juvéniles sont faibles : modalités OCDE et OCDE+Cd. Ces matériaux sont défavorables à la reproduction des vers.
- un groupe où la production de cocons et le nombre de juvéniles sont moyens : les modalités TIT/SPP. Ces modalités ont alors une dynamique stable de reproduction et la reproduction reste faible. Les fluctuations dans ces modalités sont difficilement interprétables, puisque la modalité 50%TIT/SPP-50%OCDE présente une meilleure reproduction que la modalité 100% TIT/SPP. Dans ces mélanges, les interactions sont complexes et ont des effets mitigés sur la reproduction.

- Enfin, un groupe où la production de cocons et le nombre de juvéniles sont élevés : les modalités CDV. On a dans ce cas des fluctuations de reproduction qui semblent corrélées positivement à la teneur en compost et donc au pourcentage de matière organique.

Le compost est un milieu extrêmement favorable à la reproduction d'*Eisenia fœtida*. Le TIT/SPP, quant à lui n'est pas un milieu inhibiteur de la reproduction ; bien que celle-ci reste faible dans ce milieu.

2.4 Conclusions

Nous avons pu mettre en évidence que les deux matériaux parents ne sont pas des milieux hostiles pour la faune du sol. Le CDV semble être un matériau de qualité trophique élevée (comme les analyses le laissaient supposer) qui constitue un support viable à long terme pour la croissance et la reproduction de la faune du sol, à condition d'être humide. Le TIT/SPP est un matériau de moins bonne qualité trophique qui permet une croissance à court-terme en permettant seulement une faible reproduction. La question est de savoir si la nouvelle génération pourra se reproduire avant de disparaître. Il constitue en tout cas un excellent palliatif pour le ver en cas de stress du milieu environnant (*e.g.* réservoir en eau lors de stress hydrique). Mais plus que des conclusions sur l'effet de la nature des matériaux sur la faune qui existent en partie dans la littérature, nous avons pu mettre en évidence l'effet du procédé de construction du Technosol sur la croissance des vers. En effet, il joue un rôle primordial dans la survie de la faune puisqu'il conditionne :

- la nature des matériaux parents qui imposent :

  la nature de la qualité trophique des horizons

  la nature du comportement hydrique des horizons

- la proportion des matériaux parents qui imposent :

  la quantité de ressources trophiques du sol

  la quantité d'eau disponible du sol

- la formulation (organisation, localisation) des matériaux parents qui imposent :

la dynamique des ressources trophiques du sol

la dynamique hydrique du sol

3 Effets des interactions biotiques entre groupes fonctionnels en conditions contrôlées

L'expérience « diversité » (*cf.* 2.2.3) a permis d'observer l'évolution des biomasses de faune pendant 75 jours en fonction des combinaisons faunistiques en se basant sur des combinaisons de groupes fonctionnels.

3.1 Biomasse des ingénieurs de l'écosystème

Aucune tendance nette n'est observée pour les deux espèces de vers (Figure 48). Les variations de biomasse sont toujours négatives : de -20 à -44,14% pour *A. caliginosa* et de -12,77 à -35% pour *L. terrestris*. La variabilité des données de biomasse conduit à un écart-type élevé qui ne révèle aucune différence statistique (Kruskal-wallis, $p<0,05$) selon les modalités de faune pour les variations de biomasse d'*A. caliginosa* (Figure 48, à gauche). Pour *A. caliginosa*, on observe que la modalité AcLtPs (*A. caliginosa*, *L. terrestris* et *P. scaber*) (-44,14%) conduit à une perte de biomasse forte contrairement à la modalité AcFfPs avec la plus faible perte (-20%). Le reste des modalités présente une moyenne similaire. Pour *L. terrestris*, les modalités contenant *A. caliginosa* se détachent très légèrement avec des pertes de biomasse un peu plus faibles (de -26,64% à 12,77% respectivement) même si seule la modalité AcLtFfPs se détache significativement (Figure 48, à droite). A l'opposé, les modalités sans *A. caliginosa* mais avec *P. scaber* présentent les deux valeurs les plus basses, notamment celle avec *F. fimetaria* et *P. scaber*, les deux décomposeurs (de -33,7% à -34,99%). Seule la modalité LtFfPs se détache statistiquement. Des tests statistiques basés sur des groupes contenant *A. caliginosa* et d'autres contenants *L. terrestris* et *P. scaber* sans *A. caliginosa* ont été réalisés mais aucune différence statistique n'a été observée.

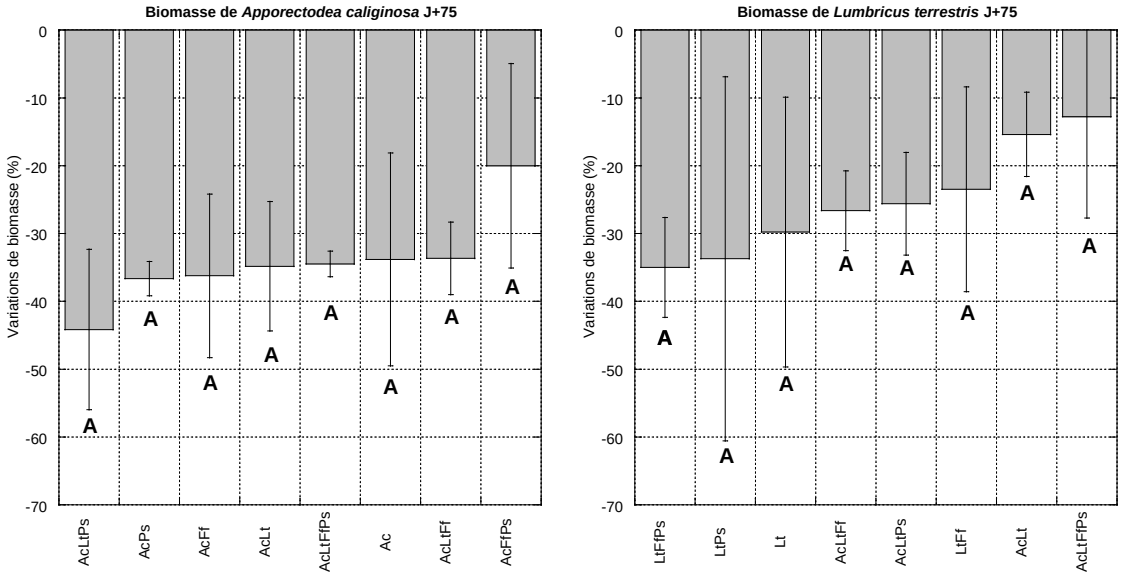


Figure 48. Variations de biomasse (moyennes et écarts-types) d'*Apporectodea caliginosa *et de* Lumbricus terrestris *à t=75 jours dans le Technosol construit de l'expérience « diversité ». Les lettres indiquent les résultats des tests statistiques et post-hoc (Kruskal-Wallis, p=0,998 et p=0,443, suivi de Conover-Iman). Ac :* Apporectodea caliginosa *; Lt :* Lumbricus terrestris *; Ps :* Porcellio scaber *; Ff :* Folsomia fimetaria*.

3.2 Biomasse des macrofragmenteurs

Les variations de biomasse pour *P. scaber* sont positives. Des tendances sont observables (Figure 49). La modalité monospécifique *P. scaber* présente le gain de biomasse le plus fort (+25,02%) alors que la modalité renfermant les deux espèces de décomposeurs et *L. terrestris* (qui présentent des comportements de décomposeurs bien qu'ingénieur de l'écosystème) a le gain le plus faible (+3,37%). La modalité LtPs présente aussi un gain faible (7,67%). Par ailleurs, les modalités comprenant *A. caliginosa* semblent engendrer des variations positives plus fortes chez *P. scaber*. La variabilité des données de biomasse conduit à un écart-type élevé qui ne révèle aucune différence statistique (Kruskal-wallis, $p<0,05$) selon les modalités de faune. Un test de Mann-Whitney en excluant la modalité monospécifique *P. scaber* avec deux groupes, l'un avec *A. caliginosa* et l'autre sans, montre une différence significative (Figure 50).

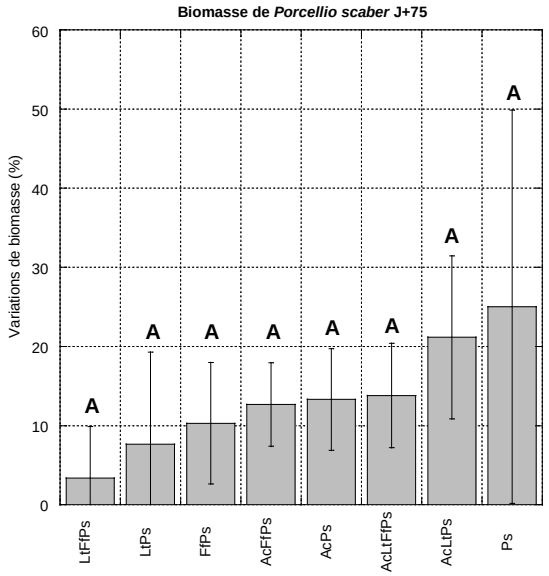


Figure 49. Variations de biomasse (moyennes et écart-types) de* Porcellio scaber *à t=75 jours dans le Technosol construit de l'expérience « diversité ». Les lettres indiquent les résultats du test statistique et post-hoc (Kruskal-Wallis, p=0,0989 suivi de Conover-Iman). Ac :* Apporectodea caliginosa *; Lt :* Lumbricus terrestris *; Ps :* Porcellio sca*ber ; Ff :* Folsomia fimetaria*.

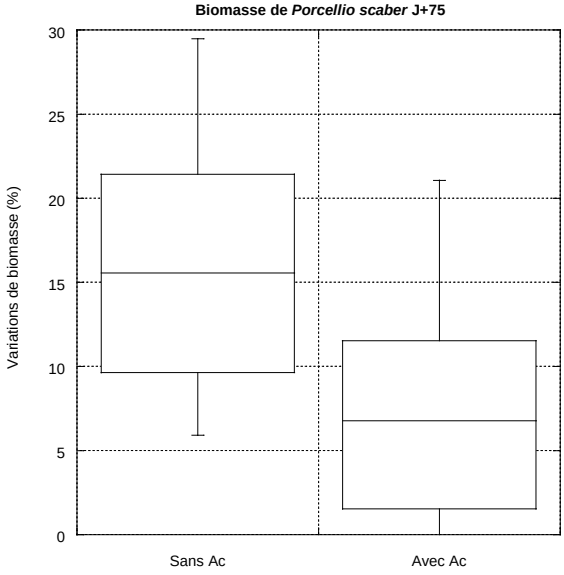


Figure 50. Variations de biomasse (box-plots) de* Porcellio scaber *(Mann-Whitney, p=0,047), à t=75 jours dans le Technosol construit de l'expérience « diversité » en excluant la modalité Ps. Avec Ac = modalités avec* Apporectodea caliginosa *; Sans Lt = modalités sans* Apporectodea caliginosa*.

3.3 Biomasse des microfragmenteurs

La production de biomasse des collemboles dépend clairement de l'horizon considéré (Figure 51). Elle s'échelonne en moyenne de 0 à 515253 microg de poids sec.kg^{-1} de sol

sec pour l'horizon de CDV, de 0 à 4284 microg de poids sec.kg^{-1} de sol sec dans l'horizon A et de 0 à 805 microg de poids sec.kg^{-1} de sol sec dans l'horizon B. Les tests statistiques ne montrent pas de différences significatives pour la biomasse de *F. fimetaria* en ce qui concerne les horizons de CDV et A. On peut ainsi dire que pour les horizons CDV et A (Figure 51, en haut), la biomasse de *F. fimetaria* ne dépend pas de la présence ou de l'absence d'autres groupes fonctionnels. Par opposition, pour l'horizon B (Figure 51, en bas), les différences statistiques sont présentes et correspondent à une logique biologique. En effet, les modalités présentant *L. terrestris*, exceptée la modalité avec toutes les modalités de faune, montrent des biomasses de collemboles plus élevées allant de 265 à 805 microg poids sec.kg^{-1} de sol sec. Un test de Mann-Whitney avec deux groupes, l'un avec *L. terrestris* et l'autre sans montre une différence significative (Figure 52).

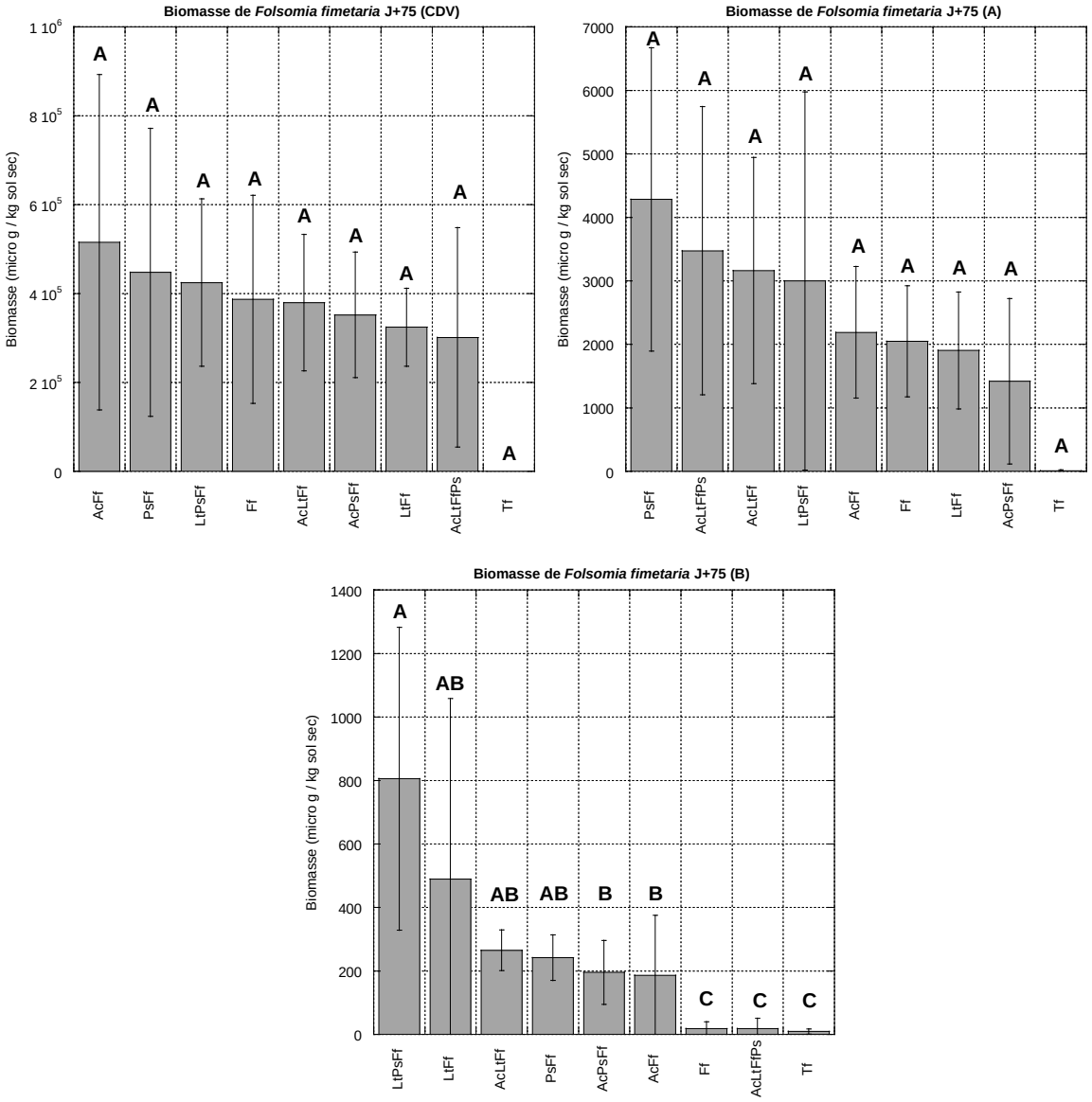


Figure 51. Variations de biomasse (moyennes et écart-types) de* Folsomia fimetaria *dans l'horizon CDV, A et B à t=75 jours dans le Technosol construit de l'expérience « diversité ». Les lettres indiquent les résultats des tests statistiques et post-hoc (Kruskal-Wallis, p=0,334, p=0,209 et p<0,008 suivi de Conover-Iman). Ac :* Apporectodea caliginosa *; Lt :* Lumbricus terrestris *; Ps :* Porcellio scaber *; Ff :* Folsomia fimetaria *; Tf : témoin final.

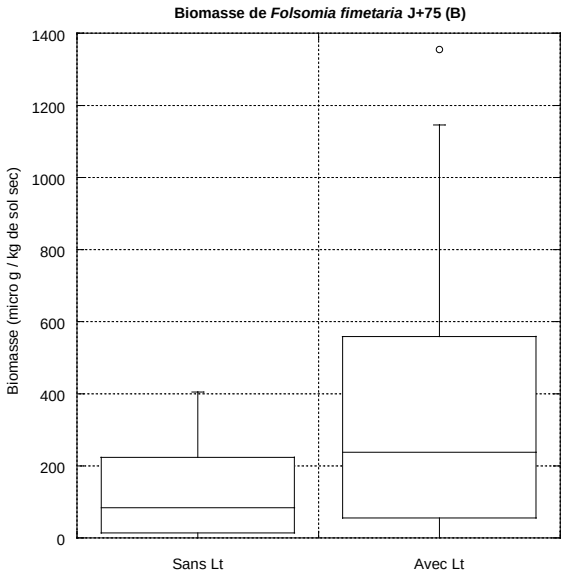


***Figure 52. Variations de biomasse (box-plots) de* Folsomia fimetaria *dans l'horizon B (Mann-Whitney, p=0,002), à t=75 jours dans le Technosol construit de l'expérience « diversité ». Avec Lt = modalités avec* Lumbricus terrestris *; Sans Lt = modalités sans* Lumbricus terrestris.**

3.4 Discussion

Les variations de biomasse des décomposeurs stricts (*P. scaber* et *F. fimetaria*) sont toutes positives, quelle que soit la combinaison faunistique. Les croissances positives pour *P. scaber* s'expliquent par la présence de la couche de compost qui représente un réservoir de matériel végétal dégradé et d'eau. Le matériel végétal dégradé représente la majeure partie du régime des cloportes (Løkke et Van Gestel, 1997). Les croissances positives du collembole dans les horizons CDV sont de la même manière consécutives à la présence de compost qui représente également un réservoir de nutriments et d'eau pour le régime omnivore de *F. fimetaria* (hyphes de champignons, bactéries, détritus végétaux) (Løkke et Van Gestel, 1997) qui permet un fort développement de biomasse dans le CDV. La croissance positive dans l'horizon A est consécutive à sa colonisation progressive. Le rôle prépondérant du compost est d'ailleurs prouvé pour le collembole puisque la biomasse dans la couche de compost est 145 fois plus élevée que dans l'horizon A et 1400 fois plus élevée que dans l'horizon B. Ainsi, pour les décomposeurs stricts, la couche de compost en surface est responsable des variations de biomasse positives.

Il ne ressort aucune influence significative de la composition faunistique pour la biomasse de *F. fimetaria* pour les horizons CDV et A. La nature trophique du matériau prime par rapport à l'influence des groupes fonctionnels pour les horizons CDV et A. Pour *P. scaber*, seul un effet positif d'*A. caliginosa* est significatif dans les combinaisons plurispécifiques. L'interprétation de ce phénomène reste complexe. En effet, parmi les combinaisons plurispécifiques où figurent *A. caliginosa* figurent parfois des décomposeurs (*F. fimetaria* et *L. terrestris*). Ceux-ci ont selon les tendances observées, un effet négatif sur la biomasse de *P. scaber.* Ainsi, en présence d'autres décomposeurs (*F. fimetaria* et *L. terrestris*), il y aurait concurrence entre ces espèces et *P. scaber*. Ceci aboutirait aux gains de biomasse de *P. scaber* les plus faibles. Avec l'ajout de *A. caliginosa*, l'effet négatif des décomposeurs (*F. fimetaria* et *L. terrestris*) se répartirait entre *A. caliginosa* et *P. scaber*. Ceci aboutirait à des gains de biomasse de *P. scaber* plus importants mais toujours inférieurs à ceux de la modalité monospécifique *P. scaber*. Enfin, *A. caliginosa* seul engendre un effet négatif. Ainsi, *A. caliginosa* limite l'effet négatif des décomposeurs sur *P. scaber* en modalité plurispécifique mais a un effet négatif seul avec *P. scaber*.

Par opposition, on observe un effet positif net de *L. terrestris* sur la biomasse des collemboles de l'horizon B. Ces effets des vers sur l'abondance et la biomasse des collemboles a été mis en en évidence dans la littérature des sols naturels entre *Folsomia candida* et deux vers : *L. terrestris* et *A. caliginosa.* Ce phénomène serait en partie expliqué par le fait que le ver par ses galeries offrirait un habitat pour les collemboles avec une meilleure disponibilité en nourriture et en eau (Wickenbrock et Heisler, 1997). Par ailleurs, un effet d'attirance des collemboles (*Heteromurus nitidus*) a été corrélé à de la présence d'un mélange d'urine et de mucus de vers (*Apporectodea giardi et Allobophora chlorotica*) (Salmon et Ponge, 2001). Dans notre expérience, seul un effet de *L. terrestris* a été observé sur le collembole. D'autre part, le nombre de groupes fonctionnels présents conditionne aussi la biomasse de *F. fimetaria*, les modalités à 0,1 et 4 groupes fonctionnels présentent des biomasses significativement plus basses que celles des modalités à 2 ou 3 groupes fonctionnels. Toutefois, l'influence de *L. terrestris* prime par rapport au nombre de groupes fonctionnels.

Par contre, en ce qui concerne les ingénieurs de l'écosystème, les variations de biomasse sont négatives, ce qui se produit assez souvent en expérimentations de laboratoire (Fründ *et al.*, 2010). Elles sont en moyenne plus fortes pour *A. caliginosa* que pour *L. terrestris*. Au-delà de 30% de perte de biomasse, l'activité des vers est considérée comme modifiée (Fründ *et al.*, 2010). Or pour toutes les modalités contenant *A. caliginosa* et pour deux modalités contenant *L. terrestris* (celles avec Ps sans Ac), les pertes de biomasse sont supérieures à 30%. Ceci indique que le Technosol construit, dans ses premiers stades d'évolution, ne semble pas être un milieu idéal pour les vers de terre endogés. Sans être létal, le TIT/SPP, bien que contenant de la matière organique sous forme de fibres cellulosiques ne semble pas subvenir aux besoins du ver endogé. On observe également aucune influence de la combinaison faunistique sur la biomasse de ces vers et les légères différences observées ne suivent pas de logique biologique. La littérature sur sols naturels indique un effet négatif de *L. terrestris* (Lowe et Butt, 2005), et neutre de *P. scaber* (Loranger-Merciris *et al.*, 2008) sur *A. caliginosa*. Aucune donnée n'existe entre *A. caliginosa* et *F. fimetaria*. Au final, il semblerait que la nature du matériau prime encore une fois sur l'influence des combinaisons faunistiques pour *A. caliginosa*.

Enfin, pour *L. terrestris*, les pertes de biomasse sont modérées. Aucune influence nette de la combinaison faunistique ne se dégage statistiquement, même si la modalité avec l'ensemble des espèces de faune est significativement différente de la modalité avec les deux autres espèces de décomposeurs (*P. scaber* et *F. fimetaria*). Toutefois, les mêmes tendances sont observables que pour la biomasse du cloporte *P. scaber*, à savoir un effet positif d'*A. caliginosa* dans les combinaisons plurispécifiques qui contrebalance l'effet négatif du cloporte *P. scaber* (dont les deux modalités avec Lt et sans Ac présentent les pertes les plus fortes). Par contre, à l'inverse de l'effet d'*A. caliginosa* sur *P. scaber*, l'effet positif d'*A. caliginosa* sur *L. terrestris*, est vrai pour toutes les combinaisons, et les modalités avec *A. caliginosa* et *L. terrestris*, sont supérieures à la modalité monospécifique. L'effet bénéfique d'*A. caliginosa* sur *L. terrestris* est connu (Lowe et Butt, 2005). La dernière modalité avec *L. terrestris* et *F. fimetaria* reste difficilement interprétable puisqu'elle s'intercale entre ces deux derniers types de modalités.

En résumé, on peut affirmer que (Figure 53):

- le ver de terre anécique *L. terrestris* crée des conditions favorables aux collemboles *F. fimetaria* au niveau de l'horizon B
- le nombre de groupes fonctionnels présents influe sur la biomasse de *F. fimetaria* de l'horizon B
- il n'y aucun effet des combinaisons faunistiques pour *F. fimetaria* dans les deux horizons supérieurs et pour *A. caliginosa*. L'effet du Technosol prime sur l'effet des groupes fonctionnels.
- pour la biomasse de *L. terrestris,* il y a une différence entre la modalité où toutes les espèces sont présentes par rapport à celle où sont présentes l'ensemble des décomposeurs (LtFfPs). Le ver de terre endogé compense l'effet négatif d'association de décomposeurs au sein de la même modalité. Mais, globalement, l'effet du Technosol prime sur l'effet des groupes fonctionnels.

Toutefois, quelques tendances se dégagent (Figure 53):

- Pour le décomposeur *L. terrestris*, lorsque la modalité contient l'autre décomposeur de la macrofaune, *P. scaber*, la perte de biomasse relative est augmentée. L'effet de l'autre décomposeur seul, *F. fimetaria* n'engendre pas de pertes. Lorsque les deux décomposeurs sont associés à *L. terrestris*, la perte est amplifiée. Le ver de terre endogé a également un effet bénéfique en association avec *L. terrestris*.

- Pour le décomposeur *P. scaber*, lorsque la modalité contient l'un et/ou l'autre des décomposeurs (*L. terrestris* et/ou *F. fimetaria*), le gain de biomasse relatif est diminué. Lorsque les deux décomposeurs sont présents, le gain de biomasse relatif est plus grand. A*pporectodea caliginosa* semble compenser cet effet négatif d'association de décomposeurs au sein de la même modalité. Par contre, il n'a pas d'effet bénéfique en association seul avec *P. scaber.*

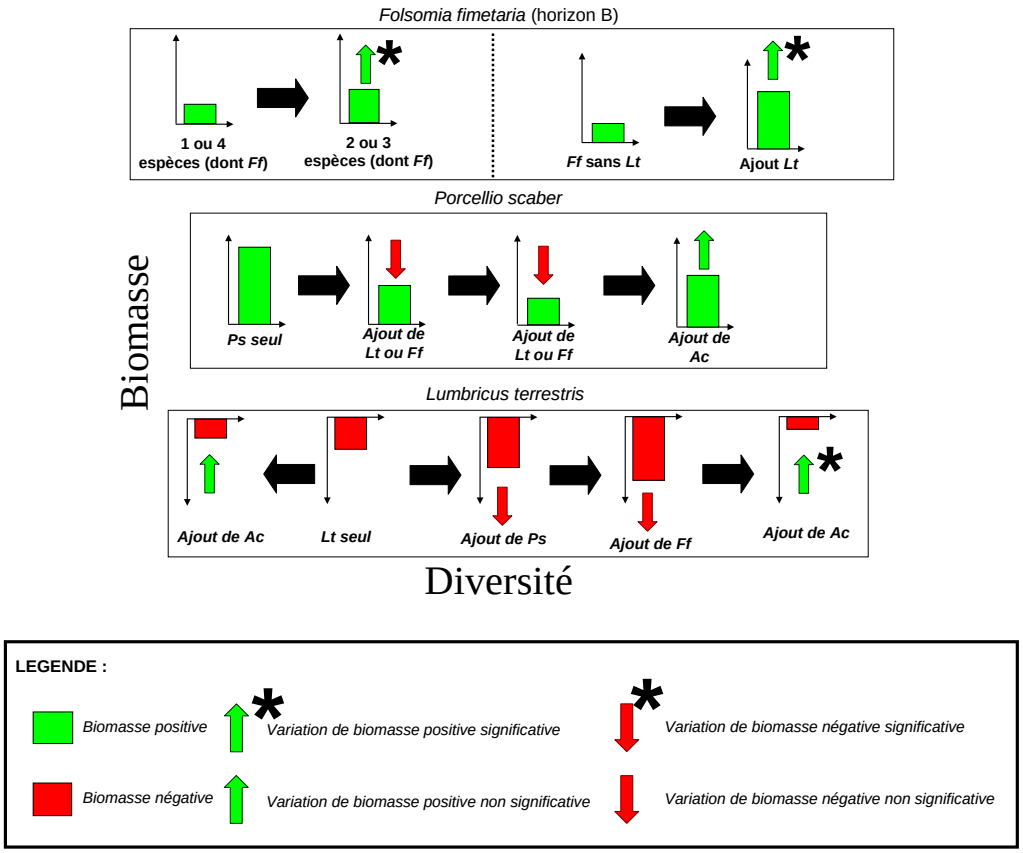


***Figure 53. Résumé des interactions biotiques observées dans l'expérience « diversité » à t=75 jours sur la biomasse des animaux. Lt :* Lumbricus terrestris *; Ps :* Porcellio scaber *; Ac :* Apporectodea caliginosa *; Ff :* Folsomia fimetaria.**

4 Conclusion partielle

Le résultat majeur de ce chapitre est que le Technosol construit est un support de vie de la faune du sol. Aucune absence totale de faune et aucun effet létal soudain n'y a été observé. La faune peut ainsi être envisagée en tant qu'agent du facteur biologique de la pédogenèse du Technosol.

Nous avons essayé de caractériser, décomposer et hiérarchiser les facteurs qui modulent cette fonction de support de vie pour la faune du sol (Figure 54) et d'expliciter leurs conséquences.

L'étude de la dynamique des communautés *in situ* nous a démontré que le Technosol construit même après 30 mois d'évolution, restait un milieu ouvert, avec une communauté de faune déterminée essentiellement par le procédé de construction du Technosol. Ceci est d'autant plus vrai pour les microarthropodes dont la structure

communautaire est largement expliquée par le compost de surface, que pour la macrofaune pour laquelle seules quelques espèces ont pu être reliées à la nature des matériaux. Par ailleurs, des interactions biotiques fonctionnelles sont apparues, comme par exemple la présence de Gamases qui est corrélée à celles des collemboles hémiédaphiques.

En décomposant les contraintes d'habitat liées au procédé de construction de sol (nature, proportion et formulation des matériaux) et interactions biotiques, on a pu :

- mettre en évidence l'importance cruciale du procédé de construction de sol sur la survie d'animaux modèles. Ceci nous a permis de hiérarchiser les influences hydriques et trophiques des deux matériaux purs et en mélanges
- appréhender et quantifier les interactions inter-fonctionnelles. Elles sont quasi-inexistantes pour certains groupes et à certaines échelles de sol (*A. caliginosa* et *F. fimetaria*). Elles sont parfois clairement démontrées (effet de *L. terrestris* sur *F. fimetaria* en profondeur) mais restent rares et peu intenses. L'effet du Technosol semble globalement primer sur beaucoup de groupes fonctionnels dans les premiers stades d'évolution. Ce facteur semble prépondérant par rapport aux interactions fonctionnelles.

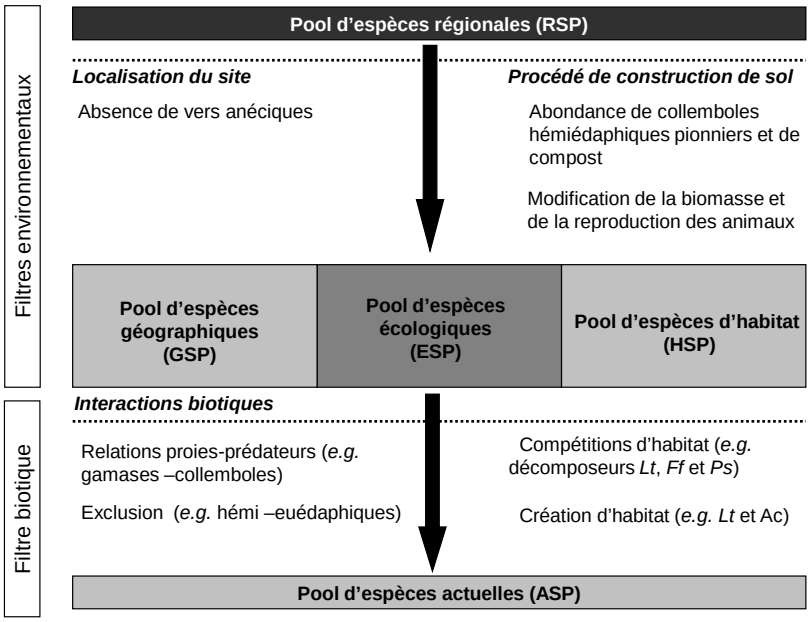


Figure 54. Réduction du pool d'espèces de la faune du sol avec les changements d'échelles adaptée au Technosol construit. RSP = Groupes d'espèces régionales ; HSP = Groupes d'espèces d'habitat ; GSP = Groupes d'espèces géographiques; ESP = Groupes d'espèces écologiques; ASP = Groupes d'espèces actuelles (Belyea et Lancaster, 1999; Hedde, 2006; Kelt* et al*., 1995) Lt =* Lumbricus terrestris*, Ff :* Folsomia fimetaria *; Ps =* Porcellio scaber*, Ac :* Apporectodea caliginosa*.

Ainsi la contrainte d'habitat, autrement dit le procédé de construction de sol, et à moindre mesure la contrainte de dispersion (pour les vers anéciques) semblent primer sur les interactions faunistiques et explique en grande partie la composition faunistique observée et la survie des animaux dans les premiers stades d'évolution de Technosols construits. Cette hiérarchie sera-t-elle bouleversée avec les stades ultérieurs d'évolution du Technosol construit ?

Chapitre IV Contribution d'un ingénieur de l'écosystème, *Lumbricus terrestris*, à la pédogenèse d'un Technosol construit : de l'agrégatosphère au pédon

En prolongement du chapitre précédent, l'objectif est de tester si la faune du sol a un effet sur la pédogenèse des Technosols. Le chapitre précédent montre que la faune du sol peut être considérée comme un facteur biologique de la pédogenèse du Technosol construit. De la même manière que nous avons explicité les réponses de la faune aux contraintes diverses du Technosol, il est aussi nécessaire d'envisager l'effet de ces contraintes sur l'influence de la faune sur les Technosols. Nous limiterons notre étude à la contrainte d'habitat envisagée essentiellement sous l'angle du procédé de construction du Technosol construit (nature, proportion et formulation des matériaux) et des interactions biotiques sous l'angle de la diversité fonctionnelle.

Le peu de littérature disponible et les résultats du chapitre III incitent à privilégier le procédé de construction du Technosol. L'objectif de ce chapitre (IV) est d'évaluer l'influence de la faune sur l'évolution des Technosols en faisant varier la contrainte d'habitat par le procédé de construction de sol. L'influence des interactions biotiques sera étudiée au dernier chapitre (V).

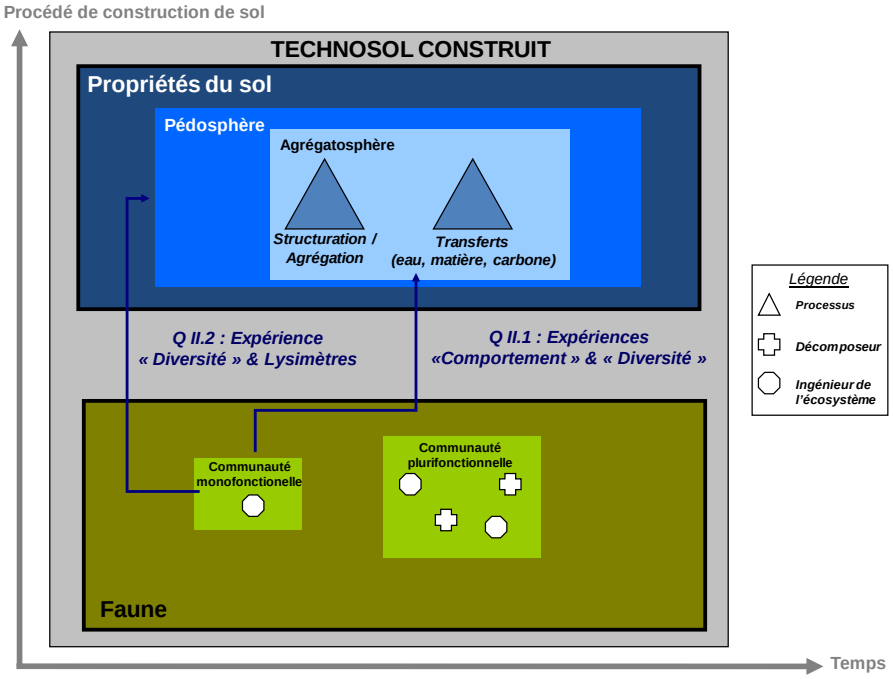


Figure 55. Schéma directeur du chapitre IV : contribution d'un ingénieur de l'écosystème,* Lumbricus terrestris*, à la pédogenèse d'un Technosol construit : de l'agrégatosphère au pédon.

Il a ainsi été envisagé de raisonner en partant d'études en laboratoire avec un modèle d'ingénieur de l'écosystème, le ver de terre épi-anécique *L. terrestris* en se focalisant sur l'échelle de l'agrégatosphère et sur les interactions avec le procédé de construction du Technosol (Figure 55). Dans un premier temps, cette approche permettra i) de savoir si la faune du sol a un effet sur la pédogenèse à l'échelle de l'agrégatosphère et ii) d'évaluer les variations de nature et d'intensité de la contribution de la faune à la pédogenèse en fonction du procédé de construction du Technosol. Dans un deuxième temps (Figure 55), nous augmenterons l'échelle d'espace, avec des indicateurs de fonctionnement au niveau du pédon ce qui permettra d'évaluer l'influence de l'animal dans le profil de sol et de valider les approches à plus faibles échelles.

1 Interactions entre le ver *Lumbricus terrestris* et le procédé de construction du Technosol construit : échelle de l'agrégatosphère

1.1 Effets du procédé de construction sur la production de galeries et de turricules

1.1.1.1 Observations

Les galeries sont des structures facilement observables. En fonction de l'humidité des matériaux, des variations morphologiques caractéristiques ont été observées dans les différentes expériences. Lorsque le compost est bien humidifié (65% de la capacité au champ), des galeries dans le TIT/SPP présentent des manchons de compost (Figure 56b) et alors que les galeries dans le compost ne présentent pas de manchons. Lorsque le compost est peu humide (< 50% de la capacité au champ), les galeries dans le compost présentent des manchons formés par du TIT/SPP (Figure 56c). Les galeries dans le TIT/SPP n'en présentent pas. En cas de déficit hydrique localisé, le ver tapisse ses galeries dans le matériau qui présente le moins d'eau disponible avec du matériau qui en possède le plus. Si le matériau contient suffisamment d'eau, il n'y a pas de manchons. La quantité de matériau des manchons est d'autant plus grande que la galerie est proche du matériau considéré.

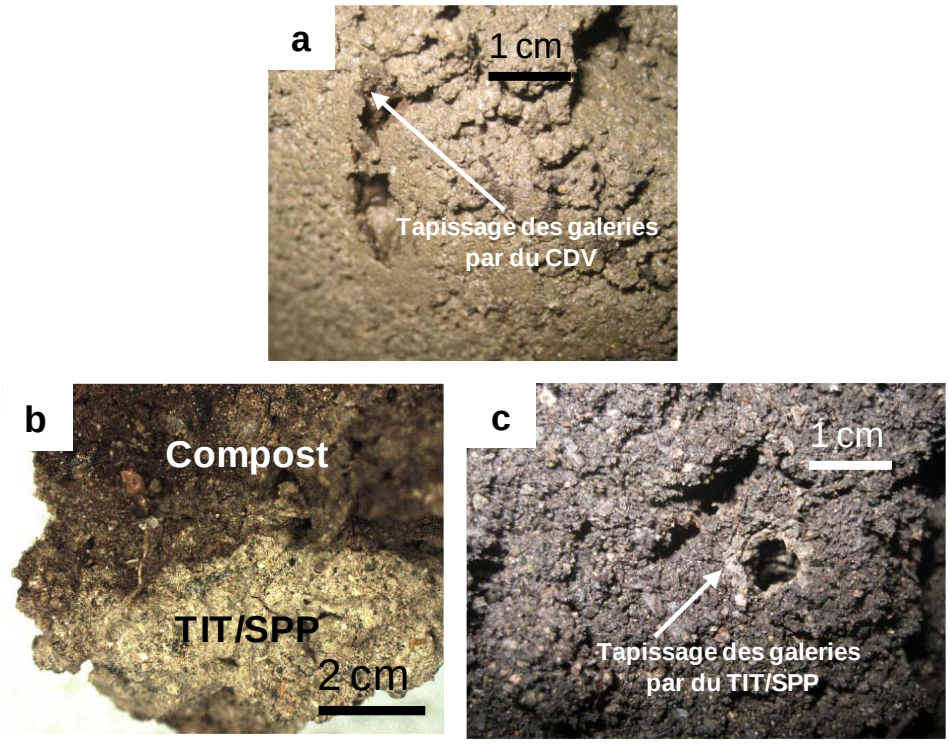


Figure 56. Observations des galeries de* Lumbricus terrestris *dans le Technosol construit, a & b : après 75 jours dans l'expérience « diversité », c : après 30 jours dans l'expérience « comportement » ; TIT/SPP=terre industrielle traitée et sous produit papetier ; CDV=compost de déchet vert.

Les turricules à la surface du sol à 30 jours (Expérience « comportement », Figure 57) se distinguent difficilement, et ce d'autant plus dans les modalités constituées d'un seul matériau avec lequel les turricules se confondent (Figure 57a, Figure 57c, Figure 58a, Figure 58b). Dans les modalités à deux matériaux, les turricules présentent une large gamme de couleurs (Figure 57b & Figure 58b). L'observation de l'ensemble des dispositifs montre une corrélation positive (non démontrée par les statistiques) entre la quantité de turricules de surface et la teneur en TIT/SPP.

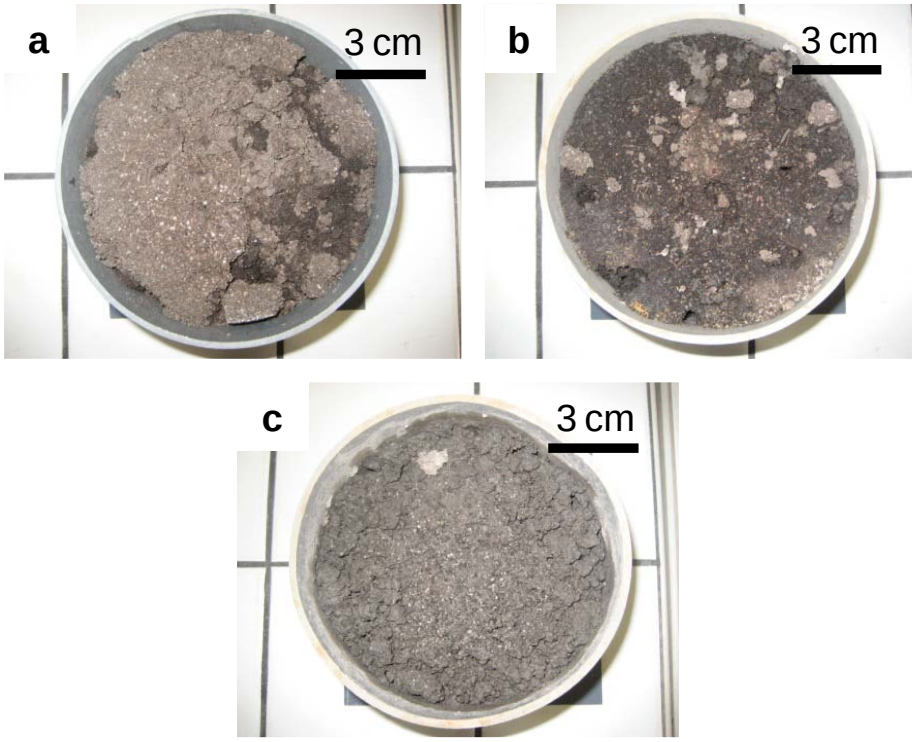


Figure 57. Observations de la surface des cosmes, a : de la modalité 100% CDV, b : d'une modalité à deux matériaux (CDV et TIT/SPP), c : de la modalité 100% TIT/SPP à t=30 jours dans l'expérience « comportement » contenant* Lumbricus terrestris *; TIT/SPP=terre industrielle traitée et sous produit papetier ; CDV=compost de déchet vert.

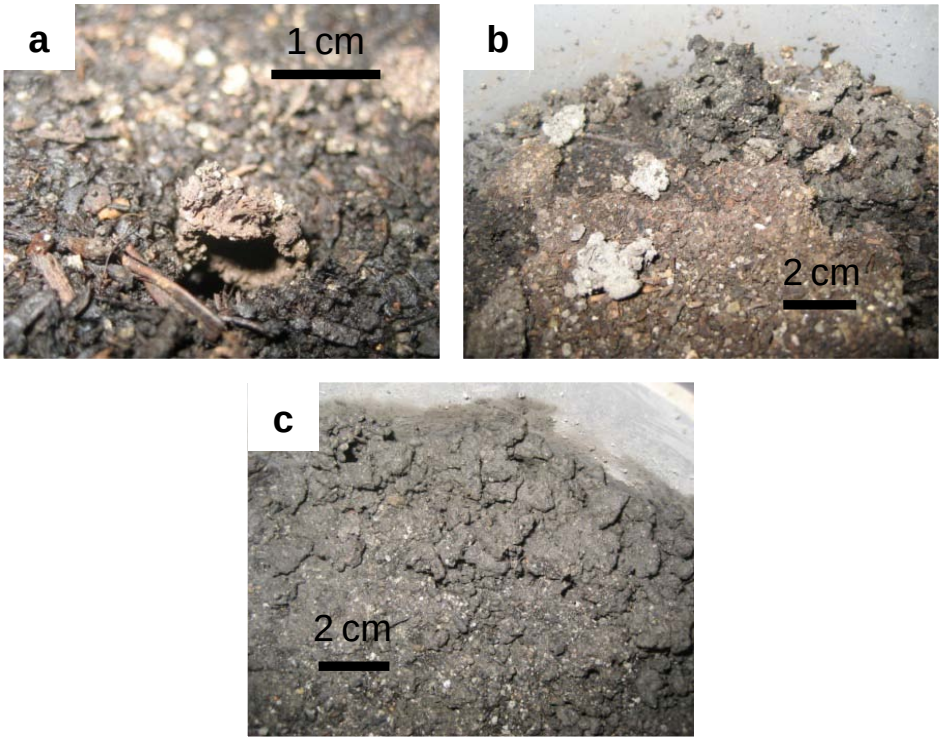


Figure 58. Observations de turricules de surface de* Lumbricus terrestris*, a : de la modalité 100% CDV, b : d'une modalité à deux matériaux (CDV et TIT/SPP), c : de la modalité 100% TIT/SPP à t=30 jours dans l'expérience « comportement » contenant* Lumbricus terrestris *; TIT/SPP=terre industrielle traitée et sous produit papetier ; CDV=compost de déchet vert.

Lors de l'expérience « diversité » avec *L. terrestris*, les turricules « frais » de surface présentent une forme caractéristique (Figure 59a) plus ronde et moins anguleuse que les agrégats de sol témoin (Figure 59 b). La rare apparition de ces formes si spécifiques au turricule à la surface du sol laisse penser que le turricule se craquèle et se déstructure (Figure 59a). Les observations effectuées en profondeur, n'ont pas permis de mettre en évidence ces formes caractéristiques et il est très difficile d'isoler des agrégats typiques de la digestion du ver.

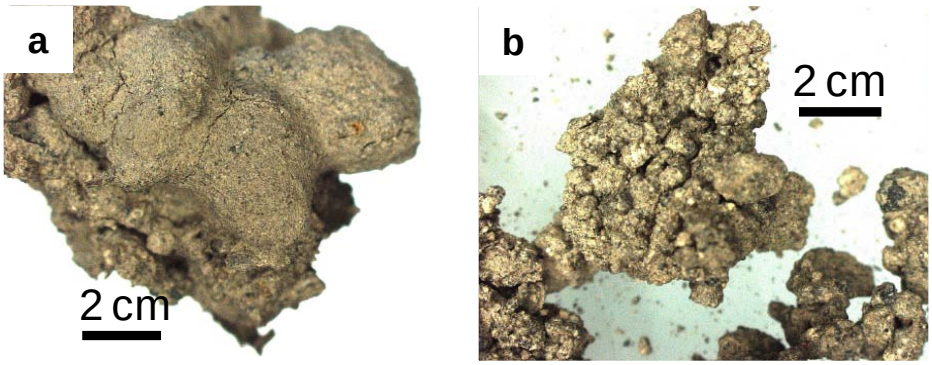
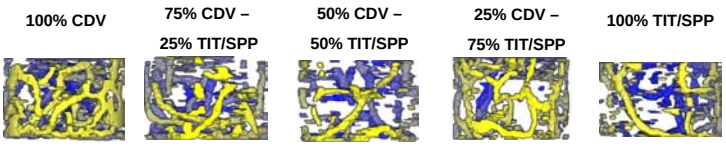


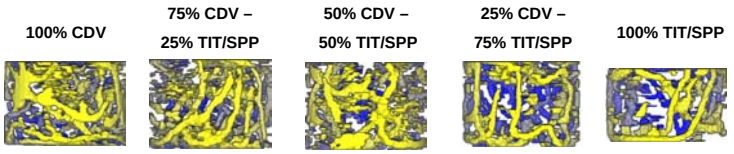
Figure 59. Observations, a : d'un turricule de surface de* Lumbricus terrestris*, b : du sol témoin à t=75 jours dans l'expérience « diversité ».

1.1.1.2 Quantification

Le volume total de galeries des vers augmente avec la teneur en compost (Figure 60). Dans l'expérience « comportement », le volume creusé par le ver diminue avec le temps (entre 0-14 jours et 15- 30 jours), avec respectivement 65% et 35% du volume total, excepté pour la modalité 100% CDV où le volume reste constant. Aux deux dates, la répartition des volumes de galerie est proportionnelle aux quantités de matériaux. Par exemple, 27% de volume de galeries sont dans le compost pour la modalité 25%CDV-75%CDV à 30 jours. Il n'y a alors pas de bioturbation préférentielle en fonction du matériau.



	100% CDV	75% CDV – 25% TIT/SPP	50% CDV – 50% TIT/SPP	25% CDV – 75% TIT/SPP	100% TIT/SPP
Volume de galeries (cm^3)	138	95	79	79	56
Galeries dans le CDV (%)	100	59	48	31	0
TIT/SPP déplacé dans le CDV (mm^3)	0	275	130	200	0



	100% CDV	75% CDV – 25% TIT/SPP	50% CDV – 50% TIT/SPP	25% CDV – 75% TIT/SPP	100% TIT/SPP
Volume de galeries (cm^3)	137	155	129	124	81
Galeries dans le CDV (%)	100	67	46	27	0
TIT/SPP déplacé dans le CDV (mm^3)	0	470	476	208	0

Figure 60. Reconstruction en 3 dimensions du réseau de galeries de* Lumbricus terrestris *et résultats associés obtenus en tomographie (volume total de galeries, pourcentage de galeries dans la partie CDV et volume de TIT/SPP déplacé dans la partie de CDV) dans les cosmes (15 cm de diamètre ; 10 cm de profondeur) de l'expérience « comportement » à 14 et 30 jours. En jaune, premier plan, en bleu arrière plan ; TIT/SPP=terre industrielle traitée et sous produit papetier ; CDV=compost de déchet vert.

La production de turricules de surface après 7 jours (Expérience « comportement », Figure 61), diminue avec la teneur en compost, excepté pour la modalité 100% CDV qui présente une valeur plus grande que la modalité 75%CDV-25%TIT/SPP. La valeur de la modalité 100%TIT/SPP est largement plus haute que les autres modalités, excepté la modalité 25%CDV-75%TIT/SPP qui présente une valeur un peu moins faible que les autres modalités riches en compost. Toutes les modalités sont significativement différentes les unes des autres.

En ce qui concerne la production de turricules de surface après 14 et 30 jours (Figure 61), un lien positif très net entre la production de turricules et la teneur en compost se confirme. Par ailleurs, pour chaque modalité, la production à 30 jours est supérieure à celle de 14 jours. L'influence de la modalité est cependant significativement supérieure à celle de la durée de l'expérience.

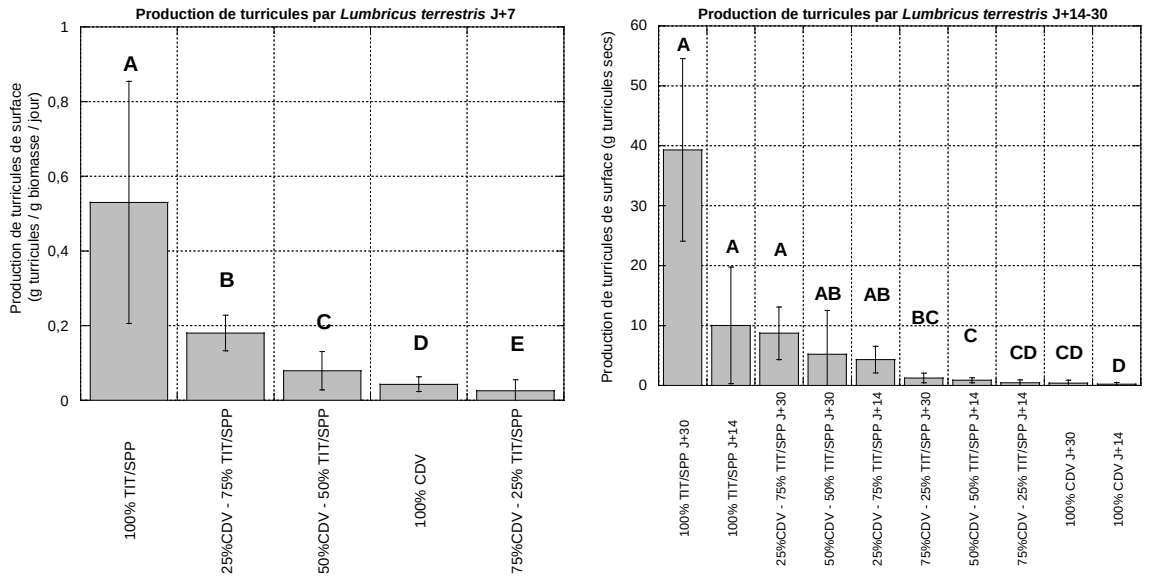


Figure 61. Production de turricules (moyennes et écarts-types) à t=7 jours (gauche) et de turricules de surface à t=14-30 jours (droite) de* Lumbricus terrestris *dans l'expérience « comportement ». Les lettres indiquent les résultats des tests statistiques et post-hoc (Kruskal-Wallis, p<0,0001 et p=0,0004 suivi de Conover-Iman). TIT/SPP=terre industrielle traitée et sous produit papetier ; CDV=compost de déchet vert.

Des quantifications à partir d'images de tomographie de l'expérience « comportement » (Figure 62) ont permis de mesurer le déplacement de matière consécutif à la production de manchons de TIT/SPP dans les galeries formées dans l'horizon de CDV. Le TIT/SPP est déplacé sur toute la hauteur du compost pour toutes les modalités contenant les deux matériaux (Figure 63). La quantité de matière déplacée augmente avec la proximité de l'interface CDV-TIT/SPP (Figure 63) et avec le temps, excepté pour la modalité 25%CDV-75%TIT/SPP où l'effet temps n'est pas visible.

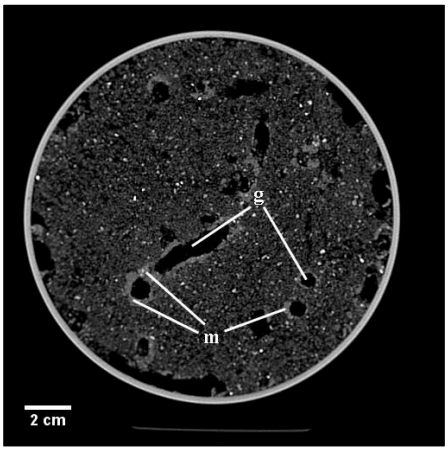


Figure 62. Image de tomographie tirée d'un cosme à deux matériaux (CDV et TIT/SPP) contenant* Lumbricus terrestris *au milieu de l'horizon de CDV de l'expérience « comportement ». m : manchons de TIT/SPP ; g : galeries ; TIT/SPP=terre industrielle traitée et sous produit papetier ; CDV=compost de déchet vert.

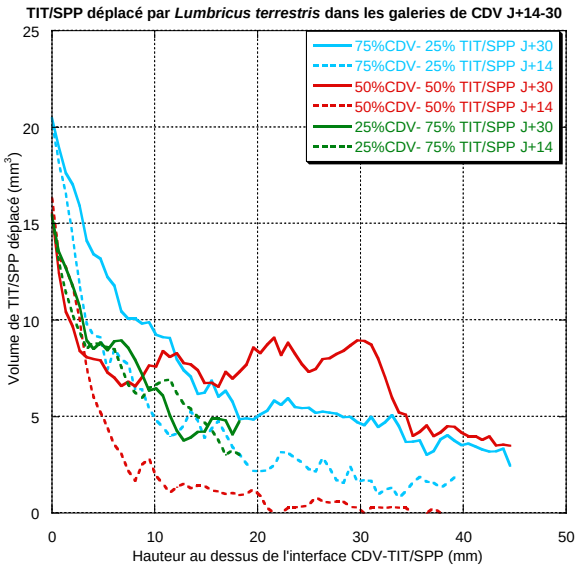


Figure 63. Volume de TIT/SPP déplacé par* Lumbricus terrestris *en fonction de la hauteur au-dessus de l'interface entre la TIT/SPP et le CDV selon les modalités à deux matériaux (CDV et TIT/SPP) à t=14-30 jours de l'expérience « comportement » ; TIT/SPP=terre industrielle traitée et sous produit papetier ; CDV=compost de déchet vert.

1.2 Evaluation qualitative des matériaux bioturbés par rapport au sol témoin

1.2.1 Evaluation qualitative du sol témoin

L'évaluation qualitative du sol témoin passe par l'observation ultrastructurale des matériaux bruts : i) le CDV et le mélange TIT/SPP à t= 30 jours de l'expérience « comportement » afin de les comparer aux turricules de l'expérience « comportement », ii) l'interface du CDV et du TIT/SPP non bioturbé à t= 75 jours de l'expérience « diversité » afin de la comparer aux galeries des vers de l'expérience « diversité ». Cette interface comprend un volume qui englobe quelques millimètres cube de matériaux CDV et TIT/SPP à leur interface.

- Le CDV (Expérience « Comportement »)

Les coupes ultra-fines du compost révèlent une grande diversité de tissus végétaux détériorés qui présentent des niveaux de décomposition contrastés en fonction d'activités bactériennes passées (Figure 64.1, Figure 64.2 & Figure 64.3) ou actuelles (Figure 64.2). Les résidus sont des fragments de tissus entiers (Figure 64.1), des fragments de cellules (Figure 64.2, Figure 64.4) et de la matière organique fine compactée (Figure 64.3). L'observation de spores (Figure 64.4), de résidus de cellules bactériennes (Figure 64.2, Figure 64.3) et de matière organique fine provenant de résidus cellulaires sont des indicateurs d'une diminution progressive de l'activité bactérienne dans le compost. La constitution biochimique de la matière organique est contrastée : parois cellulaires pecto-cellulosique (Figure 64.2 & Figure 64.4), ligneuse (Figure 64.1) ou polyphénolique (Figure 64.2, Figure 64.3 & Figure 64.4). Quelques minéraux sont détectés (Figure 64.4).

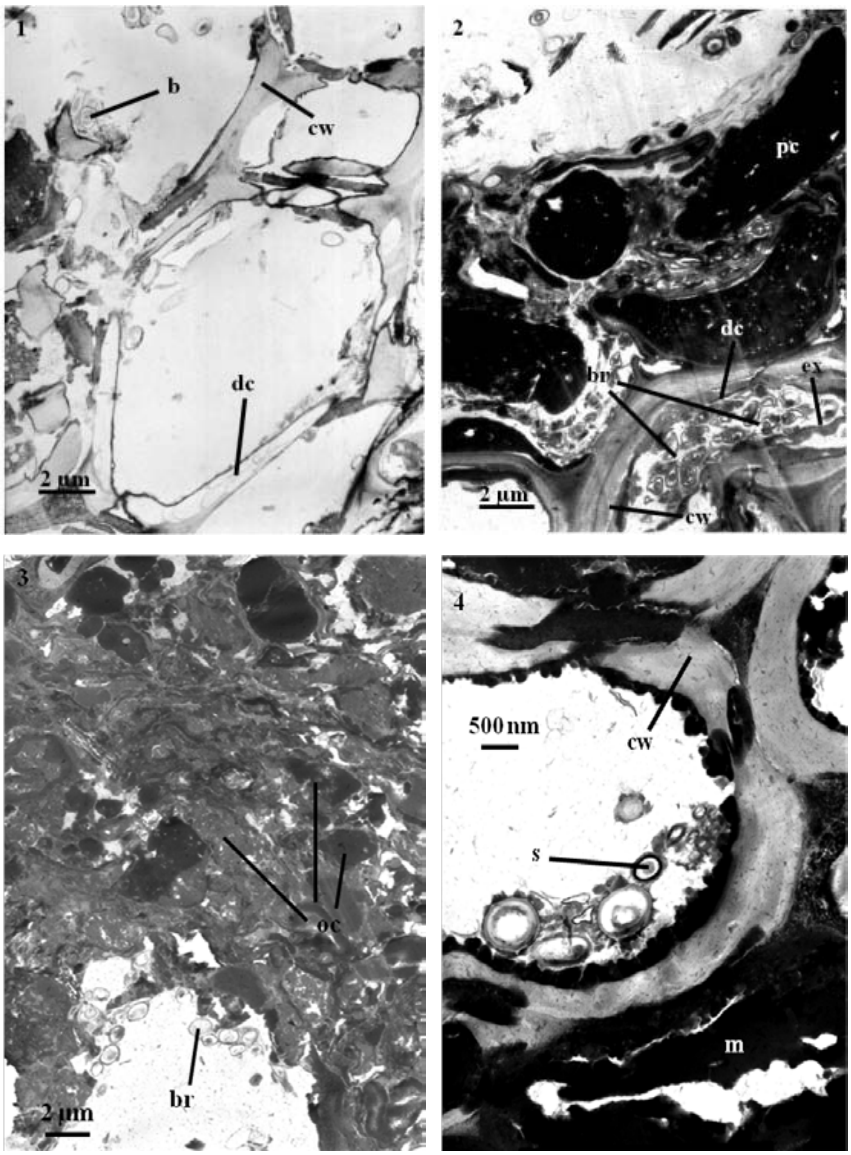


Figure 64. Micrographes de microscope électronique à transmission du compost de déchets verts de l'expérience « comportement » à t=30 jours. 1: résidus végétaux ; 2 : tissus ligneux : parois de cellules intactes et dégradées ; 3 : spores dans des résidus cellulaires végétaux ; 4 : matière organique fine provenant de la dégradation des tissus végétaux. b, bactéries vivantes ; br, résidus bactériens ; c, cellule ; cw, paroi de cellule ; dc, paroi de cellule dégradée ; m, minéraux ; pc, compose phénolique oc, composé organique ; rc, résidus cellulaires ; s, spore.

- Le mélange TIT/SPP (Expérience « comportement »)

Le mélange TIT/SPP est essentiellement composé de minéraux provenant de la terre industrielle traitée (Figure 65) et de fibres cellulosiques (Figure 65.3) provenant de la boue de papeterie. Les minéraux sont libres (Figure 65.3) ou associés en microagrégats (Figure 65.1, & Figure 65.2). Toutefois, les fibres cellulosiques ne participent pas à

l'agrégation (Figure 65.3). Quelques bactéries sont présentes (Figure 65.1) sans qu'il n'y ait de trace d'une ancienne activité bactérienne prononcée comme dans le compost.

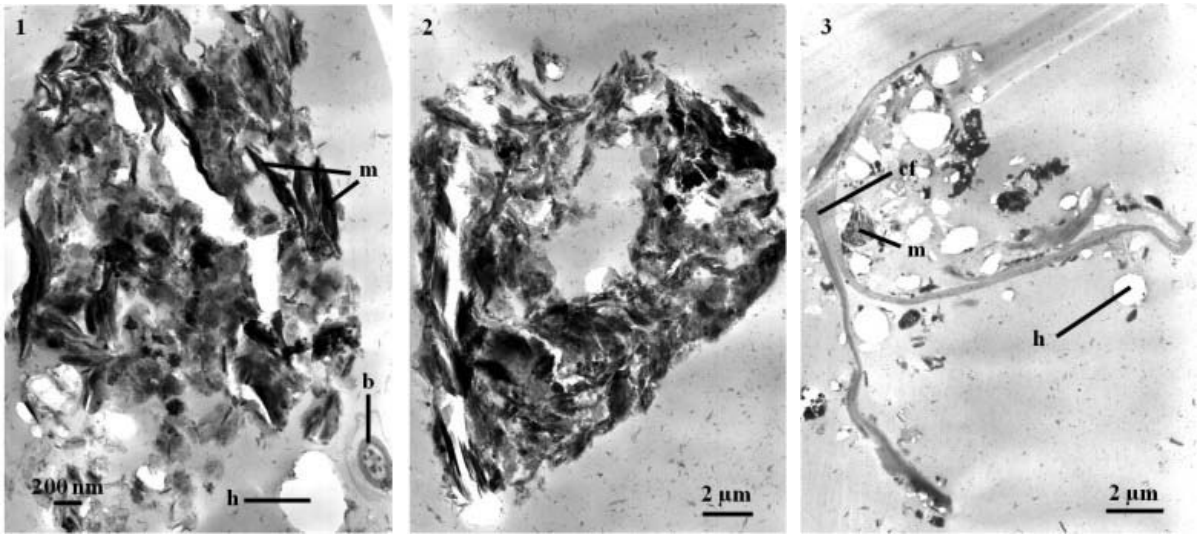
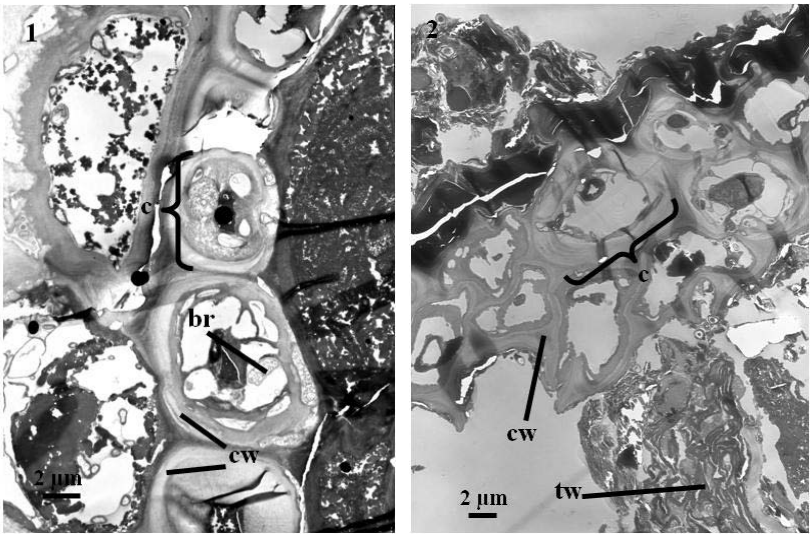


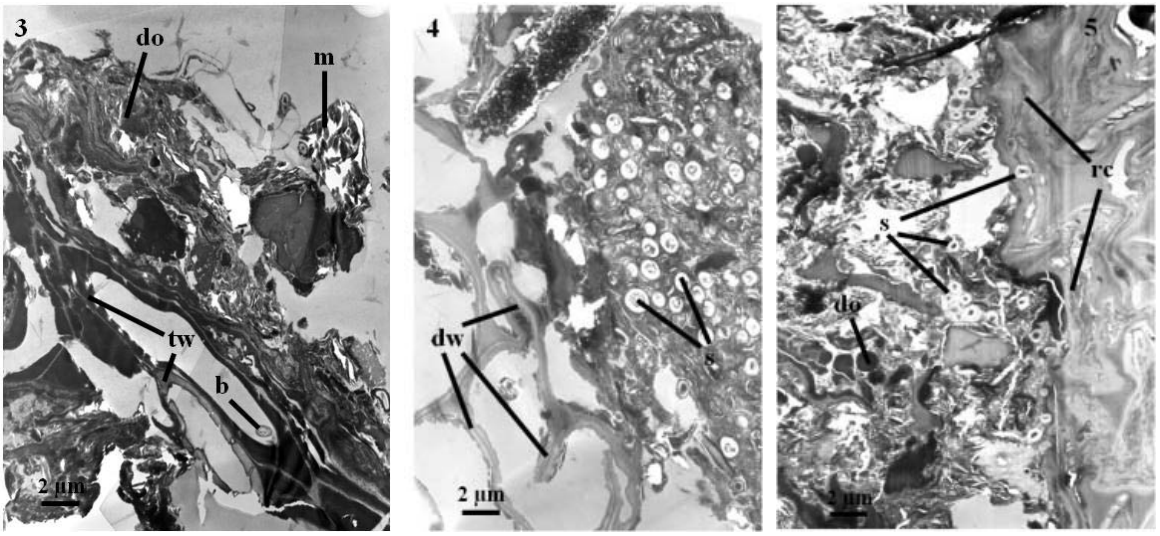
Figure 65. Micrographes de microscope électronique à transmission du mélange TIT/SPP de l'expérience « comportement » à t=30 jours. 1: agrégat organo-minéral avec des bactéries ; 2 : agrégat organo-minéral ; 3 : fibre cellulosique. b, bactéries vivantes ; cf, fibre cellulosique ; h, trou dans la résine ; m, minéraux. TIT/SPP=terre industrielle traitée et sous produit papetier.

- Interface TIT/SPP & CDV (Expérience « diversité »)

Des constituants spécifiques du CDV sont présents. Ils se retrouvent sous différents états de dégradation. Des gros morceaux de tissus intacts au sein d'un agrégat (une dizaine de microm, Figure 66.1 & Figure 66.2), ou bien isolés sont visibles. Des morceaux de tissus de plus en plus dégradés et fragmentés sont également observés. Dans l'ordre chronologique de leur dégradation, on observe i) des tissus à l'état de fantômes car la paroi perd sa forme originelle plus ou moins tassée (Figure 66.3) et se dégrade parfois (Figure 66.4, à gauche), ii) un stade de dégradation avancée où les tissus sont complètement tassés et déformés (Figure 66.5, à droite & Figure 66.6), iii) un dernier stade de dégradation avec des résidus cellulaires entièrement colonisés par des bactéries sous formes de spores témoignant d'une activité ancienne (Figure 66.4, à droite). On trouve également beaucoup de minéraux assez tassés du TIT/SPP (Figure 66.5, à gauche). On estime que ce faciès homogène se répète en profondeur. Nous n'avons pas retrouvé de fibres cellulosiques dans nos échantillons.

Les diverses formes et qualités de matières organiques décrites ci-dessus participent à l'agrégation pour former des microagrégats, essentiellement à l'interface du compost et du mélange TIT/SPP (Figure 66.2, Figure 66.5, Figure 66.7 & Figure 66.8). Les agrégats sont stables, ayant résisté à la désagrégation provoquée par l'eau lors de la caractérisation granulométrique (Figure 66.9). L'activité bactérienne actuelle, influence notamment les agrégats de l'interface sol-compost (Figure 66.10). L'activité passée se retrouve dans la matière organique (Figure 66.5). On y retrouve parfois des chenaux de microporosité entre des agrégats incluant des bactéries vivantes et leurs exopolymères (Figure 66.10 au milieu). L'activité biologique de l'échantillon est globalement faible et passée (Figure 66.4 & Figure 66.5). Les bactéries vivantes sont dans les tissus (Figure 66.6) ou dans des agrégats (Figure 66.9) non négligeables en nombre.





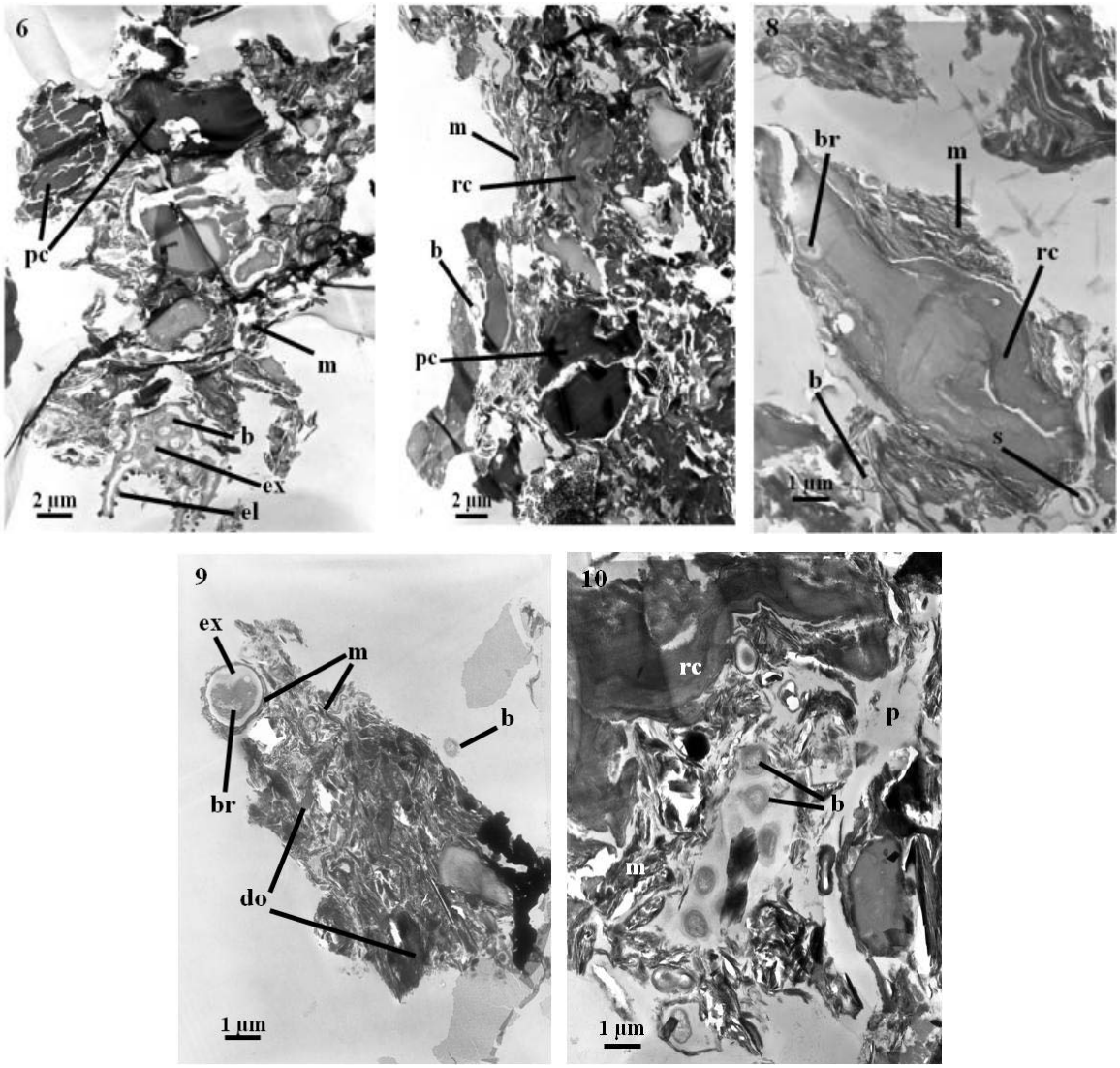


Figure 66. Micrographes de microscope électronique à transmission de l'interface du CDV et du TIT/SPP de la modalité témoin de l'expérience « diversité » à t=75 jours. 1 & 2 : tissus végétaux intacts ; 3 : tissus végétaux tassés ; 4 : tissus végétaux dégradés ; 5: matière organique fine provenant de la dégradation des tissus végétaux ; 6 & 7 : agrégation organo-minérale à l'interface ; 8 & 9 : microagrégats organo-minéraux ; 10 : agrégation organo-minérale et porosité. b, bactéries vivantes ; br, résidus bactériens ; c, cellule ; pc, composé phénolique ; cw, paroi de cellule ; do, matière organique dégradée ; el, épaississement ligneux ; m, minéraux ; p, porosité ; rc, résidus cellulaires ; s, spore ; tw, parois tassées. TIT/SPP=terre industrielle traitée et sous produit papetier ; CDV=compost de déchet vert.

1.2.2 Evaluation qualitative des turricules

- Observations ultrastructurales des turricules de surface (Expérience « comportement »)

Des coupes ultrastructurales des turricules provenant de deux modalités de sol (100% TIT/SPP et 75%CDV-25%TIT/SPP) ont été observées. Dans la modalité 100% TIT/SPP, les coupes ultra-fines des turricules présentent des morphologies similaires au TIT/SPP non bioturbé. Les fibres cellulosiques libres (Figure 67.1, Figure 67.2, & Figure 67.3), des minéraux libres (Figure 67.1, Figure 67.2, & Figure 67.3) et des associations organo-minérales (Figure 67.4) apparaissent. Dans quelques agrégats, les fibres cellulosiques participent à l'agrégation (Figure 67.5 & Figure 67.6), ce qui n'est pas le cas dans le mélange non bioturbé. L'existence de fragments de fibres cellulosiques dégradées prouve la participation des fibres à l'agrégation du turricule (Figure 67.4). On observe une présence accrue de bactéries libres (Figure 67.1, Figure 67.2 & Figure 67.4) comparativement au TIT/SPP non bioturbé et quelques bactéries présentent une activité cellulolytique (Figure 67.4). D'anciennes bactéries non actives sont également observées (Figure 4). Les restes de ces bactéries se présentent souvent sous forme d'agrégats bactériens, dans la mesure où des minéraux leur sont associés via des exopolymères (Figure 4).

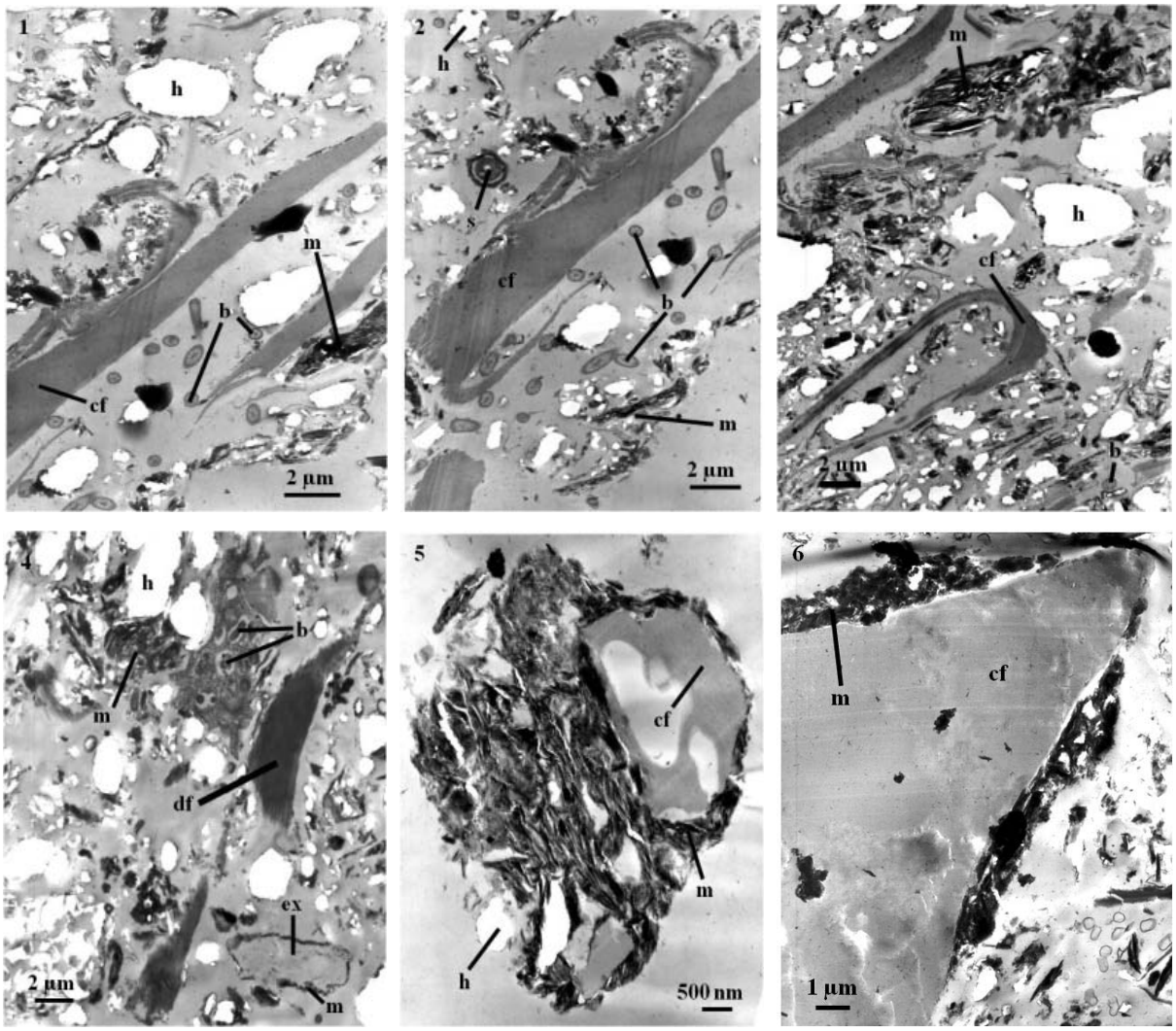
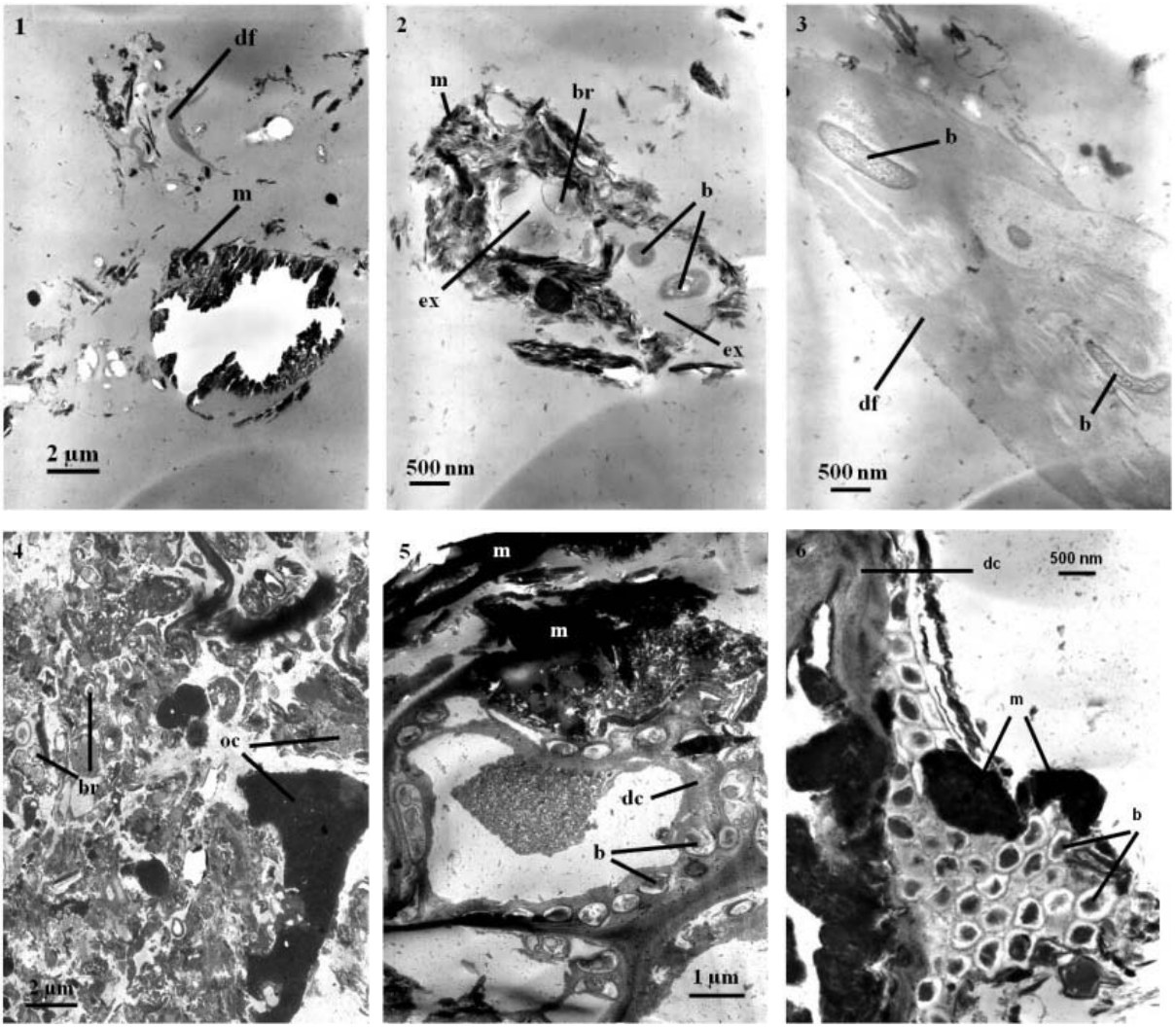


Figure 67. Micrographes de microscope électronique à transmission du turricule de* Lumbricus terrestris *de la modalité 100% TIT/SPP de l'expérience « comportement » à t=30 jours. 1, 2, 3 & 4 : vue d'ensemble ; 5 : agrégat organo-minéral incluant des fibres cellulosiques ; 6 : détail de fibre cellulosique participant à l'agrégation. b, bactéries vivantes ; cf, fibre cellulosique ; df, fibre cellulosique dégradée ; ex, exopolymères ; h, trou dans la résine ; m, minéraux. TIT/SPP=terre industrielle traitée et sous produit papetier.

Pour la modalité 75% CDV-25% TIT/SPP, les coupes ultra-fines contiennent des composants de CDV et de TIT/SPP non bioturbés. Les minéraux (Figure 68.1 & Figure 68.2) et les fibres cellulosiques (Figure 68.1 & Figure 68.3) indiquent l'ingestion par les vers de terre de TIT/SPP et les tissus végétaux d'apparences contrastées (Figure 68.4 & Figure 68.5) celle du CDV. Toutefois, contrairement aux matériaux non bioturbés, le nombre et la diversité bactérienne sont visuellement plus intenses. Les matériaux dans le turricule, en particulier dans les parois des cellules végétales (Figure 68.5), sont

dégradés par des bactéries vivantes (Figure 68.3), parfois sous forme de colonies bactériennes (Figure 68.6). Des bactéries présentant une diversité de morphologies et de tailles dégradent par exemple une lamelle moyenne (Figure 68.7). Par ailleurs, des bactéries dont la forme est caractéristique de bactéries impliquées dans le cycle de l'azote (Nitrobacter) (Josserand et Cleyet-Marel, 1979) (Figure 68.8) sont regroupées en un large agrégat bactérien. La diversité bactérienne semble être ainsi plus élevée dans les turricules de la modalité 75% CDV-25% TIT/SPP que dans ceux de la modalité 100% TIT/SPP. D'autres agrégats bactériens associent des minéraux provenant de la terre industrielle et des exopolymères bactériens (Figure 68.8).



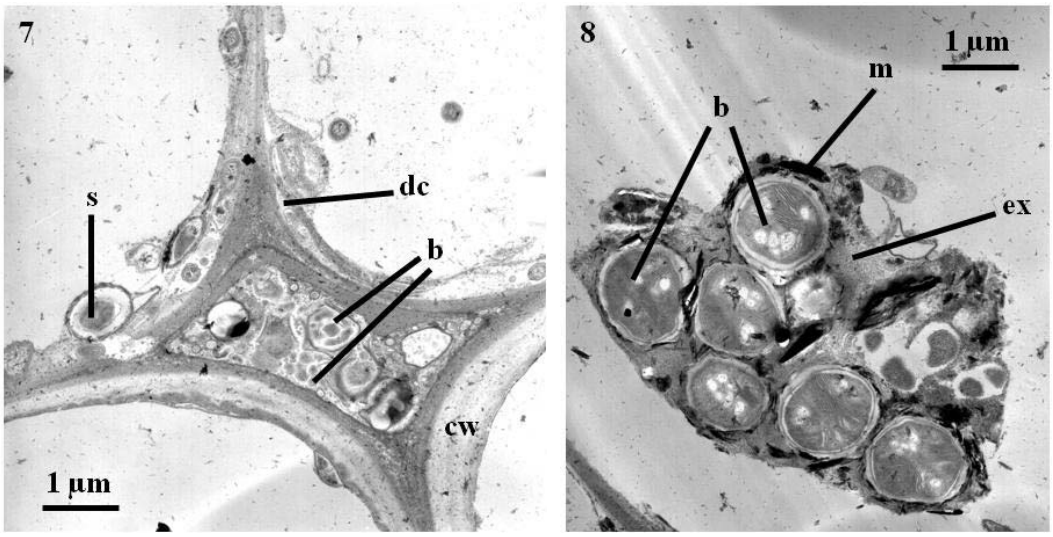


Figure 68. Micrographes de microscope électronique à transmission de turricule de* Lumbricus terrestris *de la modalité 75% CDV – 25% TIT/SPP de l'expérience « comportement » à t=30 jours. 1 : minéraux et fibres ; 2 : agrégat organo-minéral ; 3 : fibre cellulosique sous biodégradation ; 4 : matière organique fine après biodégradation ; 5 : tissus dégradés ; 6 : colonie bactérienne ; 7 : diversité morphologique des bactéries ; 8 : agrégat bactérien. b, bactéries vivantes ; br, résidus bactériens ; cf, fibre cellulosique ; cr, résidu de cellules ; cw, paroi de cellule ; dc, cellule dégradée ; df, fibre cellulosique dégradée ; ex, exopolymères ; h, trou dans la résine ; m, minéraux ; ml, lamelle moyenne ; oc, composé organique ; s, spore. TIT/SPP=terre industrielle traitée et sous produit papetier ; CDV=compost de déchet vert.

- Teneurs en C_{tot} et C_{org} des turricules (Expérience « comportement »)

Les teneurs en C_{tot} et en C_{org} des turricules de surface et des matériaux parents initiaux (CDV_{mp} et TIT/SPP_{mp}) ont été comparées statistiquement. Les valeurs de carbone des mélanges initiaux (*e.g.* 25%CDV 75%TIT/SPP_{mi}) ont été calculées à partir des moyennes de mesures obtenues sur les matériaux parents bruts et ne pourront donc pas rentrer en compte dans les tests statistiques. Le C_{tot} des turricules augmente avec la teneur en CDV, ce qui est logique car ce matériau à une teneur en C statistiquement plus élevée que le TIT/SPP. Par ailleurs, les turricules des modalités 100%CDV et 100%TIT/SPP ont des teneurs très proches respectivement du CDV_{mp} et du TIT/SPP_{mp}. Le test statistique ne présente pas de différence significative entre ces modalités et le C_{tot} des matériaux parents bruts correspondants. Pour les trois autres modalités, les tendances ne sont pas identiques. Pour les modalités à 50% et 75% de CDV, le C_{tot} du mélange initial est plus haut que la valeur du turricule, alors que pour la modalité 25%CDV-75%TIT/SPP, les deux valeurs sont quasiment égales.

Pour le C_{org}, les valeurs des mélanges initiaux sont plus élevées que les valeurs des turricules et les différences déjà existantes pour le C_{tot} sont amplifiées. Cela ne se traduit pas par une différence significative pour les modalités à matériau brut. En ce qui concerne les trois autres modalités, on ne peut parler que de tendances. Enfin, l'ordre des trois modalités restantes n'est pas le même que pour celui du C_{tot}.

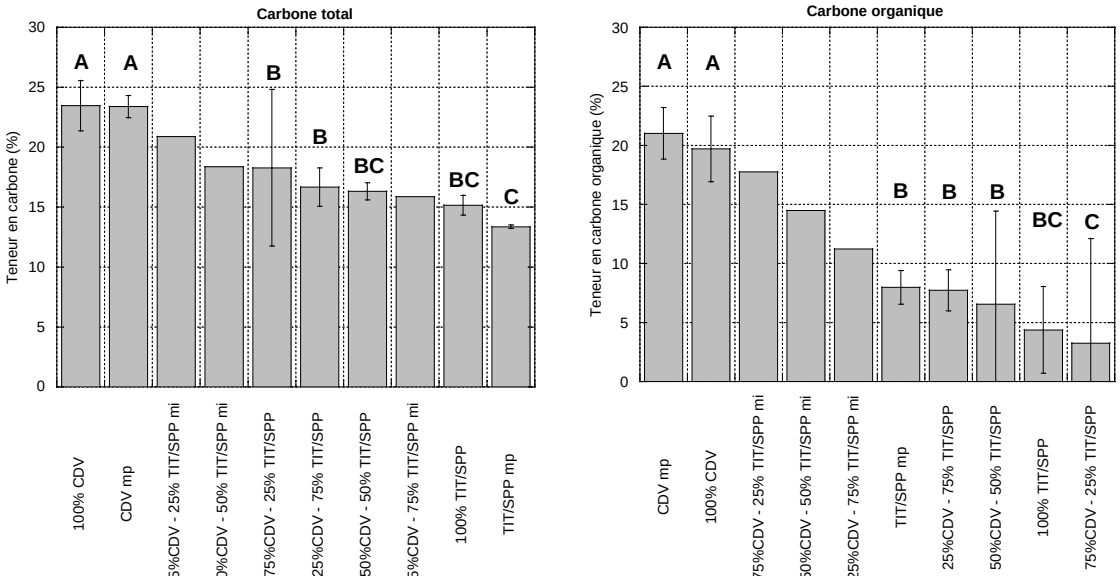


Figure 69. Teneur (moyennes et écarts-types) en carbone total et en carbone organique des turricules de surface de* Lumbricus terrestris*, des matériaux parents et des mélanges initiaux en fonction des modalités de construction de sol à t=30 jours dans l'expérience « comportement ». Les lettres indiquent les résultats des tests statistiques et post-hoc (Kruskal-Wallis, p<0,011 et p<0,002 suivi de Conover-Iman). Les valeurs de carbone des mélanges initiaux ne rentrent pas dans le test statistique. mp = matériau parent ; mi = mélange initial.

La synthèse des quantités de C_{org} dégradé entre le mélange initial et le turricule de la même modalité est présentée en Figure 70. On observe qu'il y a une corrélation entre la teneur en compost et la quantité dégradée pour les modalités à deux matériaux. La modalité 100%TIT/SPP présente une valeur similaire à celle de la modalité 25%CDV-75%TIT/SPP. La modalité 100%CDV présente un taux de dégradation bas.

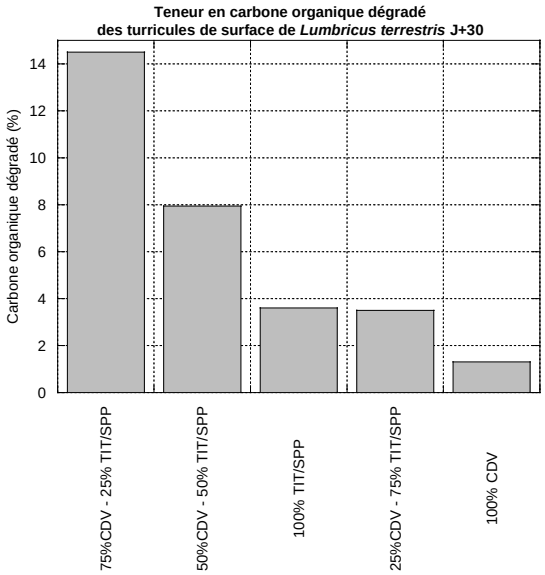


Figure 70. Pourcentage de carbone organique dégradé dans les turricules de surface de* Lumbricus terrestris *par rapport à la teneur théorique en fonction des modalités de construction de sol à t=30 jours dans l'expérience « comportement ».

1.2.3 Evaluation qualitative des galeries

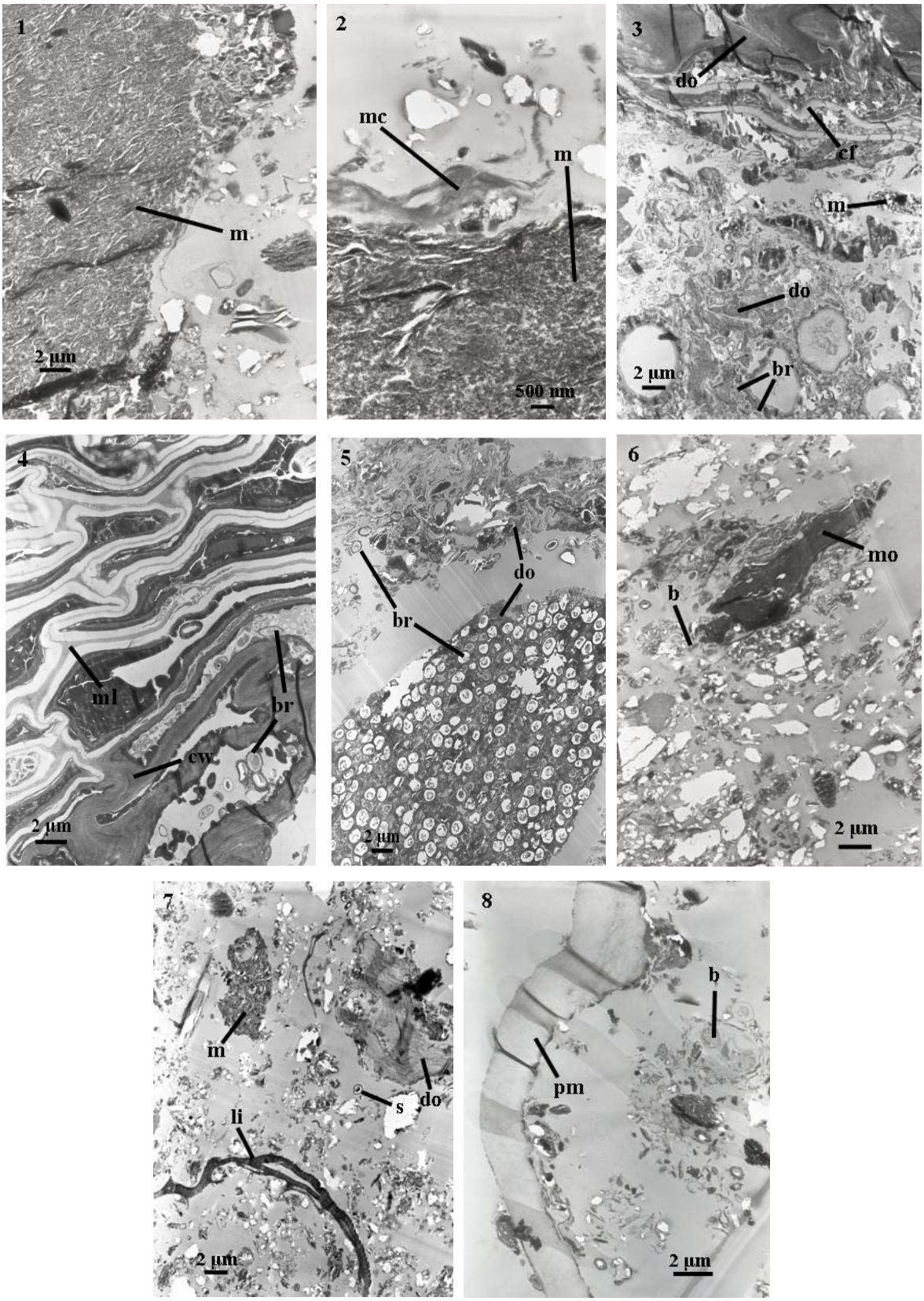
- Observations ultrastructurales des galeries (Expérience « diversité »)

Par analogie avec les observations à l'œil nu, la galerie à t=75 jours distingue deux parties distinctes visibles en observation ultrastructurale : à savoir une périphérie éloignée de la galerie essentiellement grise correspondant à du TIT/SPP (**C Lt** : **Cutane minérale**) et un tapissage (**M Lt : tapissage organique**) en périphérie proche de la galerie plutôt noire de matière organique provenant du CDV (Figure 108). Entre les deux, une partie plus ou moins dispersée contient des éléments des deux types de matériaux (**I Lt : Interface organo-minérale**) (Figure 108). La **cutane minérale** est essentiellement formée de minéraux et de quelques rares fibres cellulosiques provenant du TIT/SPP. Ces minéraux sont généralement très tassés (Figure 71.1 & Figure 71.2) et parfois de très grande taille, jusqu'à 100 microm (Figure 71.1). On observe également de grandes plages de trames fibreuses accolées tangentiellement aux éléments minéraux, qui ne s'identifient pas aux exopolymères bactériens couramment observés (Figure 71.2). Ces éléments peuvent être assimilés à du mucus (**M : Mucus**) déposé par le ver sur les parois des galeries.

L'observation ultrastructurale du **tapissage organique** (Figure 71.3) révèle des éléments bien conservés provenant du compost et similaires à ceux de la modalité témoin. On distingue de la matière organique tassée assimilable à d'anciens tissus végétaux avec des parois bien visibles (Figure 71.4), des restes tissulaires très biodégradés et non fragmentés (Figure 71.5). Ces derniers présentent aussi une activité bactérienne passée avec de nombreux résidus bactériens (Figure 71.5), similaire à celle observée dans le compost témoin.

Dans l'**interface organo-minérale**, des éléments plus fins et plus dispersés d'origines organo-minérale, organique pure, et minérales (Figure 71.6 & Figure 71.7) sont observés. On y distingue aussi des fibres organiques qui font penser à de la litière (Figure 71.7) et des morceaux de plastique caractéristiques de matériaux anthropiques (Figure 71.8).

L'agrégation est essentiellement localisée dans l'**interface organo-minérale** (Figure 71.3) comme dans la modalité témoin. Elle y est de même nature, à savoir une association entre les matières organiques en biodégradation et les parties minérales du sol pour former des microagrégats (Figure 71.9). Dans la **cutane minérale** et l'**interface organo-minérale**, l'activité bactérienne est actuelle et participe à l'agrégation comme dans l'interface de la modalité témoin (Figure 71.9) avec cependant une activité plus élevée (Figure 71.10). Dans le **tapissage organique**, l'activité est similaire à celle du compost témoin.


1
m
2 µm
2
mc
m
500 nm
3
do
cf
m
do
br
2 µm
4
ml
br
cw
2 µm
5
do
br
2 µm
6
mo
b
2 µm
7
m
s
do
li
2 µm
8
b
pm
2 µm

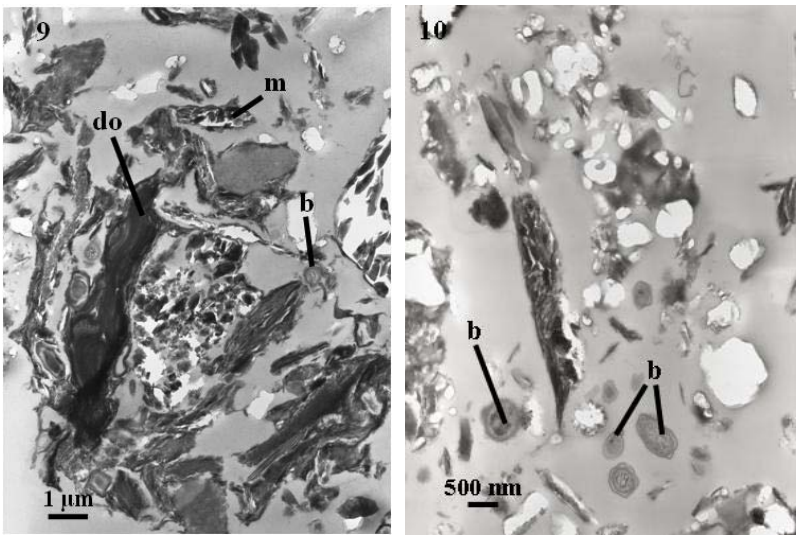


Figure 71. Micrographes de microscope électronique à transmission de la paroi d'une galerie de* Lumbricus terrestris *dans le TIT/SPP manchonnée par du CDV dans l'expérience « diversité » à t=75 jours. 1: cutane minérale externe de la galerie ; 2 : mucus ; 3 : interface organo-minérale ; 4 : tissus végétaux dégradés ; 5: matière organique fine provenant de la dégradation des tissus végétaux ; 6 : vue d'ensemble de la partie dispersée du tapissage organique ; 7 : détail de la partie dispersée du tapissage organique ; 8 : élément plastique ; 9 : microagrégats organo-minéral ; 10 : bactéries vivantes. b, bactéries vivantes ; br, résidus bactériens ; pc, compose phénolique ; cf, fibre cellulosique ; cw, paroi de cellule ; do, matière organique dégradé ; el, épaississement ligneux ; li, litière ; m, minéraux ; mc, mucus ; ml, lamelle moyenne ; pm, matière plastique ; s, spore. TIT/SPP=terre industrielle traitée et sous produit papetier ; CDV=compost de déchet vert.

- Stabilité structurale des parois des galeries (Expérience « Diversité »)

La galerie qui a subi le test de stabilité est une galerie formée dans l'horizon TIT/SPP qui présentait des manchons de CDV. Elle a la même morphologie que celle observée en ultratructure. Le témoin est du sol TIT/SPP non bioturbé de cette même expérience. A t= 75 jours, la galerie et le sol témoin présentent des poids de fractions qui diminuent avec la taille des fractions. La fraction supérieure à 2mm est supérieure en poids dans la galerie que dans le sol témoin. Pour les autres fractions, la tendance est systématiquement inversée. Les différences visuelles ne sont pas confirmées par des différences significatives (Mann-Whitney unilatéral, α=5%).

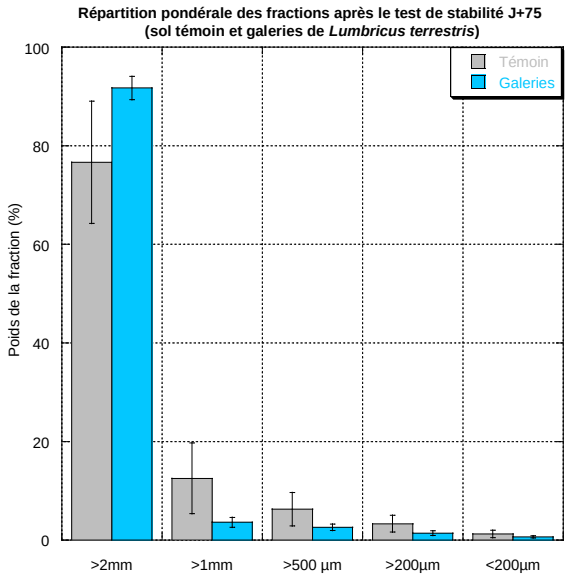


Figure 72. Répartition pondérale (moyennes et écarts-types) des fractions après le test de stabilité du sol de la modalité témoin et de la galerie de* Lumbricus terrestris *dans le TIT/SPP manchonnée par du CDV à t=75 jours dans l'expérience « diversité ». Les valeurs de stabilité du témoin et de* Lumbricus terrestris *pour chaque fraction ne présentent pas de différence statistique (Mann-Whitney (α=5%))

1.2.4 Discussion

Les résultats indiquent que l'activité du ver contribue à la pédogenèse du Technosol construit à l'échelle de l'agrégat et que la nature et l'intensité de sa contribution dépendent du procédé de construction du Technosol. Quelles que soient les modalités de construction de sols, des turricules et des galeries sont produits et quantifiables. A l'exception de la modalité 100%CDV, la production de turricules de surface augmente avec le temps. A l'inverse, la production de galeries diminue. Pour la modalité 100%CDV, la production de galeries et de turricules sont quasiment les mêmes dans le temps, du fait de la forte mortalité observée. A l'exception de la modalité 100%CDV, les résultats semblent indiquer une tendance générale du ver *L. terrestris* à explorer le profil de sol en creusant de manière intensive dans les deux matériaux pour ensuite localiser son activité plus en surface.

La production de galeries augmente avec la teneur en compost. Par ailleurs, les volumes de galeries dans le CDV et dans le TIT/SPP sont en proportion identiques. Le ver a deux modes d'action pour créer une galerie, la consommation du sol et/ou une pression mécanique de tassement (Kobel-Lamparski et Lamparski, 1987). Toutefois, on estime

que la consommation du sol est le mécanisme prépondérant de la création de la galerie. On peut ainsi penser qu'il consomme des volumes similaires des deux matériaux. Au contraire, la production massique de turricules au total et en surface augmente avec la teneur en TIT/SPP. Comment expliquer ces résultats paradoxaux entre production de galeries et de turricules ? Le C/N élevé du TIT/SPP lui confère une faible qualité trophique pour le ver. Pour une même quantité d'énergie nette assimilée, le ver ingère plus de ce matériau en masse, comparativement au compost. Les matériaux parents ont des densités qui varient du simple au double (densité (CDV sec)≈ 0,45 ; densité (TIT/SPP sec) ≈ 0,86). De ce fait, pour une même quantité d'énergie nette assimilée, le ver ingère moins de TIT/SPP que de CDV en volume. Il en résulterait que le ver creuse en volume autant dans le TIT/SPP que le CDV et qu'en termes de bilan massique, la production de turricules soit corrélée positivement à la teneur en TIT/SPP. L'assimilation du carbone ne dépend pas que du C/N mais d'autres facteurs (*e.g.* humidité). Il est à noter que dans le chapitre précédent, des variations de biomasse très fortes ont été observées dans la modalité 100% CDV, qui ont stoppé la production de galeries et de turricules. En complément, les manchons de TIT/SPP observés dans les galeries de CDV indiquent que le compost, présentait un état de sécheresse avancée, le rendant moins appétant. Deux causes peuvent être imputées à cette observation : d'une part, le compost est placé en surface et s'assèche plus vite, d'autre part, les conditions initiales d'humidification des deux matériaux font que le TIT/SPP contient plus d'eau disponible que le CDV. Le ver se protégerait ainsi de la sécheresse du CDV en manchonnant ses galeries. Cette hypothèse expliquerait le lien entre la production totale de galeries et la proportion de compost. On obtiendrait ainsi un équilibre pour la modalité 25%CDV-75% TIT/SPP dans laquelle le ver aurait assez de TIT/SPP pour se protéger (les quantités déplacées sont les mêmes pour les deux dates) tandis que pour les deux autres modalités (50 et 75% de CDV), le phénomène se poursuit. L'observation des galeries dans l'expérience « diversité » confirme cette hypothèse puisque le CDV aussi bien humidifié que le TIT/SPP a servi à manchonner les galeries de TIT/SPP. Les productions de galeries et de turricules dépendent au final, de l'humidité initiale, du C/N et de la densité des turricules (et donc en partie des matériaux).

L'observation ultrastructurale montre une plus grande quantité et une meilleure qualité de l'agrégation (fibre cellulosique, agrégats bactériens) et une plus grande diversité et

présence bactérienne dans les turricules. Par contre, la destruction rapide des turricules et la baisse de la teneur en C_{org} par rapport aux agrégats témoins diminue la stabilité structurale. Ainsi, nous n'avons pas pu conclure quant à l'effet des turricules sur la stabilité structurale à l'échelle de l'agrégatosphère.

Les turricules participent également au cycle du carbone en diminuant la quantité de C_{org} du sol. Les valeurs de C_{tot} et C_{org} sont plus faibles dans les turricules que dans le sol témoin. Le postulat de départ est que la majeure partie de la variation du C_{tot} est imputable à celle du C_{org}. La littérature indique qu'il faut bien différencier les variations de carbone liées aux processus de digestion (GAP : gut associated processes) de ceux dus à l'incorporation de matière organique par l'activité de bioturbation (NEP : nutrient enrichment processes) (Devliegher *et al.*, 1996). Dans un sol naturel, si il n'y a pas d'apport organique de surface (*e.g.* litière), il n'y a aucun enrichissement en carbone (Buck *et al.*, 1999; Zhang et Schrader, 1993) au niveau du turricule : autrement dit, le GAP + NEP = 0. Avec un apport de matière organique exogène, il y a un léger enrichissement par rapport au sol témoin, le GAP + NEP >0. Par ailleurs, cette même littérature démontre que (par exemple, pour le NO_3-N lixivié dans le sol par le turricule) le GAP est négatif et l'enrichissement global observé n'est consécutif qu'au NEP qui contrebalance le GAP négatif (Devliegher *et al.*, 1996). Dans les modalités avec 100% de matériau brut (100% CDV et 100% TIT/SPP), dans lesquelles le NEP est égal à 0 car on est dans un matériau homogène sans apport organique de surface, le GAP est négatif puisqu'une consommation relative de C_{org} est observée par rapport au témoin. Le ver de terre engendre donc une perte de carbone imputable au GAP.

Pour les modalités à deux matériaux, si on considère que les turricules sont formés par les deux matériaux en proportion identique par rapport au mélange initial, alors on considère que le NEP est égal à 0. Dans ce cas, la perte de matière organique ne peut être imputée qu'au processus de digestion (GAP) et on aboutit à la même conclusion que précédemment. Si ce n'est pas le cas, on ne peut plus décomposer les processus de digestion (GAP) d'incorporation de matière organique (NEP). Dans cette hypothèse, la perte de matière organique des turricules des modalités à deux matériaux peut être imputée au GAP mais aussi au fait que les turricules présentent, en masse, plus de TIT/SPP que de CDV par rapport aux proportions initiales du Technosol (NEP). Si on

considère que le ver ingère des volumes identiques des deux matériaux et que les turricules produits ont des densités différentes comme pour les matériaux parents, alors le ver ingère en masse plus de TIT/SPP que de CDV. La teneur en carbone des turricules est alors directement diminuée dans des modalités à deux matériaux par rapport au sol initial. La littérature précise que la digestion de *L. terrestris* dépend essentiellement de l'implication des microorganismes dans ce processus (Lavelle et Spain, 2001). Or l'humidité et la teneur en carbone du matériau jouent sur la présence et l'abondance des microorganismes (Buck *et al.*, 1999). Dans la modalité 100%TIT/SPP l'humidité du matériau est suffisante pour la survie du ver et dans la modalité 100% CDV elle est insuffisante. Or, l'assimilation est plus forte dans la modalité 100%TIT/SPP que pour la modalité 100% CDV. L'état hydrique du système peut être mis en relation avec le taux d'assimilation de C_{org}. Toutefois, cette hypothèse n'explique pas les fortes valeurs d'assimilation des modalités à 50 et 75% de compost pour lesquelles le taux d'assimilation aurait du être bas, puisque dans ces modalités on a démontré que le ver n'avait pas assez de TIT/SPP pour se protéger suffisamment de la sécheresse. Ainsi, pour les modalités à 50 et 75% de compost, même si les matériaux ne sont pas aussi bien humidifiés que dans la modalité à 25% de compost, la valeur d'assimilation est plus forte car le ver a ingéré plus de compost qui présente plus de C_{org} assimilable. Les microorganismes peuvent influencer cette teneur en C_{org} assimilable : en effet, le turricule provenant de la modalité avec du compost présente une plus grande diversité de morphologie bactérienne et un plus grand nombre de microorganismes. Enfin, pour la modalité 100% compost, l'hypothèse serait que la sécheresse du matériau a empêchée toute assimilation, malgré la bonne qualité trophique du matériau. Les différences d'assimilation de C_{org} dans les turricules selon les modalités dépendent de l'état hydrique et trophique des turricules. Ceci voudrait également signifier que si les NEP existent, ils peuvent modifier indirectement le GAP du fait de ces différences d'assimilation de carbone du ver selon l'humidité et le carbone assimilable des matériaux.

En conclusion, les turricules présentent systématiquement une perte globale de matière organique par rapport au témoin et le GAP est négatif dans tous les cas. Les NEP sont soient nulles soient inférieurs à 0 sans qu'il ne soit possible de confirmer l'une ou l'autre

des hypothèses du fait de la complexité des interactions (teneur en carbone, densité, volume ingérée en proportion, humidité).

En ce qui concerne les galeries, même si le test de la stabilité des parois n'a pas montré de différence significative, il semblerait que la galerie augmente légèrement la stabilité de l'agrégation. Ceci a été observé en sol naturel (Lee et Foster, 1991). Dans notre cas, le sol témoin présente un écart-type important. On a observé en effet une grande variabilité de taille dans les agrégats stables à l'eau et ceci d'autant plus que la fraction observée est grande. Le test étant basé sur une répartition pondérale, cette variabilité de taille a pu fortement contribuer à la variabilité de la mesure. Ceci traduit néanmoins l'hétérogénéité du sol et sa capacité sans faune à engendrer des agrégats stables. On aurait tendance à penser que cette variabilité de comportement d'agrégation est en grande partie due à une répartition de la matière organique (fibres cellulosiques) hétérogène. En reliant ces résultats aux observations ultrastructurales, on peut affirmer qu'il semblerait que ce soit la **cutane minérale** par sa compaction et son mucus qui soit responsable de cette plus forte stabilité. A l'opposé, le **tapissage organique** ne présente pas plus de structures organo-minérales visibles que le sol témoin, qui pourraient expliquer cette différence légère de stabilité. L'effet global sur la stabilité est ainsi nuancé. Concernant le cycle du carbone et de l'azote, il n'y a pas eu de mesures effectuées sur les galeries. Il est connu que les parois de galeries sont également des lieux plus riches en carbone, en azote (Jégou *et al.*, 2001). Toutefois, ceci est vrai uniquement dans un sol naturel. Dans notre cas, les teneurs en carbone ont pu être augmentées par un tapissage de compost et/ou de mucus ou diminuées par un tapissage de TIT/SPP, ce qui correspond aux NEP. La digestion du ver et les observations ultrastructurales montrent par ailleurs une activité bactérienne plus élevée qui pourrait avoir diminué les teneurs en carbone et augmenté les teneurs en azote des parois, ce qui correspond aux GAP. La modification des teneurs en carbone et en azote est intimement liée à la nature du matériau constitutif de la galerie et à la présence ou non de tapissage.

La conclusion majeure à l'échelle de l'agrégatosphère, est que le ver épi-anécique *L. terrestris* contribue par son activité aux processus pédogénétiques. L'intensité et la nature de sa contribution sont intimement liées au procédé de construction de sol du Technosol (Tableau 14).

Tableau 14. Conclusions de l'influence du procédé de construction du Technosol construit sur l'effet de **Lumbricus terrestris** *sur la pédogenèse*

Formulation	***Contraintes sur le ver***	***Conséquences sur la contribution du ver aux processus***
Nature des matériaux	Nature de la qualité trophique	Production de galeries
	Nature de comportement hydrique	Production de turricules
Proportion des matériaux	Quantité de ressources trophiques	Localisation des galeries et des turricules
	Quantité d'eau	Qualité des turricules
Formulation des matériaux (organisation, localisation)	Dynamique des ressources trophiques	Qualité des galeries
		Sens du déplacement de matériau du plus humide au moins humide
	Dynamique des ressources hydriques	Volume de matériau humide déplacé
		Localisation du transport de matériau humide

2 Contribution de *Lumbricus terrestris* à la pédogenèse du Technosol construit : échelle du pédon

2.1 Contribution de *Lumbricus terrestris* à l'échelle du cosme

2.1.1 Effets de *Lumbricus terrestris* sur l'enfouissement de la litière

La disparition de la litière à la surface du sol avec *L. terrestris* (Figure 73b) par rapport au sol témoin sans faune (Figure 73a) s'explique à la fois par le déplacement physique des brins de litière dans les galeries (Figure 74a & Figure 74b) et par une dégradation chimique (Figure 74b) visible sur les brins de litière partiellement engagés dans les galeries ou constitutifs des « middens » (Figure 74c).

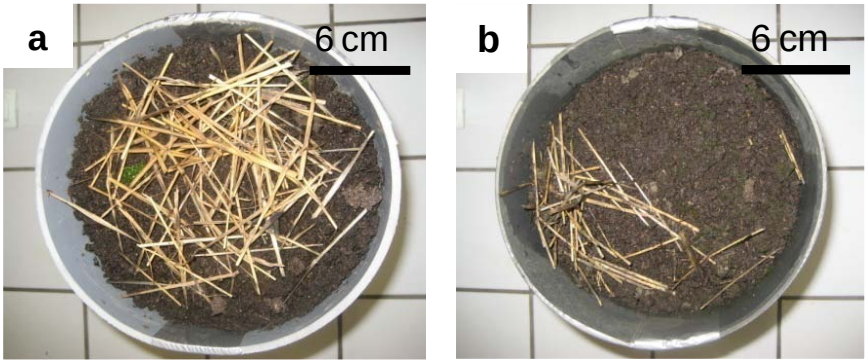


Figure 73. Observations à la surface des cosmes, a : de la modalité témoin, b : de la modalité avec* Lumbricus terrestris*, à t=75 jours dans l'expérience « diversité ».

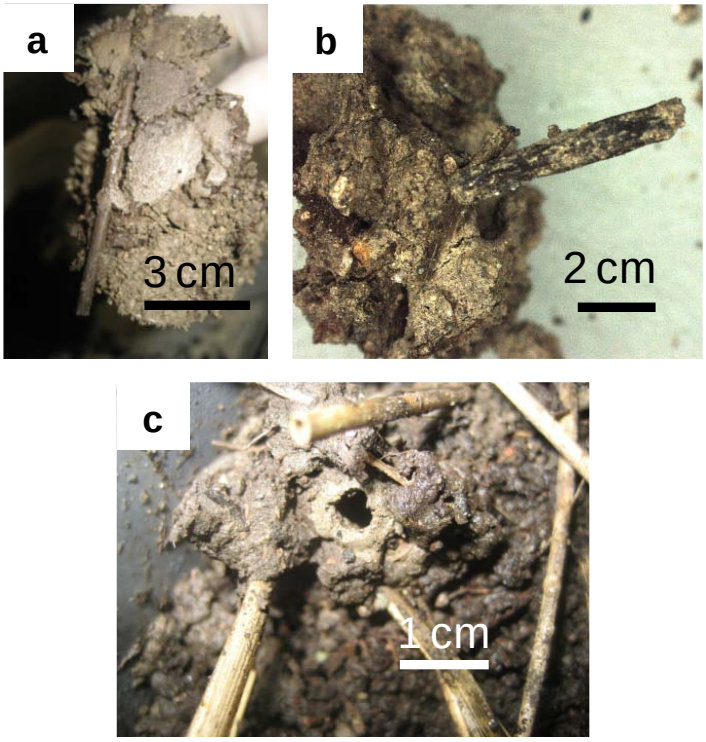


Figure 74. Observations visuelles, a : d'un morceau de litière entraîné dans une galerie de* Lumbricus terrestris*, c : d'un morceau de litière dégradé dans une galerie de* Lumbricus terrestris*, c : d'un « midden » de* Lumbricus terrestris*, t=75 jours dans l'expérience « diversité ».

La moyenne de la masse finale de litière (Figure 75) présente en surface est significativement plus élevée pour le témoin sans faune que pour la modalité avec *L. terrestris*, sans distinguer la dégradation physique (fragmentation et déplacement) de la dégradation chimique.

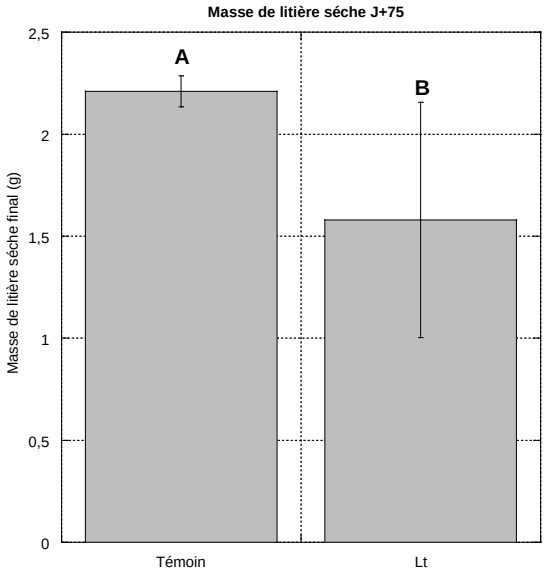


Figure 75. Masse de litière disparue (moyennes et écarts-types) de la surface du sol de la modalité témoin et de la modalité avec* Lumbricus terrestris *à t=75 jours dans l'expérience « diversité ». Les lettres indiquent les résultats du test statistique (Mann-Whitney unilatéral, p=0,05).

2.1.2 Effets de *Lumbricus terrestris* sur le cycle du carbone

Aucune différence significative n'est observée sur les C_{tot} et C_{org} (Figure 76 & Figure 77) entre la modalité témoin et la modalité renfermant *L. terrestris*, quel que soit l'horizon considéré. *L. terrestris* induit une tendance à la baisse.

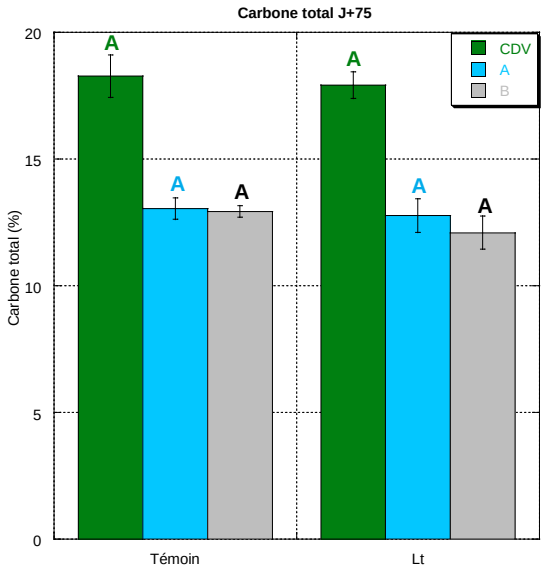


Figure 76. Teneur en carbone total (moyennes et écarts-types) aux trois horizons (CDV, A et B) de la modalité témoin et de la modalité avec* Lumbricus terrestris *à t=75 jours dans l'expérience « diversité ». Les lettres indiquent les résultats des tests statistiques (Mann-Whitney, p=0,50 en vert, p=0,50 en bleu et p=0,09 en gris).

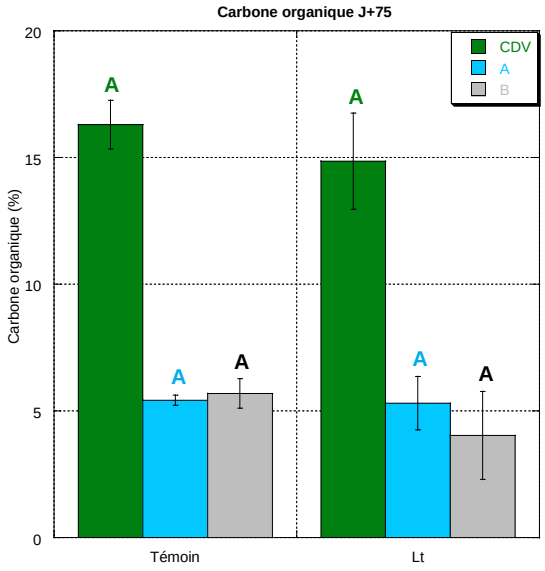


Figure 77. Teneur en carbone organique (moyennes et écarts-types) aux trois horizons (CDV, A et B) de la modalité témoin et de la modalité avec* Lumbricus terrestris *à t=75 jours dans l'expérience « diversité ». Les lettres indiquent les résultats des tests statistiques (Mann-Whitney, p=0,33 en vert, p=0,61 en bleu et p=0,09 en gris).

Par ailleurs, l'horizon B présente la plus forte perte (Tableau 15). Toutefois, aucune différence significative n'est observée.

Tableau 15. Pertes de carbone organique des trois horizons (CDV, A et B) de la modalité avec* Lumbricus terrestris *en pourcentage du carbone organique du témoin et en pourcentage total à t=75 jours dans l'expérience « diversité ».

	CDV	*A*	*B*
Pertes par rapport au témoin ($g.kg^{-1}$)	1,44	0,12	1,7

2.1.3 Effets de *Lumbricus terrestris* sur la stabilité du sol

Aucune différence de répartitions de fractions pondérales entre la modalité témoin et la modalité *L. terrestris* n'est observée, quel que soit l'horizon considéré (Figure 78).

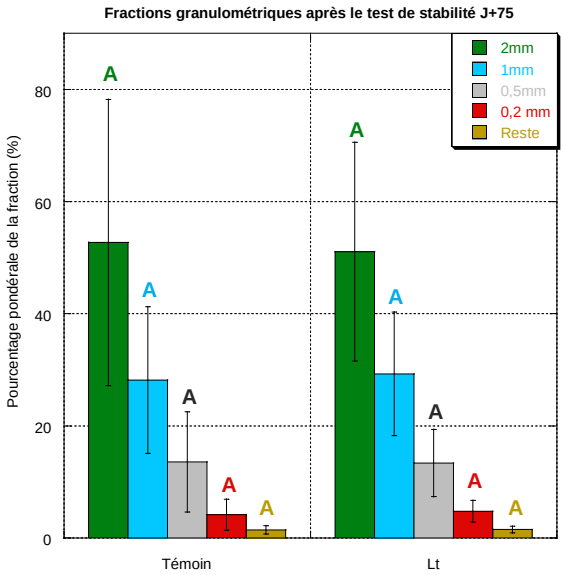


Figure 78. Répartition pondérale des fractions de l'horizon B (moyennes et écarts-types) après le test de stabilité du sol de la modalité témoin et de la modalité avec* Lumbricus terrestris *à t=75 jours dans l'expérience « diversité ». Les lettres indiquent les résultats des tests statistiques (Mann-Whitney unilatéral, p=0,77 en vert, p=0,81 en bleu, p=0,77 en gris, p=0,77 en rouge et p=0,77 en jaune).

2.1.4 Discussion

Globalement, l'effet de *L. terrestris* est moins net à l'échelle du cosme qu'à l'échelle de l'agrégat. La seule différence significative qui ressort de l'ensemble de l'étude en cosme est une disparition de litière plus forte lorsque *L. terrestris* est présent. L'activité de déplacement de litière dans le sol et dans les « middens » est connue (Brown *et al.*, 2000). Ces structures jouent le rôle de « rumen externe » (Swift *et al.*, 1979) qui stimule

la dégradation microbienne de la litière non ingérée, des fragments organiques et des turricules proches, augmentant leur palatabilité pour le ver, mais aussi abaissant le C/N.

Une consommation de C_{org}, non significative, dans le sol influencé par *L. terrestris* par rapport au témoin est décelable pour les trois horizons. Les différences ne sont pas aussi prononcées que pour l'échelle de l'agrégatosphère. Deux hypothèses sont alors envisageables. Soit, l'effet observé à l'échelle de l'agrégatosphère replacé à l'échelle du pédon est dilué, soit, l'effet est inférieur en intensité et est compensé par des phénomènes d'enrichissement (NEP) du fait de l'enfouissement de la litière en profondeur. Dans la réflexion à l'échelle de l'agrégatosphère, les phénomènes d'enrichissement (NEP) ne contrebalançaient pas la perte de la digestion du ver (GAP) au niveau des turricules (expérience « comportement »). Toutefois, dans l'expérience « diversité », une hypothèse peut être que cet apport est responsable d'une moindre perte de C_{org} par incorporation de la litière et de ses produits de dégradation. Nous avons observé en ultrastructure que des éléments de litière avaient été incorporés aux parois des galeries. Toutefois, nous avons tendance à penser que sur une durée courte d'expérience (75 jours), la litière apportée ne soit pas responsable de cette compensation. La première hypothèse doit être privilégiée : l'effet est dilué dans la colonne de sol. Dans tous les cas, la conséquence est une légère diminution du stock de carbone du Technosol construit. Par ailleurs, il y a une localisation préférentielle de la dégradation de la matière organique par *L. terrestris*. En effet, c'est l'horizon B qui présente la plus forte proportion de dégradation comparativement aux horizons CDV et A, même si le CDV présente la plus forte valeur absolue, car le CDV est un matériau de meilleure qualité trophique.

Les agrégats de sol de la modalité avec ou sans *L. terrestris* présentent une stabilité identique. Les gros macroagrégats présents dans des échantillons de témoin traduisent la capacité du sol sans faune à engendrer des agrégats stables et l'hétérogénéité de la répartition de la matière organique. Pour le sol avec *L. terrestris*, on aurait pu s'attendre à une modification de la stabilité après mise en évidence à l'échelle de l'agrégatosphère que les galeries étaient légèrement plus stables. Si nous n'avons pas cette certitude pour les turricules (diminution de la teneur en carbone), les observations ultrastructurales suggèrent une meilleure agrégation dans les structures biogéniques. Il

n'y a cependant pas d'effet résultant à l'échelle du cosme. Deux hypothèses sont alors envisageables. Soit l'effet combiné de la production de galeries et de turricules a un léger effet positif sur la stabilité, mais est dilué dans le sol ; soit, l'effet combiné des galeries et des turricules est nul ou légèrement négatif. La littérature précise que la stabilité des turricules par rapport au témoin dépend fortement de la capacité du sol à répondre à une perturbation physique (Schrader et Zhang, 1996) qui est très liée a sa teneur en matière organique. Le Technosol construit présente une forte teneur en matière organique qui lui confère un très fort « pouvoir tampon » vis-à-vis des perturbations physiques. Ce terme de « pouvoir tampon » est employé par analogie avec le terme utilisé pour caractériser la faible variation de pH d'une solution par ajout d'acides ou de bases. Les structures biogéniques n'induiraient alors qu'un réarrangement de particules sans effet sur la stabilité du sol.

En conclusion, l'effet du ver à l'échelle du cosme est bien moins marqué qu'à l'échelle de l'agrégat. En dehors de la disparition de litière, seules des tendances sont décelables, qui confirment les observations à l'échelle de l'agrégat : le ver engendre une diminution du C_{org}. En outre, malgré la meilleure stabilité des galeries par rapport au sol témoin, les structures biogéniques ont un effet neutre à légèrement négatif sur la stabilité. En ce qui concerne le cycle du carbone, l'objectif sera d'éclairer les résultats avec ceux obtenus sur les solutions du sol des lysimètres. Le sol témoin tamisé à 2mm présente une forte stabilité difficilement modifiable par l'activité du ver. En conditions de terrain, un effet du ver sur la stabilité du Technosol pourrait exister, étant donnée la plus forte charge en éléments grossiers du sol.

2.2 Contribution de *Lumbricus terrestris* à l'échelle du lysimètre

2.2.1 Mesures de la biomasse aérienne de la végétation à la surface des lysimètres

Le lysimètre « nu » a été régulièrement désherbé. La végétation du lysimètre « faune » est plus dense que celle du lysimètre « végétation » (Figure 79).

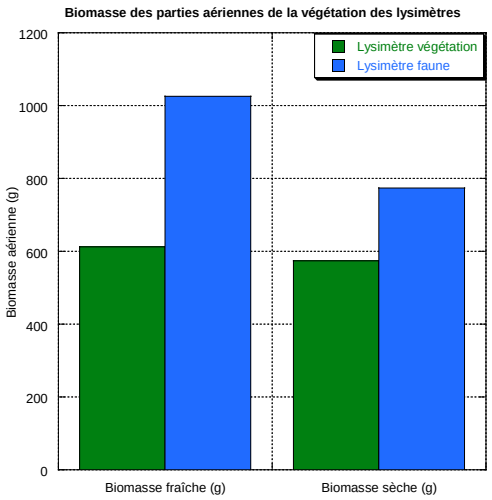


Figure 79. Biomasses aériennes fraîche et sèche (g) de la végétation à la surface des lysimètres « végétation » et « faune » en juin 2010.

2.2.2 Dynamique de transfert de l'eau

Les hauteurs d'eau présentent des augmentations lors des périodes hivernales de fortes pluies (Figure 80). Pour le lysimètre « nu », la hauteur d'eau croît jusqu'à juillet 2009 de manière quasi-continu et permanente et se détache des hauteurs d'eau des deux autres lysimètres à partir d'avril 2008, après le semis et avant l'inoculation de faune. Les hauteurs d'eau du lysimètre « végétation » et du lysimètre « faune » sont similaires et représentent au maximum 80% et 70% respectivement de la valeur du lysimètre « nu » en juillet 2009. Le plateau du lysimètre « faune » s'arrête en décembre 2008 et celui du lysimètre « végétation » en février 2009. Dans les deux cas, les hauteurs d'eau augmentent à nouveau, et semblent atteindre un nouveau plateau plus tôt pour le lysimètre « végétation » que pour le lysimètre « faune ». Il est à noter que la valeur de la hauteur d'eau est légèrement plus importante (10% au maximum) pour le lysimètre « faune » que pour le lysimètre« végétation ». Cette différenciation débute avant l'inoculation de faune.

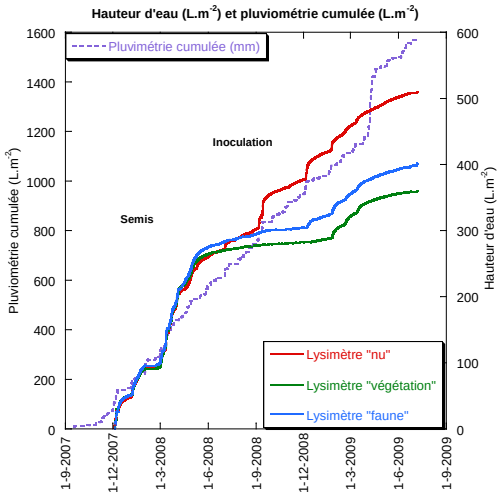


Figure 80. Evolution de la hauteur d'eau des percolats des lysimètres et de la pluviométrie au cours du temps.

A 50cm de profondeur, les valeurs d'humidité volumique (Figure 80) sont similaires pour les trois lysimètres jusqu'à décembre 2008, après le semis et l'inoculation. A partir de cette date, les variations du lysimètre « végétation » et du lysimètre « nu » présentent des pics (périodes hivernales). Par exemple, pour le lysimètre « végétation », l'humidité volumique monte jusqu'à 60% environ pendant 6 mois à partir de janvier 2009 pour enfin atteindre une valeur similaire à celle du lysimètre « faune ». La valeur d'humidité du lysimètre « faune » suit les fluctuations du lysimètre « végétation » mais de manière beaucoup moins prononcée. Pour le lysimètre « nu » par contre, les fluctuations sont indépendantes de celles des autres lysimètres. Il est à noter que l'humidité volumique à 50 cm de profondeur du lysimètre « faune » est légèrement plus basse que celle du lysimètre « végétation ».

A 100cm de profondeur, l'humidité volumique (Figure 81) est clairement plus élevée pour le lysimètre « nu ». Les variations de l'humidité (périodes hivernales) pour le lysimètre « nu » sont plus chaotiques que pour les deux autres. Il est à noter que l'humidité volumique à 100 cm de profondeur du lysimètre « faune » est légèrement plus haute que celle du lysimètre « végétation » et que les tendances s'inversent au cours du temps.

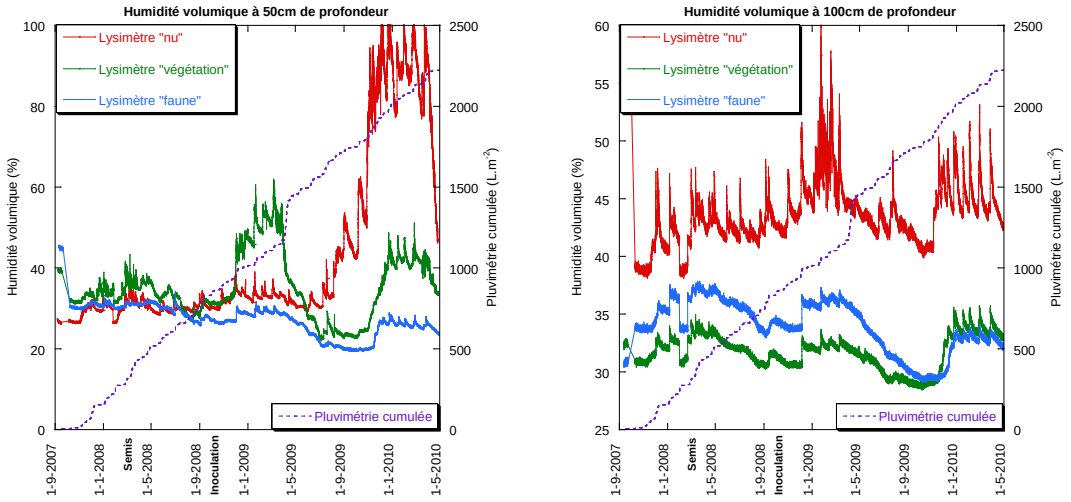


Figure 81. Evolution de l'humidité volumique à 50 cm (à gauche) et à 100 cm (à droite) des lysimètres et de la pluviométrie au cours du temps.

2.2.3 Dynamique de transfert des éléments

2.2.3.1 Les percolats

Les concentrations de C_{tot} et de C_{org} présentent des valeurs très similaires entre lysimètres (Figure 82) et assez stables dans le temps.

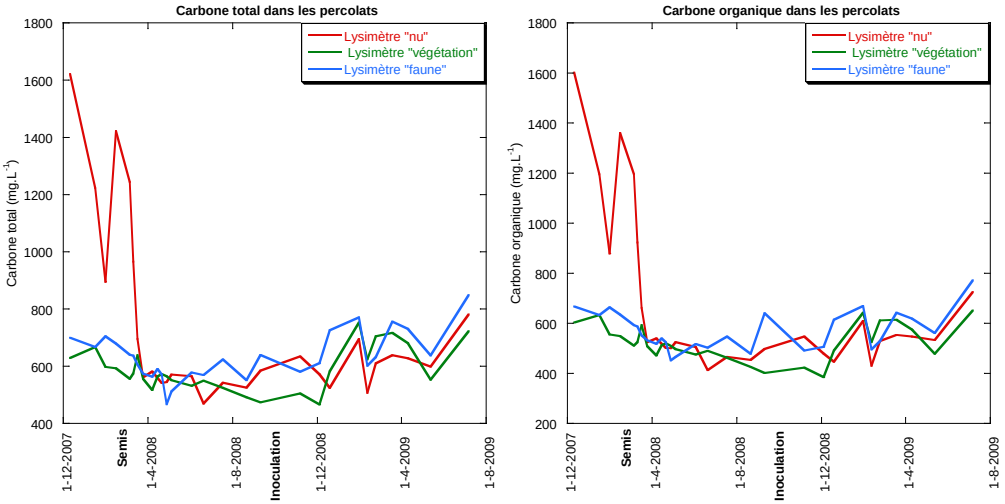


Figure 82. Evolution des concentrations en carbone total (à gauche) et en carbone organique (à droite) dans les percolats des lysimètres au cours du temps.

Les concentrations d'azote total (Figure 83) présentent des valeurs très chaotiques (alternance des saisons) et il est difficile d'observer des tendances claires entre

lysimètres. Néanmoins, les trois modalités présentent des dynamiques communes à long-terme.

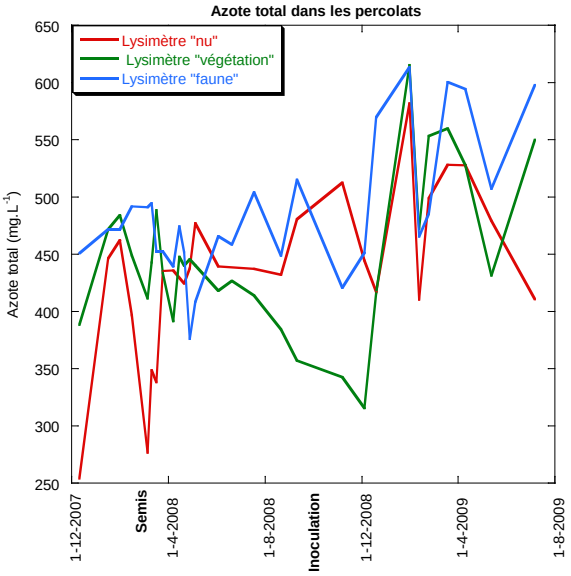


Figure 83. Evolution des concentrations en azote total dans les percolats des lysimètres au cours du temps.

Le rapport C/N (Figure 84) est plus élevé pour le lysimètre « nu » et ceci avant le semis et l'inoculation. Il a tendance à s'équilibrer avec le temps et à rejoindre les valeurs des autres lysimètres qui sont stables dans le temps. Le rapport C organique / C total est invariant (résultats non présentés).

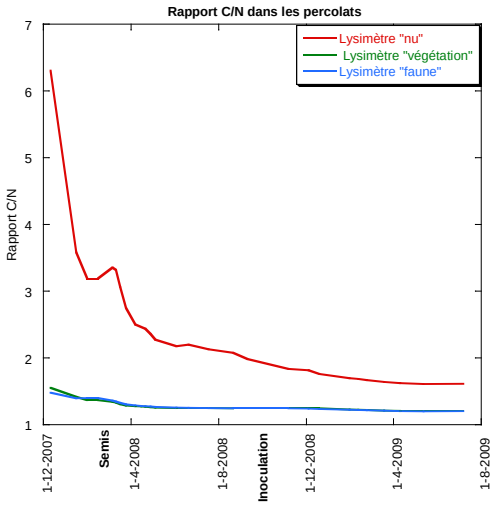


Figure 84. Rapport carbone organique/azote total dans les percolats des lysimètres au cours du temps.

Les quantités cumulées de C_{tot} et de C_{org} lixiviées (Figure 85) dans les percolats présentent des tendances similaires aux hauteurs d'eau, à savoir une augmentation quasi-continue pour le lysimètre « nu » alors que les quantités atteignent un plateau pour les deux autres lysimètres avant de se remettre à augmenter (périodes hivernales). Comme pour les hauteurs d'eau, la courbe du lysimètre « faune » s'éloigne légèrement de celle du lysimètre « végétation ». Le C_{tot} du lysimètre « végétation » et du lysimètre « faune » représentent au maximum 57% et 67% de la valeur du lysimètre « nu » et le C_{org} 56% et 66%. Le C_{tot} du lysimètre « végétation » représente au maximum 75% de la valeur du lysimètre « faune » et le C_{org} 75%.

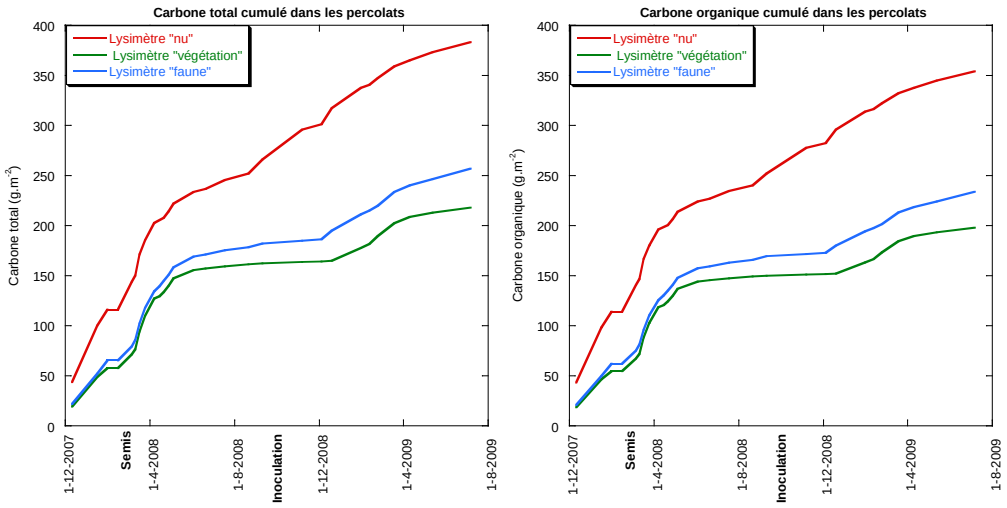


Figure 85. Quantités cumulées de carbone total (à gauche) et de carbone organique (à droite) dans les percolats des lysimètres au cours du temps.

En ce qui concerne l'azote total cumulé (Figure 86), les tendances sont similaires aux hauteurs d'eau à ceci près qu'aux premières dates, l'azote total était inférieur pour le lysimètre « nu » par rapport aux autres. L'azote total du lysimètre « nu » redevient la valeur la plus haute en septembre 2008. Comme pour les hauteurs d'eau, la courbe du lysimètre « faune » s'éloigne légèrement de celle du lysimètre « végétation ». L'azote total du lysimètre « végétation » et du lysimètre « faune » représentent au maximum 65% et 88% respectivement de la valeur du lysimètre « nu ».

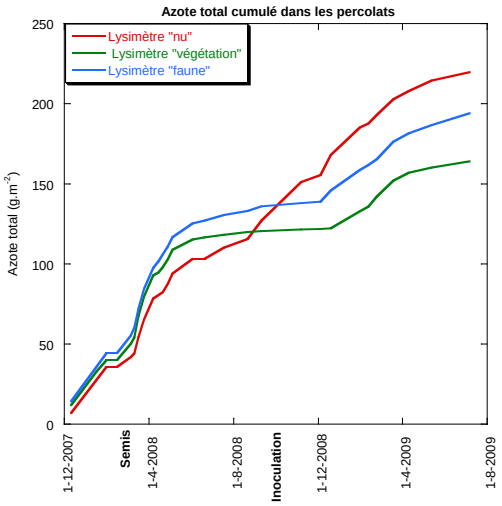


Figure 86. Quantité cumulée en azote total dans les percolats des lysimètres au cours du temps.

Les concentrations en NO_3^- et le NH_4^+ (Figure 87) suivent le schéma de la concentration en azote total. Malgré des variations chaotiques à court-terme, les tendances sont similaires à long-terme pour tous les lysimètres. Les mêmes dates de variations pour le lysimètre « végétation » sont visibles, à savoir une période de 5-6 mois de juillet 2008 à février 2009.

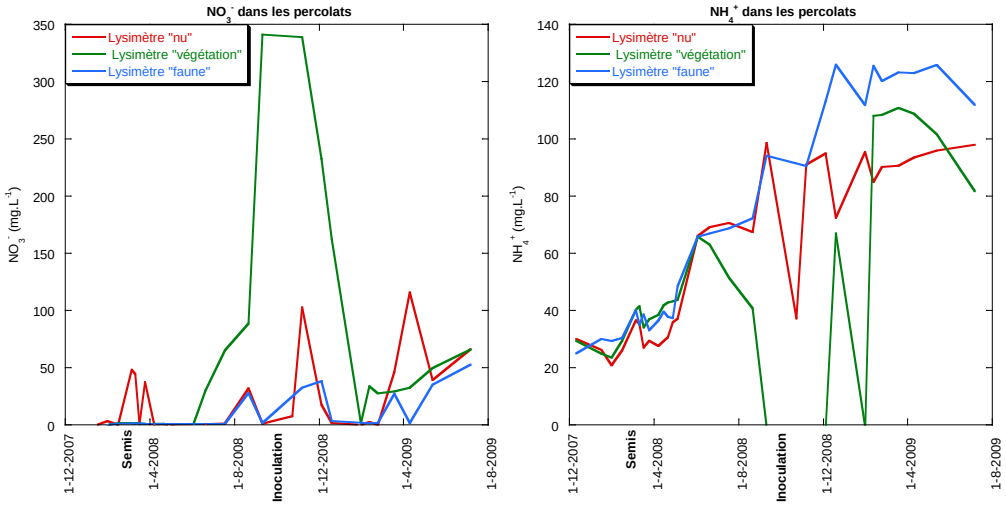


Figure 87. Concentrations en NO_3^- (à gauche) et en NH_4^+ (à droite) dans les percolats des lysimètres au cours du temps.

Concernant le NO_3^- cumulé (Figure 88), les tendances sont différentes les unes des autres selon les lysimètres et ne ressemblent pas à celle de la hauteur d'eau. Le lysimètre « nu » ne se distingue pas des deux autres lysimètres avant le semis. Par contre la différenciation des deux lysimètres «végétation » et « faune » se fait après le semis.

Avant même l'inoculation de faune, la courbe du lysimètre « végétation » s'éloigne légèrement de celle du lysimètre « faune ». Le NO_3^- lixivié du lysimètre « végétation » et du lysimètre « faune » représente au maximum 70% et 30% respectivement de la valeur du lysimètre « nu ». Le NO_3^- lixivié par le lysimètre « faune » représente 42% seulement du NO_3^- lixivié par le lysimètre « végétation ».

Pour le NH_4^+ cumulé (Figure 88), les tendances sont différentes après le semis. La valeur du lysimètre « nu » est la plus élevée. Les tendances pour les deux autres lysimètres sont inversées. Avant même l'inoculation de faune, les courbes s'éloignent plus nettement que pour le NO_3^-. Le NH_4^+ lixivié du lysimètre « végétation » et du lysimètre « faune » représente au maximum 59% et 86% de la valeur du lysimètre « nu ». Le NH_4^+ lixivié par le lysimètre « faune » représente 69% seulement du NH_4^+ lixivié par le lysimètre « végétation ».

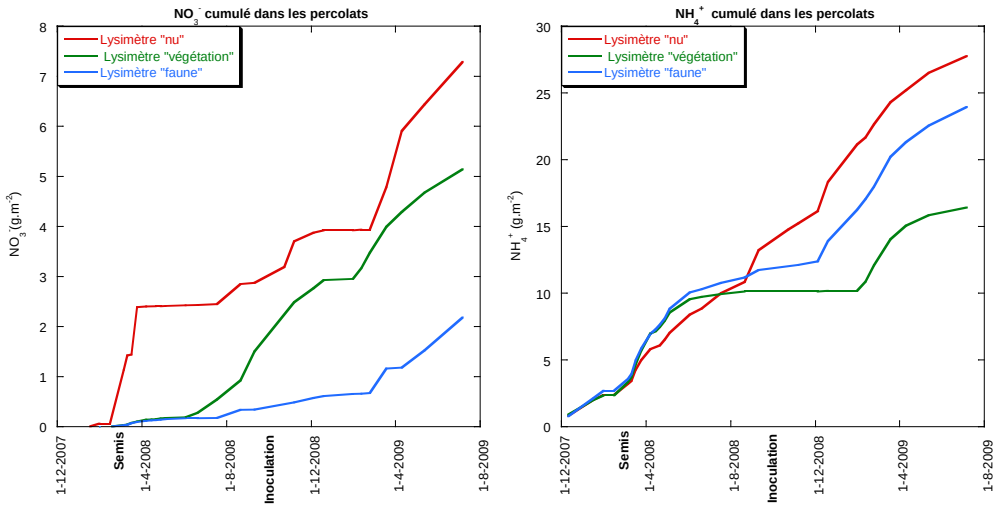


Figure 88. Evolution des quantités cumulées de NO_3^- (à gauche) et de NH_4^+ (à droite) dans les percolats des lysimètres au cours du temps.

2.2.3.2 Les bougies poreuses

Les concentrations de C_{tot} et de C_{org} lixiviés dans la solution du sol (Figure 89) à 50 cm sont plus élevées pour le lysimètre « nu ». Les lysimètres « faune » et « végétation » présentent des tendances similaires malgré quelques légères variations. Les concentrations de C_{tot} et de C_{org} lixiviés dans la solution du sol à 100 cm sont également très similaires, même si les valeurs du lysimètre « nu » sont légèrement plus élevées. Il

est à noter que pour la dernière valeur en juillet 2009, le lysimètre « faune » présente des valeurs légèrement plus élevées par rapport à celles du lysimètre « végétation ».

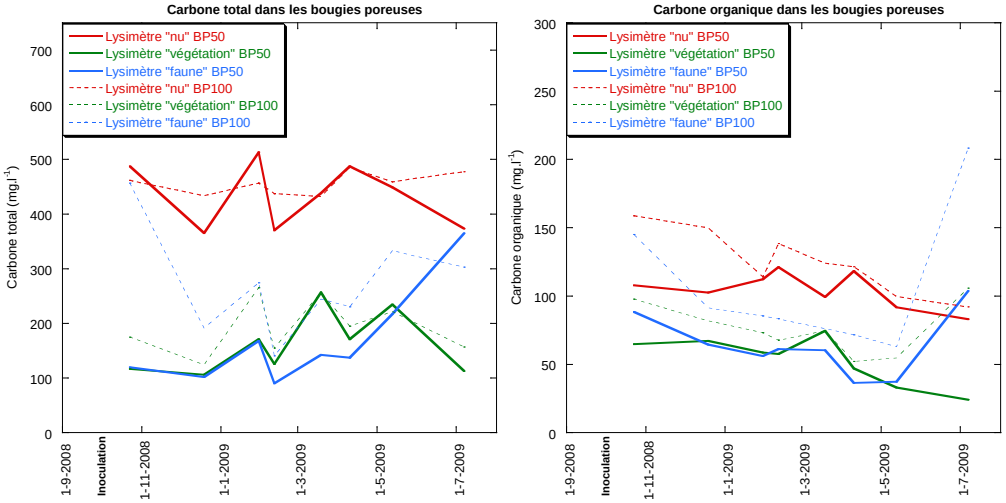


Figure 89. Evolution des concentrations en carbone total (à gauche) et en carbone organique (à droite) dans les bougies poreuses des lysimètres au cours du temps.

Les concentrations en azote total de la solution du sol sont plus basses pour le lysimètre « nu » (Figure 90). A 50 cm, les concentrations sont proches pour les lysimètres « faune » et « végétation » alors qu'à 100 cm le lysimètre « végétation » présente une plus forte concentration que le lysimètre « faune ». Il est à noter que pour la dernière valeur en juillet 2009, le lysimètre « faune » présente une chute à 50 cm et une hausse à 100 cm.

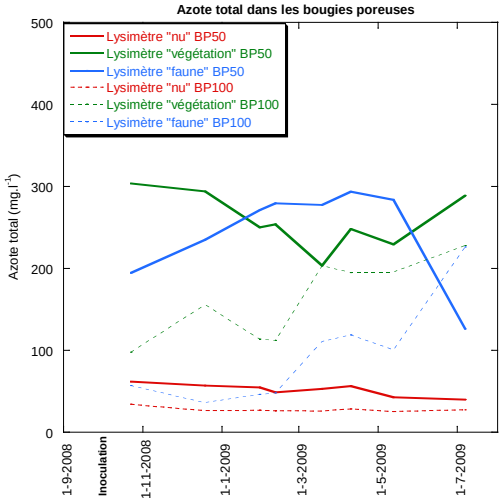


Figure 90. Evolution des concentrations en azote total dans les bougies poreuses des lysimètres au cours du temps.

Les solutions du sol du lysimètre « nu » à 50 et 100 cm présentent des concentrations très faibles en NO_3^- (Figure 91). Les solutions du sol présentent des concentrations en NO_3^- plus élevées à 50cm qu'à 100cm et elles sont toujours plus élevées pour le lysimètre « végétation » à 100cm. On a une analogie entre ces tendances et celle de l'azote total.

Pour les concentrations en NH_4^+ (Figure 91), la solution du sol du lysimètre « nu » est la seule à présenter des valeurs non nulles à 50 cm et à 100cm. Globalement la solution du sol reste pauvre en NH_4^+ pour les deux lysimètres avec de la végétation.

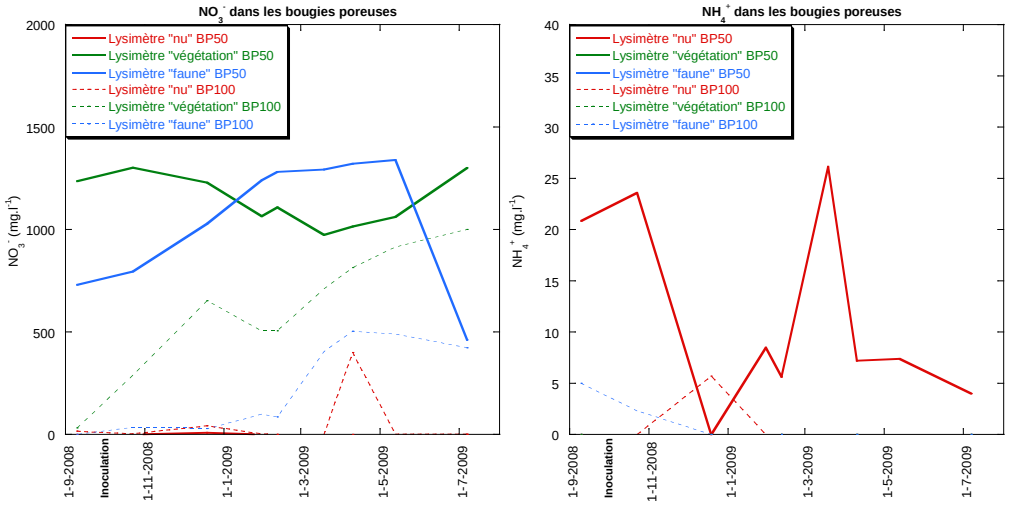


Figure 91. Evolution des concentrations en NO_3^- (à gauche) et en NH_4^+ (à droite) dans les bougies poreuses des lysimètres au cours du temps.

2.2.4 Discussion

La discussion concerne essentiellement la comparaison des lysimètres « végétation » et « faune » qui permettra d'expliquer l'effet net de la faune en présence de végétation sur les transferts d'eau et d'éléments à l'échelle du pédon. Toutefois, nous comparerons également ces lysimètres avec le lysimètre « nu » afin de décomposer les mécanismes liés à la faune ou à la végétation.

En conformité avec la littérature, les observations de la végétation prouvent que la faune a un effet positif sur la production de biomasse. Le ver a une double action qui est d'augmenter la disponibilité de l'azote pour les plantes (Scheu, 2003) et/ou d'avoir un effet positif sur la croissance des plantes par l'intermédiaire d'hormones (Tomati *et al.*, 1988).

Concernant la dynamique hydrique, une distinction s'effectue entre le lysimètre « nu » qui progressivement percole plus que les lysimètres « faune » et « végétation », certainement en lien avec l'évapotranspiration. Après l'inoculation de faune, cette tendance se poursuit sans provoquer de différence nette entre les lysimètres « faune » et « végétation » qui présentaient des comportements hydriques différents avant l'inoculation de la faune du sol. La faune provoquerait néanmoins une légère diminution de la percolation au cours du temps (Figure 92).

Un assèchement relatif du profil après l'inoculation de la faune est également décelable à 50 cm (pour valider entièrement cette hypothèse, il aurait fallu observer des pics d'augmentation pour les deux lysimètres « faune » et « végétation » avant l'inoculation de la faune) et à 100cm de profondeur (Figure 92).

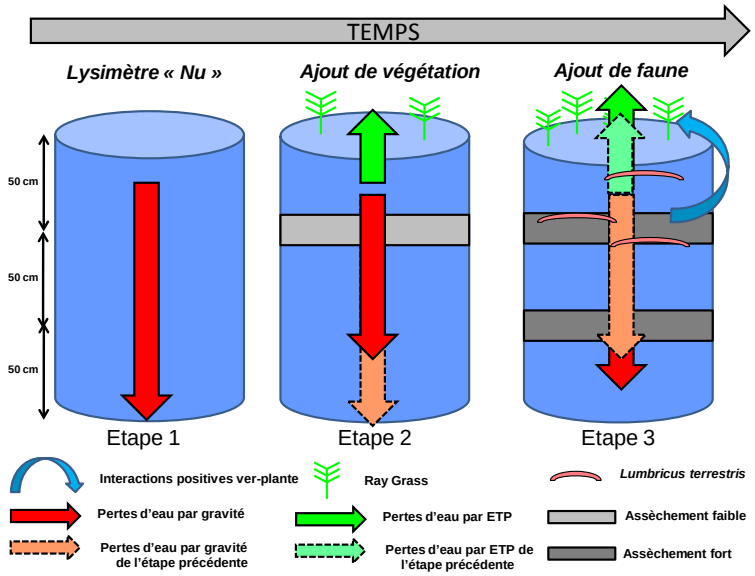


Figure 92. Schéma récapitulatif du fonctionnement hydrique des lysimètres nu, après ajout de végétation et après ajout de faune (ETP = évapotranspiration).

Si on considère que les différences observées sont engendrées par la présence de faune, on peut raisonner sur les mécanismes impliqués. Le lysimètre « faune » présente plus de biomasse aérienne que le lysimètre « végétation ». L'assèchement relatif à 50 cm de profondeur peut ainsi être consécutif à une prise d'eau plus importante par les racines sur ce lysimètre. Mais cette hypothèse ne suffit pas à expliquer, d'une part l'appauvrissement relatif en eau à 100cm et d'autre part, l'éloignement des volumes percolés dans le temps. Il est possible que le ver, par sa production de galeries entraîne

en masse de l'eau en profondeur. Cette hypothèse expliquerait à la fois le plus grand volume percolé du lysimètre « faune » par rapport au lysimètre « végétation » et les valeurs d'humidité volumiques moins élevées à 50cm et à 100cm. L'effet observé serait à la fois consécutif à une plus intense percolation et à un plus grand prélèvement d'eau par les plantes. Par ailleurs ces résultats sont en accord avec la littérature qui met en évidence un effet d'assèchement du sol par *L. terrestris* de 10 à 40 cm de profondeur (Ernst *et al.*, 2009).

Concernant le transfert de carbone et d'azote total, au niveau des percolats, les concentrations sont identiques et les quantités lixiviées suivent les tendances des hauteurs d'eau. Les dynamiques d'altération du carbone et de l'azote ne semblent pas être modifiées directement ni par la présence de végétation, ni par l'inoculation de faune. Elles semblent liées à un effet indirect de la dynamique hydrique du profil de sol. Le lysimètre « nu » présente les plus grandes quantités lixiviées. Il y a donc une perte conséquente de carbone et d'azote en absence de végétation. La végétation, par l'évapotranspiration majoritairement, diminue le volume des percolats. Par contre, si on ajoute de la faune, l'effet est similaire à celui observé sur les transferts d'eau, à savoir que la différence entre les valeurs de carbone lixivié des lysimètre « faune » et « végétation » augmente dans le temps. En modifiant le statut hydrique du sol, soit par ses galeries, soit par le déplacement de matière consécutive à un déplacement mécanique ou aux turricules excrétés, la faune augmente le volume des percolats et indirectement la perte de carbone et d'azote. De plus, on a vu qu'à l'échelle du cosme et de l'agrégat, le ver engendrait une perte de C_{tot} due à une disparition de C_{org}. On peut ainsi penser qu'à la profondeur de 50cm, il y ait une double influence : à la fois une augmentation de percolation qui entraîne une lixiviation de carbone et une diminution du pool de carbone potentiellement lixivié consécutivement à l'activité du ver. Cette deuxième contribution serait négligeable par rapport à l'effet de l'eau.

On note un effet net de la végétation sur les concentrations en carbone et azote dans la solution du sol. Il semblerait que les concentrations en carbone et azote soient liées à l'état hydrique du sol. Les concentrations de la solution du sol sont les plus élevées à 50 et à 100 cm de profondeur pour le lysimètre « nu », profondeurs qui présentent les plus fortes valeurs d'humidité relative. Pour les deux autres lysimètres, les valeurs

d'humidité volumique sont corrélées aux concentrations. Ainsi, la solution du sol pour le lysimètre «faune » à 50 cm présente une concentration plus basse que celle du lysimètre « végétation » à 50 cm. Ceci est vrai entre deux lysimètres à une profondeur donnée mais aussi entre deux profondeurs d'un même lysimètre. Ce lien entre statut hydrique et concentration n'est pas toujours cohérent dans le temps. Il semblerait toutefois que globalement la concentration de la solution du sol en carbone soit corrélée positivement avec l'humidité massique. Les différences de lixiviation de carbone du aux hauteurs d'eau différentes seraient alors légèrement réduites. La teneur en azote dans les bougies poreuses est par contre inversement corrélée à la teneur en eau. Les différences de lixiviation dues aux hauteurs d'eau différentes seraient alors légèrement amplifiées. Le rapport C/N entre les deux lysimètres « végétation » et « faune » est identique, ce qui confirme les conclusions sur le fait que la faune n'agit pas directement sur la dynamique du cycle du carbone et de l'azote mais via les changements hydriques.

Pour le NO_3^- et le NH_4^+, ni le semis, ni l'inoculation de faune n'engendrent de modifications de concentrations. Par contre, il est à noter que la quantité de NH_4^+ lixivié est trois fois plus élevée que celle de NO_3^-. Les percolats sont donc majoritairement constitués de NH_4^+. Les quantités lixiviées de NH_4^+ reflètent un léger effet de la végétation puisque le lysimètre « nu » se détache des deux autres lysimètres après le semis. Par ailleurs, au fil du temps, la valeur du lysimètre « faune » s'éloigne légèrement de celle du lysimètre « végétation ». Les courbes miment donc celles de la quantité d'azote total lixivié dans les percolats. Les quantités lixiviées de NO_3^- ne peuvent pas être imputées à la végétation et/ou à la faune, puisque les lysimètres se différencient avant le semis et/ou l'inoculation. Les variations de quantités lixiviées de NH_4^+ peuvent être également expliquées par la dynamique hydrique du système.

Les concentrations de la solution du sol en NO_3^- des lysimètres « faune » et « végétation » ont des profils similaires à celles de l'azote total et celle du lysimètre « nu » sont quasi-nulles. Les tendances sont inversées pour le NH_4^+ à savoir que les concentrations sont quasi-nulles pour les lysimètres « faune » et « végétation » et décelables pour le lysimètre « nu ». On peut donc affirmer que la solution du sol est formée en majeure partie de NO_3^- pour les lysimètres « faune » et « végétation » et de NH_4^+ pour le lysimètre « nu ». Ceci peut être par exemple consécutif à l'assèchement du

profil par la végétation et par la faune. Par ailleurs, les profils de concentrations en NO_3^- des lysimètres « faune » et « végétation » étant similaires à ceux de l'azote total de la solution du sol, on peut proposer la même hypothèse.

En conclusion, on peut affirmer que la végétation joue un rôle direct sur la dynamique hydrique du système. Par des mécanismes tels que l'évapotranspiration, elle limite la perte d'eau par percolation et assèche relativement le sol en profondeur. En diminuant la percolation et les humidités volumiques en profondeur, la végétation diminue indirectement les quantités de carbone et d'azote (dont NH_4^+) lixiviés, appauvrit la solution du sol en carbone et en ions NH_4^+ à 50 et à 100 cm et enrichit la solution du sol en azote et avec des ions NO_3^- à 50 et à 100 cm. Le ver de terre *L. terrestris,* en association avec la végétation, a tendance à augmenter la hauteur d'eau percolée et à assécher les horizons en profondeur par rapport à la seule végétation. L'augmentation des volumes d'eau percolés et l'assèchement à 100 cm seraient dus à la création de galeries par le ver qui entraînent l'eau en profondeur. L'assèchement à 50 cm serait un effet combiné de cette fuite d'eau par les galeries et par un prélèvement d'eau par les racines des plantes. Par rapport au lysimètre « végétation », en diminuant la hauteur d'eau et les humidités volumiques profondeur, la faune du sol augmente indirectement les quantités de carbone et d'azote (dont NH_4^+) lixiviés, enrichit la solution du sol en carbone et appauvrit la solution du sol en azote et en ions NO_3^- à 50 et à 100 cm. La faune n'a par contre pas d'influence directe visible sur la dynamique d'altération du carbone et de l'azote. Cette affirmation répond d'ailleurs aux interrogations de l'étude en cosme quant à une possible influence de la production de turricules et de galeries sur la dynamique d'altération du carbone et de l'azote. Les mesures lysimètriques montrent que les valeurs du lysimètre « faune » ont tendance à s'éloigner de celles du lysimètre « végétation », ce qui nous fait penser que l'on se trouve toujours dans la phase active de l'effet de la faune et qu'un plateau n'est pas encore atteint. L'effet faune devrait ainsi s'accentuer avec le temps.

3 Conclusion partielle

Nous proposons de synthétiser les différentes contributions effectives du ver terre anécique, *L. terrestris*, aux processus pédogénétiques afin de les replacer dans une

optique de génie pédologique. Nous nous focaliserons sur le profil modèle (dans l'expérience « comportement », on considérera que la modalité 25%CDV-75%TIT/SPP en est la plus proche), mais nous garderons toujours en mémoire l'influence de la formulation du Technosol construit.

3.1 Structuration / Agrégation

A l'échelle de l'agrégatosphère, les galeries de *L. terrestris* contribuent à augmenter la stabilité du sol, qui serait plus due aux cutanes compactées des parois des galeries et au mucilage dont le ver enduit certaines de ces galeries que par l'effet de tapissage de ces galeries ce qui confirme la littérature en sol naturel (Edwards et Bohlen, 1996). Les cutanes augmentent notamment la résistance des galeries envers la compaction (Jégou *et al.*, 2001; Kobel-Lamparski et Lamparski, 1987; Schrader *et al.*, 2007). Ainsi, si on se place à l'échelle du pédon, un plus grand nombre de galeries pourrait engendrer une plus grande stabilité du sol. Toutefois, le ver creuse en proportion autant dans chaque matériau et en fonction de l'humidité des matériaux, le tapissage des galeries a un effet inconnu et/ou variable sur la stabilité. Les galeries contribuent donc à augmenter la stabilité du sol dans certaines conditions expérimentales et sous certains procédés de construction du Technosol.

A l'échelle de l'agrégatosphère, les turricules du ver présentent des agrégats bactériens qui sont considérés comme les fractions les plus réactives du sol du fait de leur haute teneur en C_{org}, de la résistance de leur matière organique contre la biodégradation et leur capacité d'absorption (Six *et al.*, 2004; Watteau *et al.*, 2006). Certains auteurs (Tisdall et Oades, 1982) considèrent que ce genre de microagrégats formés en premier, servent de base à la construction de macroagrégats stables. La contribution du ver dans le Technosol construit pourrait augmenter la stabilité de la structure et ceci d'autant plus lorsqu'il y a présence de compost. Néanmoins, il faut nuancer ces conclusions issues d'observations ultrastructurales sans estimation de la surface occupée par ce genre d'agrégats bactériens. Par ailleurs, la majeure partie des observations de turricules on été faites sur des granulométries à l'eau (Annexe III) qui ne reflètent pas la véritable structure du sol. En outre s'il est localisé à la surface, le turricule sera plus facilement soumis aux contraintes climatiques et participera plus activement au turn-over de la matière organique, tandis qu'en profondeur, il participera aux processus d'agrégation

(Whalen *et al.*, 2004). D'autres auteurs considèrent qu'au contraire, à la surface et soumis à des sécheresses répétées, le turricule forme un agrégat très stable difficilement dégradable (Marinissen et Dexter, 1990). Enfin, la stabilité est fortement liée à la teneur en matière organique (Six *et al.*, 2004) qui est plus basse dans le turricule.
Il en résulte qu'à l'échelle du pédon, aucune différence de stabilité n'est engendrée par l'activité du ver de terre. A toutes les échelles, le Technosol a démontré une très forte capacité à engendrer des agrégats stables et même si parfois nous avons observés la création de structures biogéniques légèrement plus stables par rapport au sol témoin (*e.g.* parois des galeries) : les effets combinés du « pouvoir tampon » initiale du Technosol (dilution spatiale et forte teneur en matière organique), de la diminution du pool de carbone (des turricules) masquent l'effet potentiel du ver. En conclusion, le ver de terre *L. terrestris* ne contribue pas à une meilleure stabilité de l'agrégation à l'échelle du profil de sol dans ses premiers stades d'évolution.

3.2 Transferts d'eau, d'éléments et de matière

La macroporosité induite par l'activité du ver de terre peut avoir de fortes influences sur les transferts d'eau, de gaz et de solutés (Capowiez *et al.*, 1998; Ernst *et al.*, 2009; McCoy *et al.*, 1994). Le ver de terre *L. terrestris* a une nette influence sur la dynamique hydrique du système. Il assèche les couches supérieures (en présence de végétation) et contribue à une fuite d'eau vers le bas. Cette modification de la dynamique hydrique et des statuts hydriques augmente la lixiviation d'éléments tels que le carbone, l'azote et l'ammonium et modifient la composition de la solution du sol en carbone, azote et nitrates.

Autant l'influence du ver sur le comportement hydrique du sol est clairement démontrée, autant son influence directe sur les processus de minéralisation et d'altération des éléments est floue. A l'échelle de l'agrégat, il existe un effet de diminution du stock carboné dans les turricules, qui nous laissait penser que le ver pouvait avoir un impact sur la dynamique du cycle du carbone et de l'azote. Des indices en ultrastructure dans les turricules et dans les galeries appuient cette logique. En effet, de nombreux agrégats bactériens et une diversité bactérienne plus élevés ont été observés dans ces structures. Il est admis qu'un changement de biomasse et de diversité de communautés bactériennes peuvent affecter la minéralisation globale du sol

(Bausenwein *et al.*, 2008; Postma-Blaauwa *et al.*, 2006) et changer indirectement la composition de la solution du sol. Ces aspects seront d'autant plus prononcés localement au niveau du turricule dans les modalités avec du compost pour lesquelles on a observé une abondance et une diversité microbienne relative plus importante.

Pour autant, à l'échelle du pédon, cette diminution de carbone s'est estompée. Il est impossible de conclure à une régulation directe du cycle du carbone. Les données des lysimètres ont confirmé cette thèse puisqu'aucun lien direct n'a pu être établi entre la présence du ver et un quelconque changement de composition de la solution du sol. A l'image des conclusions sur la stabilité du sol, même si parfois un changement de teneur en carbone est observable dans certaines structures biogéniques par rapport au sol témoin (*e.g.* turricules) à l'échelle de l'agrégatosphère : les effets du « pouvoir tampon » initiale du Technosol (dilution spatiale et forte teneur en matière organique), masquent toute influence directe du ver sur le cycle du carbone et de l'azote.

Le ver crée néanmoins des biostructures qui sont responsables de déplacements de matière qui pourront être amplifié dans le temps : enfouissement de litière, tapissage des galeries par des turricules et du matériau humide, turricules dans le sol et à la surface.

En conclusion de ce chapitre, le ver de terre *L. terrestris* contribue aux processus pédogénétiques du Technosol à l'échelle de l'agrégat. Cette contribution dépend du procédé de construction du Technosol construit et des conditions abiotiques initiales. Pour maximiser l'effet du ver sur la pédogenèse du Technosol : (i) une humidification minimale des matériaux est nécessaire pour fournir suffisamment d'eau disponible à la survie du ver et aux processus biologiques associés ; (ii) une proportion minimale de CDV est nécessaire pour servir de réservoir en nutriments et en microorganismes afin d'optimiser les processus associés à l'action du ver. Enfin, aux échelles de temps expérimentales de la Thèse, la contribution de *L. terrestris* à la dynamique hydrique du Technosol construit est perceptible à l'échelle du profil de sol mais pas en ce qui concerne les processus d'agrégation et de modification directe des dynamiques des éléments.

Chapitre V Contribution de la diversité fonctionnelle de la faune du sol à la pédogenèse d'un Technosol construit : de l'agrégatosphère au pédon et du groupe fonctionnel à un assemblage de groupes fonctionnels

Il a été mis en évidence qu'à travers un ingénieur du sol modèle, *L. terrestris*, la faune du sol influençait les processus de fonctionnement et d'évolution d'un Technosol. Cette influence est très nette au niveau de l'agrégatosphère, et plus difficile à déceler à l'échelle du pédon pour certains processus (*e.g.* agrégation, décomposition de la matière organique, altération chimique) que d'autres (*e.g.* transferts d'eau), du moins dans les premiers stades d'évolution du Technosol. L'influence du procédé de construction de sol sur l'effet du ver sur des processus a également été caractérisée. A présent, il convient d'évaluer l'influence d'autres groupes fonctionnels de la faune pris séparément et en combinaisons aux échelles de l'agrégatosphère et du pédon. L'accent sera mis sur le pédon car à cette échelle, les indicateurs mesurés intègrent l'ensemble des interactions biotiques entre des groupes fonctionnels. L'objectif n'est pas de chercher à comprendre les mécanismes intrinsèques aux interactions entre groupes fonctionnels. Il s'agit plutôt de caractériser leur résultante sur le profil de sol. Les travaux seront poursuivis à l'échelle de l'agrégat pour envisager les mécanismes fins qui régissent les différences observées à l'échelle du pédon, par l'exemple des galeries des ingénieurs de l'écosystème. Nous avons privilégié l'approche en laboratoire car les données disponibles sur le Technosol construit *in situ* ne nous permettent pas d'envisager une approche à l'échelle du terrain. Les expériences de laboratoire sont réalisées en fixant le « procédé de construction » et en faisant varier le paramètre « diversité fonctionnelle » suivant des combinaisons croissantes de groupes fonctionnelles (*cf.* 2.2.3).

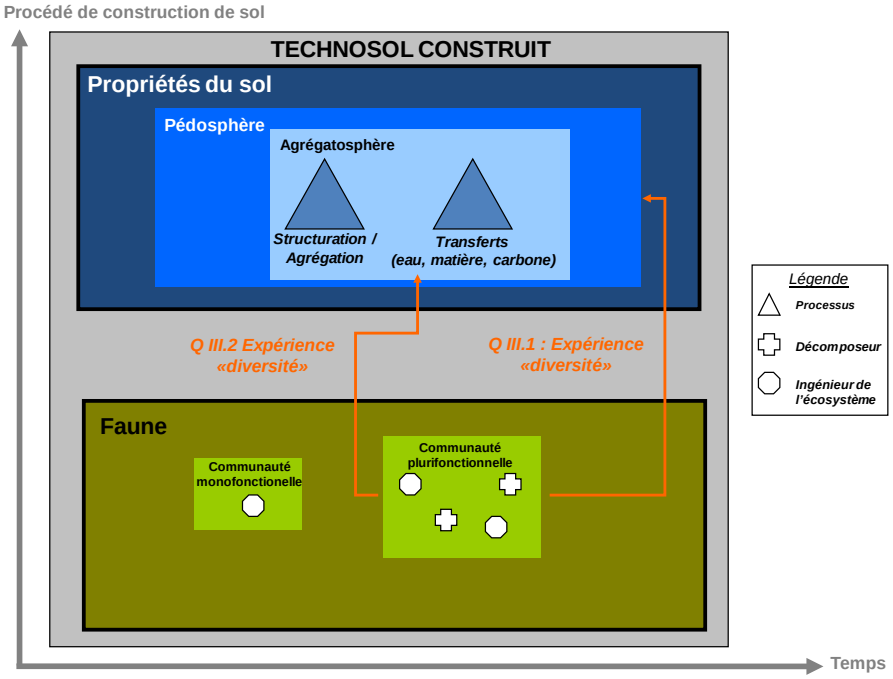


Figure 93. Schéma directeur du chapitre V : contribution de la diversité fonctionnelle de la faune du sol à la pédogenèse d'un Technosol construit.

Nous présenterons en premier lieu, les résultats de l'ensemble des combinaisons de groupes fonctionnels sur les différents indicateurs de fonctionnement du sol afin d'évaluer de quelle manière s'exprime la notion de groupes fonctionnels dans le Technosol construit à l'échelle du pédon (Figure 93). Dans un deuxième temps, nous présenterons les résultats à l'échelle de l'ultrastructure concernant les galeries *d'A. caliginosa* que nous comparerons avec les observations de galeries de *L. terrestris* et avec le sol témoin (Figure 93). Ceci permettra d'avoir une vision plus fine, à l'échelle de l'agrégat, des contributions de différents groupes fonctionnels écomorphologiques à travers deux structures biogéniques. Des allers-retours seront effectués entre l'agrégat et le pédon pour exploiter au mieux ces observations.

1 Dans quelle mesure la diversité fonctionnelle influence-t-elle la pédogenèse d'un Technosol construit ?

1.1 Mise en relation des réponses et des effets

L'ensemble des données de l'expérience « diversité » (excepté les données concernant l'ADN des microorganismes qui n'ont pas été effectuées sur l'ensemble des modalités) a fait l'objet d'une analyse multivariable (ACP). La projection des échantillons sur le plan formé par les axes 1 et 2 (48,26 %) ainsi que la matrice des corrélations, présentent des corrélations fortes (R> 0,5) entre :

- la litière d'une part, et le nombre de groupes fonctionnels (R = -0,65), la présence de *L. terrestris* (R = -0,51), l'épaisseur de CDV (R = 0,66) d'autre part.
- l'épaisseur de CDV d'une part, et le nombre de groupes fonctionnels (R = -0,55), la présence de *L. terrestris* (R = -0,60) et la biomasse de *L. terrestris* (R = -0,51) d'autre part.
- la litière et l'épaisseur de CDV (R=0,66).

On note également des corrélations faibles à moyennes (0,2 < R > 0,5) entre :

- la présence de *L. terrestris* d'une part, et l'humidité massique du CDV (R = -0,46), le C_{org} du CDV (R = -0,42), le C_{tot} du CDV (R = -0,30), et le rapport carbone organique sur carbone total de l'horizon CDV (R = 0,38) d'autre part.
- la biomasse de *L. terrestris* d'une part, et la litière (R = 0,44), l'humidité massique du CDV (R = 0,40) et le rapport carbone organique sur carbone total dans l'horizon CDV (R = 0,36) d'autre part.
- la présence de *P. scaber* d'une part et la litière (R = -0,37), et le rapport carbone organique sur carbone total dans l'horizon A (R = -0,21), d'autre part.
- la biomasse de *P. scaber* d'une part et la litière (R = -0,38), et le rapport carbone organique sur carbone total de l'horizon CDV (R = 0,28) d'autre part.

- la présence de *F. fimetaria* d'une part, et le C_{org} de l'horizon A (R = 0,30), et le rapport carbone organique sur carbone total dans l'horizon A (R = 0,25) d'autre part.
- le nombre d'ingénieurs de l'écosystème et le rapport carbone organique sur carbone total dans l'horizon CDV (R = 0,27).

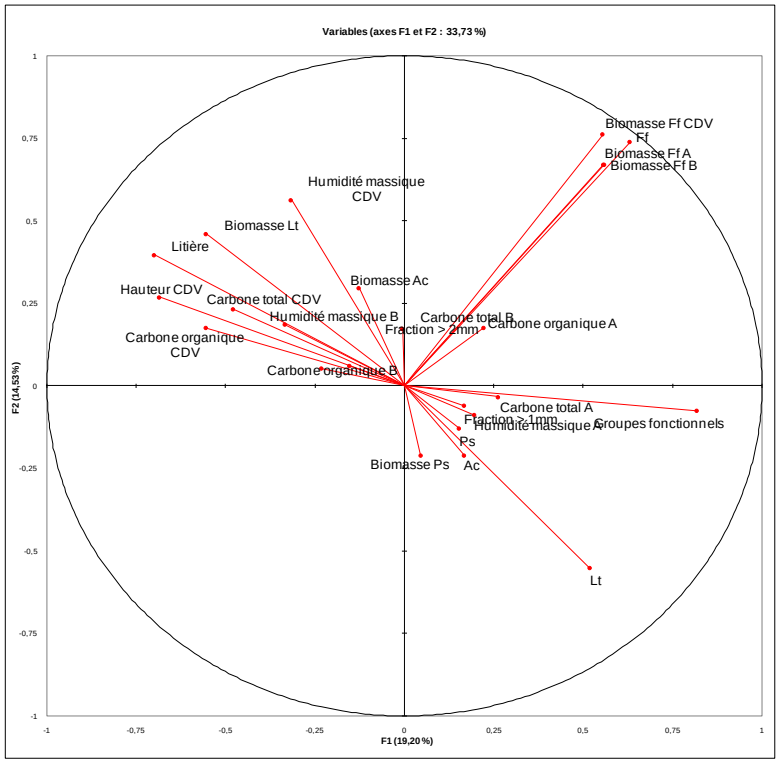


Figure 94. Projection des axes des attributs de l'ACP effectuée avec tous les attributs mesurés de l'expérience « diversité », excepté les attributs concernant les données d'ADN sur les microorganismes.

Il convient à présent d'expliciter en détail ces corrélations en décrivant les résultats un à un.

1.2 Effets des groupes fonctionnels sur l'enfouissement de la litière

Un gradient de valeurs apparaît pour la masse finale de litière restante à la surface du cosme en fonction des combinaisons fonctionnelles (Figure 95, à gauche). Les modalités associant *L. terrestris* et *P. scaber* présentent les plus fortes pertes de masse de litière, suivies par les modalités avec *L. terrestris* sans le cloporte, puis les modalités avec *P. scaber* sans *L. terrestris* et enfin, les autres modalités qui ne comportent aucun de ces

deux individus. Par ailleurs, au sein même de ces groupes (excepté pour les modalités renfermant à la fois *P. scaber* et *L. terrestris)*, les modalités renfermant *A. caliginosa* présentent les plus faibles pertes de masse de litière tandis que celle avec *F. fimetaria* présentent les plus fortes. Enfin, pour les modalités renfermant à la fois *P. scaber* et *L. terrestris*, les modalités avec *F. fimetaria* présentent les plus fortes pertes, excepté la modalité avec les trois décomposeurs (*P. scaber*, *L. terrestris* et *F. fimetaria*) qui présente la plus faible perte.

Si on regroupe les valeurs de ces modalités, et qu'on effectue un test statistique, on isole trois groupes statistiquement différents (Figure 95, à droite) : un groupe comprenant à la fois les modalités avec *L. terrestris*, avec ou sans *P. scaber*, un groupe avec *P. scaber* sans *L. terrestris* et enfin le reste des modalités.

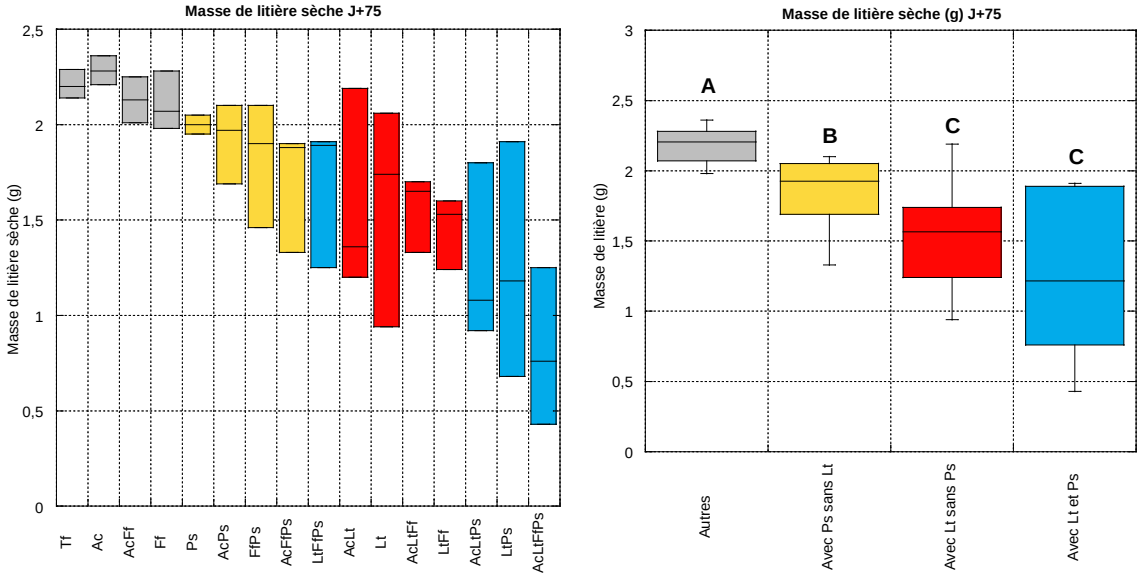


Figure 95. Masse de litière sèche restante à la surface, ensemble des modalités (à gauche, box-plots), regroupement de modalités (à droite, box-plots) à t=75 jours dans l'expérience « diversité ». Les lettres indiquent les résultats du test statistique et post-hoc (Kruskal-Wallis, p<0,0001 suivi de Conover-Iman). Ac :* Apporectodea caliginosa *; Lt :* Lumbricus terrestris *; Ps :* Porcellio scaber *; Ff :* Folsomia fimetaria *; Tf : témoin final. En bleu : modalités avec Lt et Ps, en rouge : modalités avec Lt sans Ps, en jaune : modalités avec Ps sans Lt, en gris : autres modalités.

1.3 Effets des groupes fonctionnels sur l'enfouissement du CDV

L'épaisseur finale de CDV à la surface du cosme en fonction des combinaisons fonctionnelles suit un gradient décroissant statistiquement significatif de valeurs, avec en gris, les modalités sans *L. terrestris*, et en rouge les modalités avec *L. terrestris* (Figure 96). Dans le premier groupe, les modalités monospécifiques présentent les épaisseurs de CDV les plus fortes, puis viennent les modalités bispécifiques. Parmi celles-ci, les modalités présentant les deux décomposeurs (*P. scaber* et *F. fimetaria*) présentent les épaisseurs les plus faibles. Enfin, vient la modalité trispécifique avec la plus faible épaisseur du groupe. Dans le deuxième groupe, l'ordre va de la modalité monospécifique vers les autres modalités qui ont des valeurs similaires puis vers la modalité trispécifique avec les trois décomposeurs.

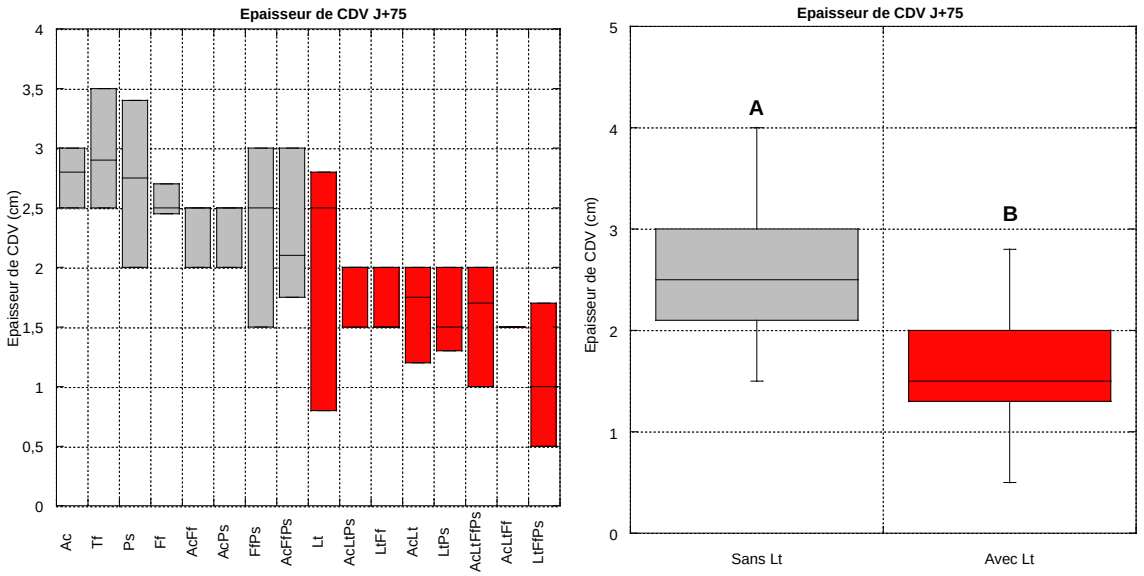


Figure 96. Epaisseur de CDV restante à la surface, ensemble des modalités (à gauche, box-plots), regroupement de modalités (à droite, box-plots) à t=75 jours dans l'expérience « diversité ». Les lettres indiquent les résultats du test statistique (Kruskal-Wallis, p<0,0001 suivi de Conover-Iman). Ac :* Apporectodea caliginosa *; Lt :* Lumbricus terrestris *; Ps :* Porcellio scaber *; Ff :* Folsomia fimetaria *; Tf : témoin final. En rouge : modalités avec Lt, en gris : autres modalités.

1.4 Effets des groupes fonctionnels sur l'humidité massique

L'humidité massique de l'horizon CDV (Figure 97, à gauche) en fonction des combinaisons fonctionnelles suit un gradient croissant depuis les modalités avec à la fois *L. terrestris* et *A. caliginosa* vers les modalités avec *L. terrestris* comme seul ver, puis vers les autres modalités. Si on regroupe les valeurs de ces modalités, et qu'on effectue un test statistique, on isole trois groupes statistiquement différents (Figure 97, à droite). Au sein du groupe sans *L. terrestris*, les modalités présentent toutes des valeurs proches. Au sein du groupe contenant *L. terrestris* comme seul ver, la modalité monospécifique présente le taux d'humidité le plus bas et celui-ci augmente avec le nombre de décomposeurs associés. Aucune distinction logique n'émerge de la composition des modalités avec les deux vers.

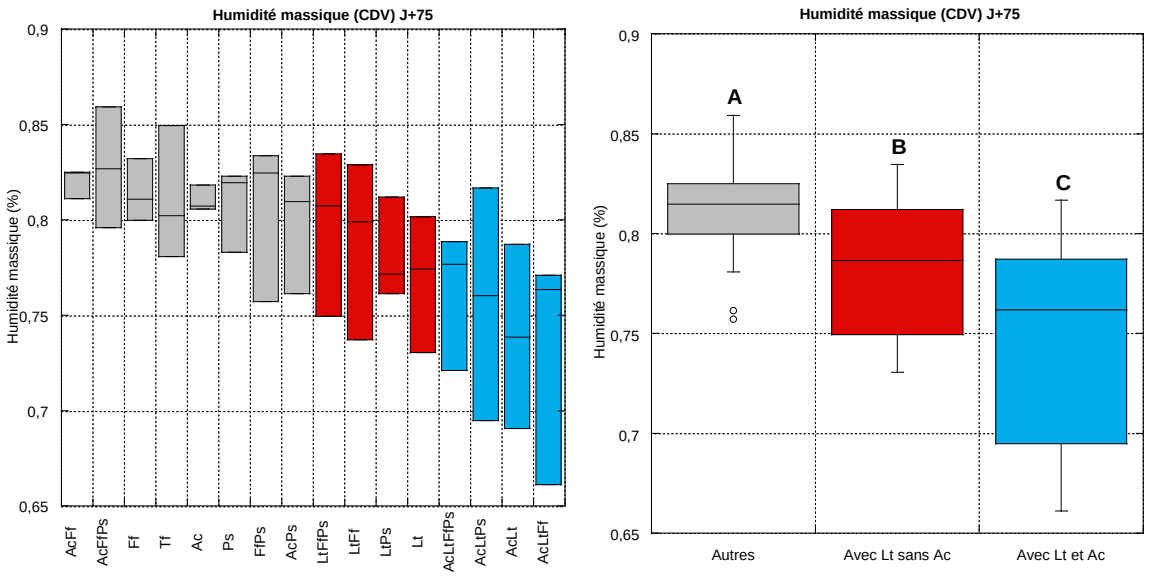


Figure 97. Humidité massique de l'horizon de CDV, ensemble des modalités (à gauche, box-plots), regroupement de modalités (à droite, box-plots) à t=75 jours dans l'expérience « diversité ». Les lettres indiquent les résultats du test statistique et post-hoc (Kruskal-Wallis, p<0,0003 suivi de Conover-Iman,). Ac :* Apporectodea caliginosa *; Lt :* Lumbricus terrestris *; Ps :* Porcellio scaber *; Ff :* Folsomia fimetaria *; Tf : témoin final. En bleu, modalités avec Lt et Ac, en rouge : modalités avec Lt, en gris : autres modalités.

Pour l'humidité massique de l'horizon A (couche de TIT/SPP la plus en surface) (Figure 98, à gauche), les tendances sont moins nettes que pour CDV. On observe toutefois une

certaine logique biologique dans l'enchaînement des valeurs, mêmes si les différences sont moins franches avec trois groupes qui présentent tous au moins un ver de terre dans leur modalité : par ordre décroissant on note les modalités avec *L. terrestris* comme seul ver, les modalités avec *A. caliginosa* comme seul ver et les modalités avec *L. terrestris* et *A. caliginosa*. Avec des valeurs un peu plus basses, on trouve l'ensemble des autres modalités qui ne contiennent pas de ver de terre. Si on regroupe les valeurs de ces modalités, on ne distingue pas de groupes statistiquement différents (Figure 98, à droite).

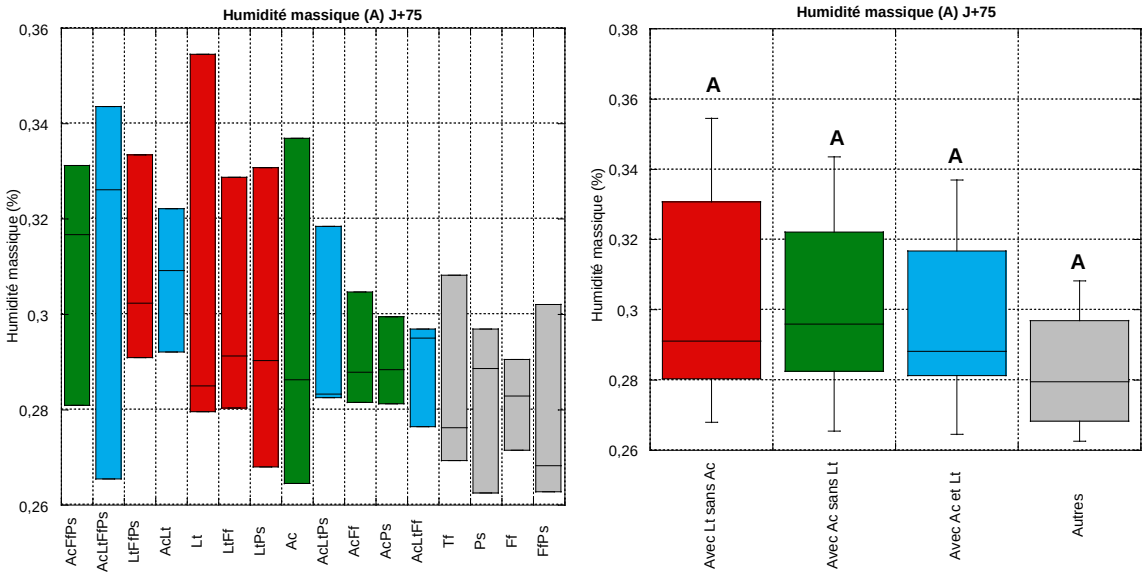


Figure 98. Humidité massique de l'horizon A, ensemble des modalités (à gauche, box-plots), regroupement de modalités (à droite, box-plots) à t=75 jours dans l'expérience « diversité ». Les lettres indiquent les résultats du test statistique et post-hoc (Kruskal-Wallis, p=0,135 suivi de Conover-Iman,). Ac :* Apporectodea caliginosa *; Lt :* Lumbricus terrestris *; Ps :* Porcellio scaber *; Ff :* Folsomia fimetaria *; Tf : témoin final. En rouge : modalités avec Lt, en vert : modalités avec Ac sans Lt, en bleu : modalités avec Lt et Ac, en gris : autres modalités.

Pour l'humidité massique de l'horizon B (couche de TIT/SPP la plus en profondeur) (Figure 99), il existe un gradient visible. Toutefois, l'enchaînement des combinaisons de faune ne dégage aucune logique biologique. Le nombre de groupes fonctionnels n'explique pas non plus ce gradient.

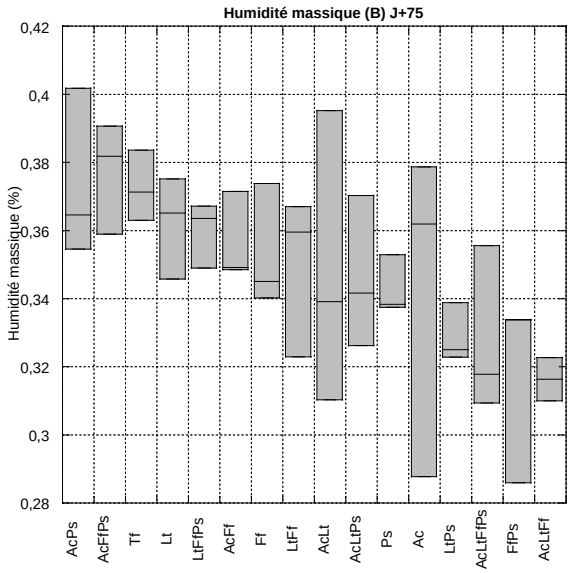


Figure 99. Humidité massique de l'horizon B (box-plots), ensemble des modalités à t=75 jours dans l'expérience « diversité ». Ac :* Apporectodea caliginosa *; Lt :* Lumbricus terrestris *; Ps :* Porcellio scaber *; Ff :* Folsomia fimetaria *; Tf : témoin final.

1.5 Effets des groupes fonctionnels sur le cycle du carbone

Contrairement aux résultats sur la litière, aucun gradient de C_{tot} et de C_{org} n'est observé dans l'horizon CDV (Figure 100, à gauche & Figure 101, à gauche). Toutefois, l'ACP a mis en évidence une corrélation entre *L. terrestris* d'une part, et le C_{tot} et le C_{org}. Ainsi, si les modalités avec *L. terrestris* sont regroupées, deux groupes statistiquement différents se dégagent pour le C_{tot} et le C_{org} (Figure 100, à droite & Figure 101, à droite).

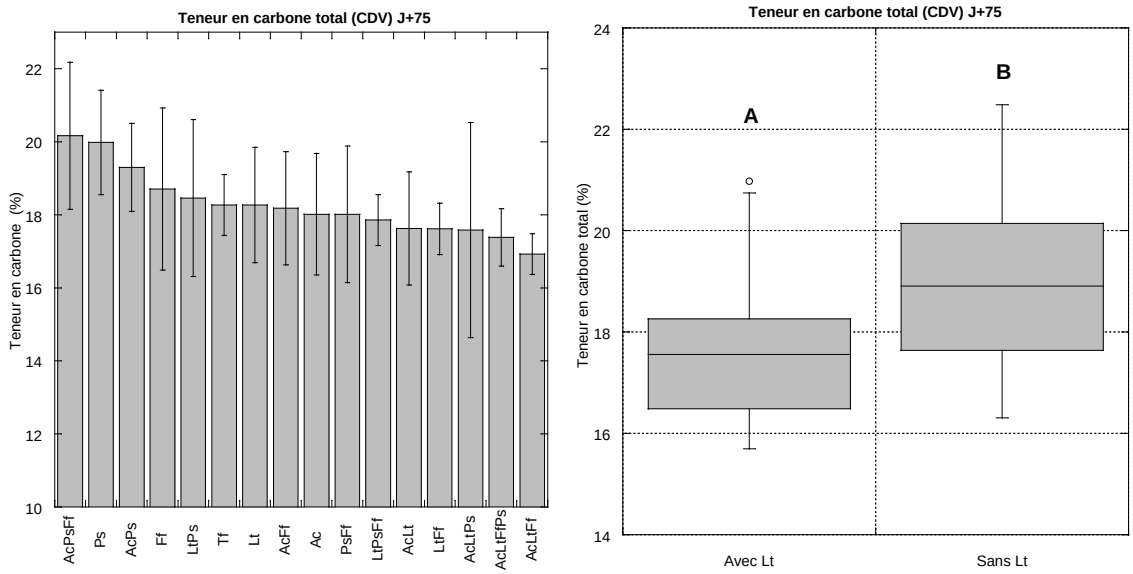


Figure 100. Carbone total de l'horizon de CDV, ensemble des modalités (à gauche, moyennes et écarts-types), regroupement de modalités (à droite, box-plots) à t=75 jours dans l'expérience « diversité ». Les lettres indiquent les résultats du test statistique (Student, p<0,007). Ac : **Apporectodea caliginosa** ***; Lt :*** **Lumbricus terrestris** ***; Ps :*** **Porcellio scaber** ***; Ff :*** **Folsomia fimetaria** ***; Tf : témoin final.***

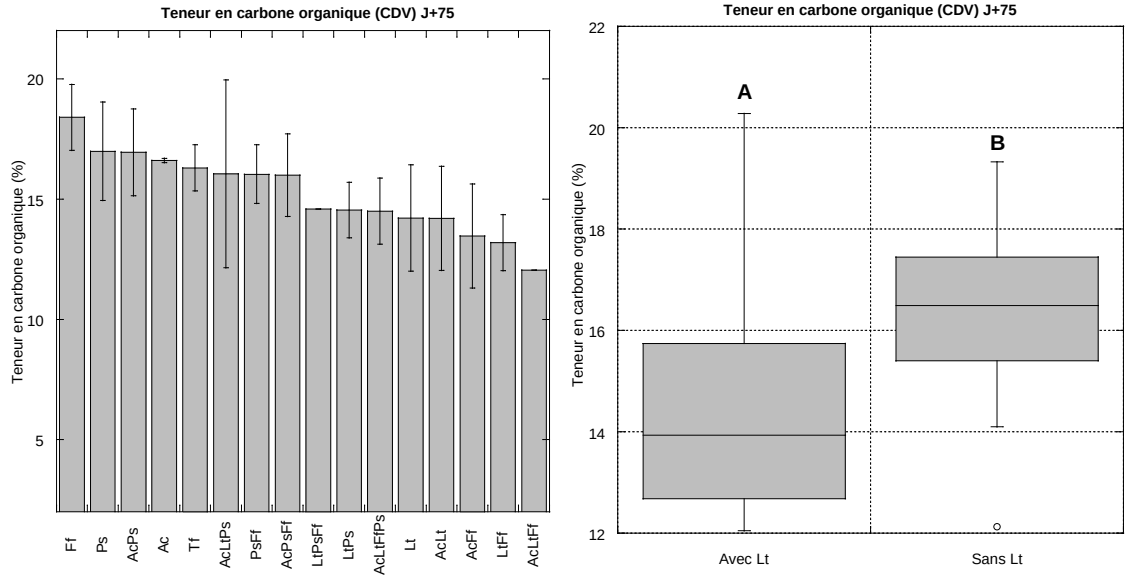


Figure 101. Carbone organique de l'horizon de CDV, ensemble des modalités (à gauche, moyennes et écarts-types), regroupement de modalités (à droite, box-plots) à t=75 jours dans l'expérience « diversité ». Les lettres indiquent les résultats du test statistique (Mann-Whitney, p<0,001). Ac : **Apporectodea caliginosa** ***; Lt :*** **Lumbricus terrestris** ***; Ps :*** **Porcellio scaber** ***; Ff :*** **Folsomia fimetaria** ***; Tf : témoin final.***

Il n'y a pas de gradient visible de C_{tot} et C_{org} de l'horizon A (Figure 102) en fonction des combinaisons fonctionnelles. Toutefois, l'ACP met en évidence une corrélation entre *F. fimetaria* et le C_{org}. Lorsque l'on regroupe les modalités avec *F. fimetaria*, le test statistique dégage deux groupes statistiques différents avec les modalités avec *F. fimetaria* qui présentent les valeurs les plus élevées (Figure 103) (le C_{org} de la modalité AcLtPs doit être interprétée avec précaution du fait que la mesure n'est basée que sur deux répétitions au lieu de trois).

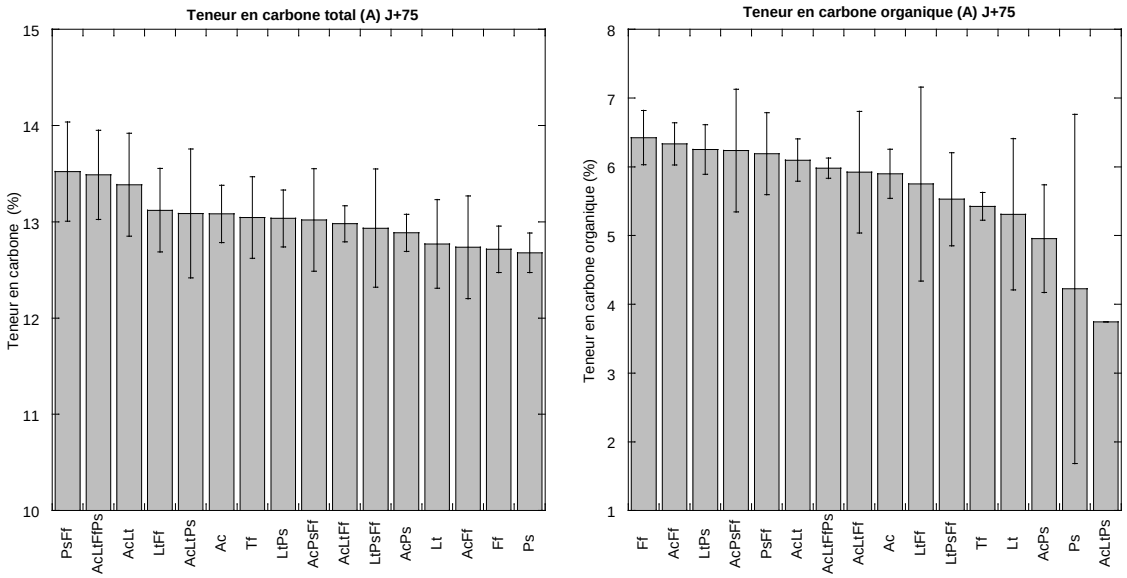


Figure 102. Carbone total (à gauche, moyennes et écarts-types) et carbone organique (à droite, moyennes et écarts-types) de l'horizon A à t=75 jours dans l'expérience « diversité ». Ac :* Apporectodea caliginosa *; Lt :* Lumbricus terrestris *; Ps :* Porcellio scaber *; Ff :* Folsomia fimetaria *; Tf : témoin final.

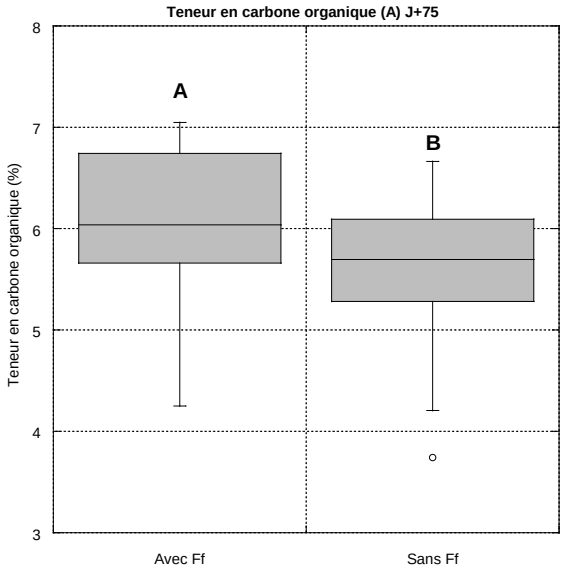


Figure 103. Carbone organique de l'horizon A (box-plots), avec ou sans* Folsomia fimetaria *à t=75 jours dans l'expérience « diversité ». Les lettres indiquent les résultats du test statistique (Mann-Whitney, p<0,037). Ff :* Folsomia fimetaria*.

Le C_{tot} de l'horizon B (Figure 104, à gauche) ne présente aucun gradient significatif en fonction des combinaisons fonctionnelles. Pour le C_{org} (Figure 104, à droite), bien qu'un gradient soit perceptible, il n'y a pas d'explication biologique logique. Les forts écart-types viennent confirmer que ces variations sont consécutives à l'hétérogénéité du sol (le C_{org} de la modalité AcLtFf doit être interprété avec précaution du fait que la mesure n'est basée que sur deux répétitions au lieu de trois).

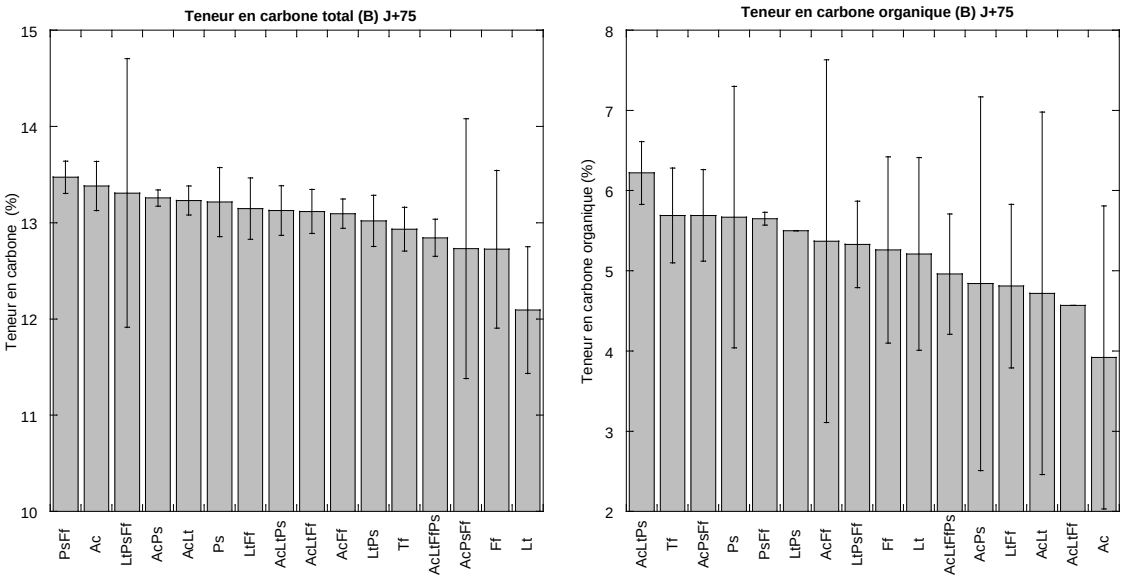


Figure 104. Carbone total (à gauche, moyennes et écarts-types) et carbone organique (à droite, moyennes et écarts-types) de l'horizon B à t=75 jours dans l'expérience « diversité ». Ac :* Apporectodea caliginosa *; Lt :* Lumbricus terrestris *; Ps :* Porcellio scaber *; Ff :* Folsomia fimetaria *; Tf : témoin final.

1.6 Effets des groupes fonctionnels sur la stabilité de l'agrégation

Comme pour le carbone de l'horizon B, la stabilité de l'agrégation concernant les deux fractions susceptibles d'être modifiées (> 2mm et > 1mm) (Figure 105) ne suit aucune logique biologique. L'ensemble des valeurs présente de grands écart-types à relier à la forte hétérogénéité du sol.

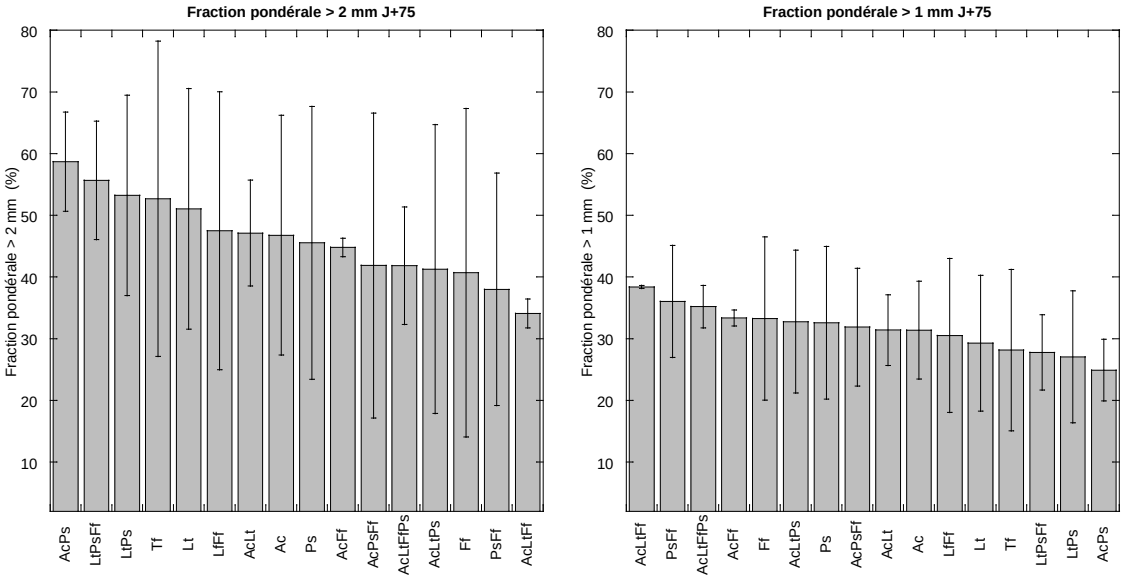


Figure 105. Fraction pondérale stable à l'eau supérieure à 2 mm (à gauche, moyennes et écarts-types) et à 1 mm (à droite, moyennes et écarts-types) de l'horizon de B à t=75 jours dans l'expérience « diversité ». Ac : **Apporectodea caliginosa** ***; Lt :*** **Lumbricus terrestris** ***; Ps :*** **Porcellio scaber** ***; Ff :*** **Folsomia fimetaria** ***; Tf : témoin final.***

1.7 Effets des groupes fonctionnels sur les microorganismes

Les modalités contenant l'ensemble de la faune, *L. terrestris* et *A. caliginosa* présentent des quantités d'ADN bactérien et fongique supérieures aux témoins (Figure 106). La modalité avec *P. scaber* présente des quantités d'ADN bactérien et fongique inférieures aux témoins. Enfin, la modalité avec *F. fimetaria* a une quantité d'ADN bactérien inférieure au témoin et d'ADN fongique légèrement supérieure au témoin. Toutefois, aucune différence significative n'a été mise en évidence (Kruskal-Wallis, p=0,68 & p=0,70 respectivement pour l'ADN bactérien et fongique).

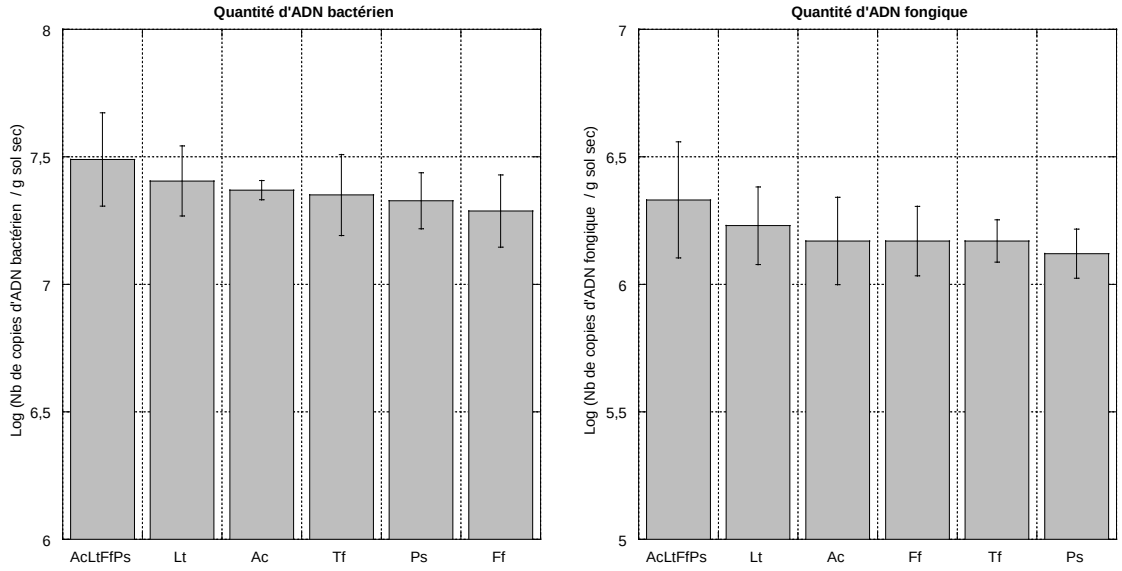


Figure 106. Quantité d'ADN bactérien (q-PCR 16S, à gauche, moyennes et écarts-types) et fongique (q-PCR 18S, à droite, moyennes et écarts-types) du sol de l'horizon de A à t=75 jours dans l'expérience « diversité ». Ac :* Apporectodea caliginosa *; Lt* : Lumbricus terrestris *; Ps :* Porcellio scaber *; Ff :* Folsomia fimetaria *; Tf : témoin final.

Le nombre de bandes, indicateur qualitatif de la diversité des ADN, est identique pour toutes les modalités que ce soit pour l'ADN bactérien ou fongique. Ceci signifie que la diversité des communautés bactériennes (Figure 107, à gauche) et fongiques (Figure 107, à droite) sont similaires pour toutes les modalités.

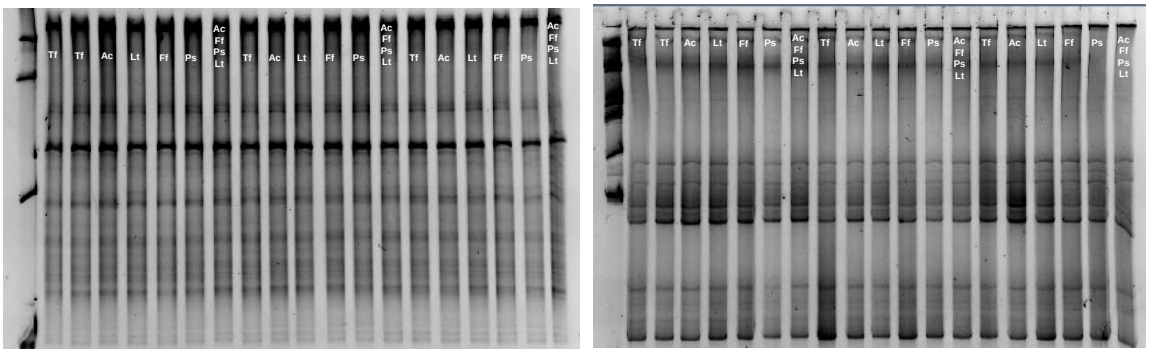


Figure 107. Profils de migration (TTGE) de l'ADN bactérien (à gauche) et fongique (à droite) du sol de l'horizon de A à t=75 jours dans l'expérience « diversité ». Ac :* Apporectodea caliginosa *; Lt :* Lumbricus terrestris *; Ps :* Porcellio scaber *; Ff :* Folsomia fimetaria *; Tf : témoin final.

2 Comparaison de deux structures biogéniques de deux groupes fonctionnels écomorphologiques à l'échelle de l'agrégatosphère

Les galeries de *L. terrestris* présentaient deux parties distinctes visibles à l'œil nu : une périphérie éloignée de galerie essentiellement grise correspondant au TIT/SPP et un tapissage en périphérie proche plutôt noir de matière organique provenant du CDV. A l'observation ultrastructurale, quatre structures distinctes se détachaient : une **cutane externe minérale** (**C Lt**), du **mucus** (**M**), une **interface organo-minérale** (**I Lt**) et enfin un **tapissage organique** (**T Lt**) (Figure 108).

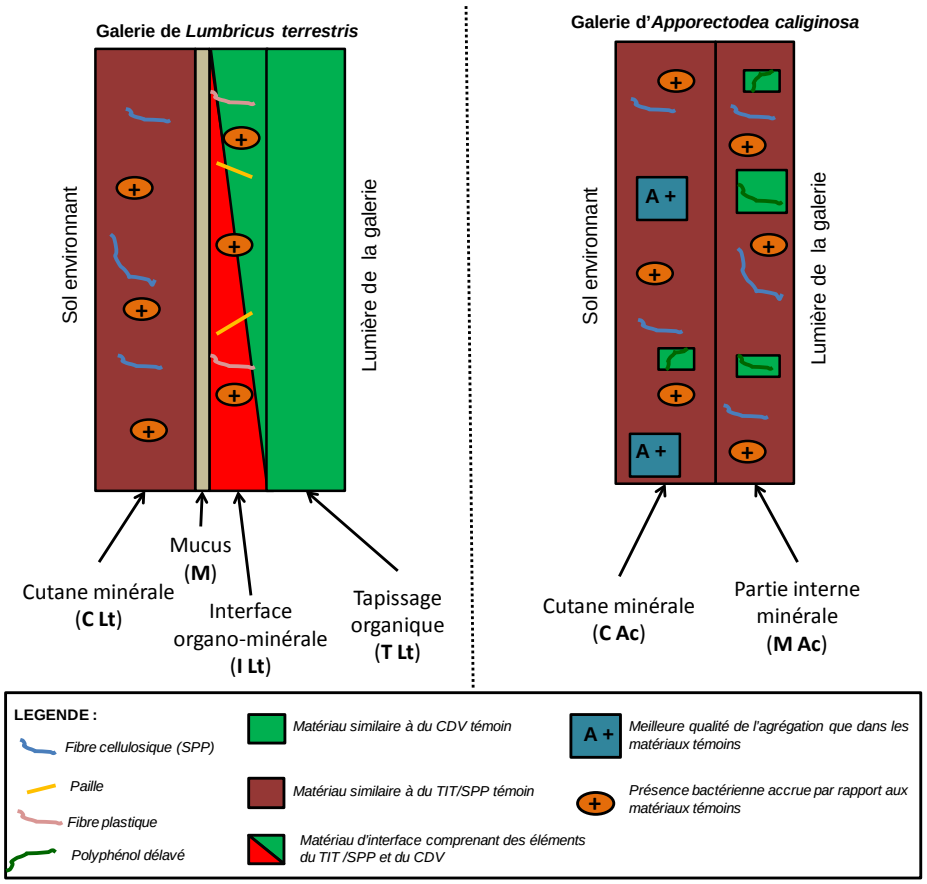
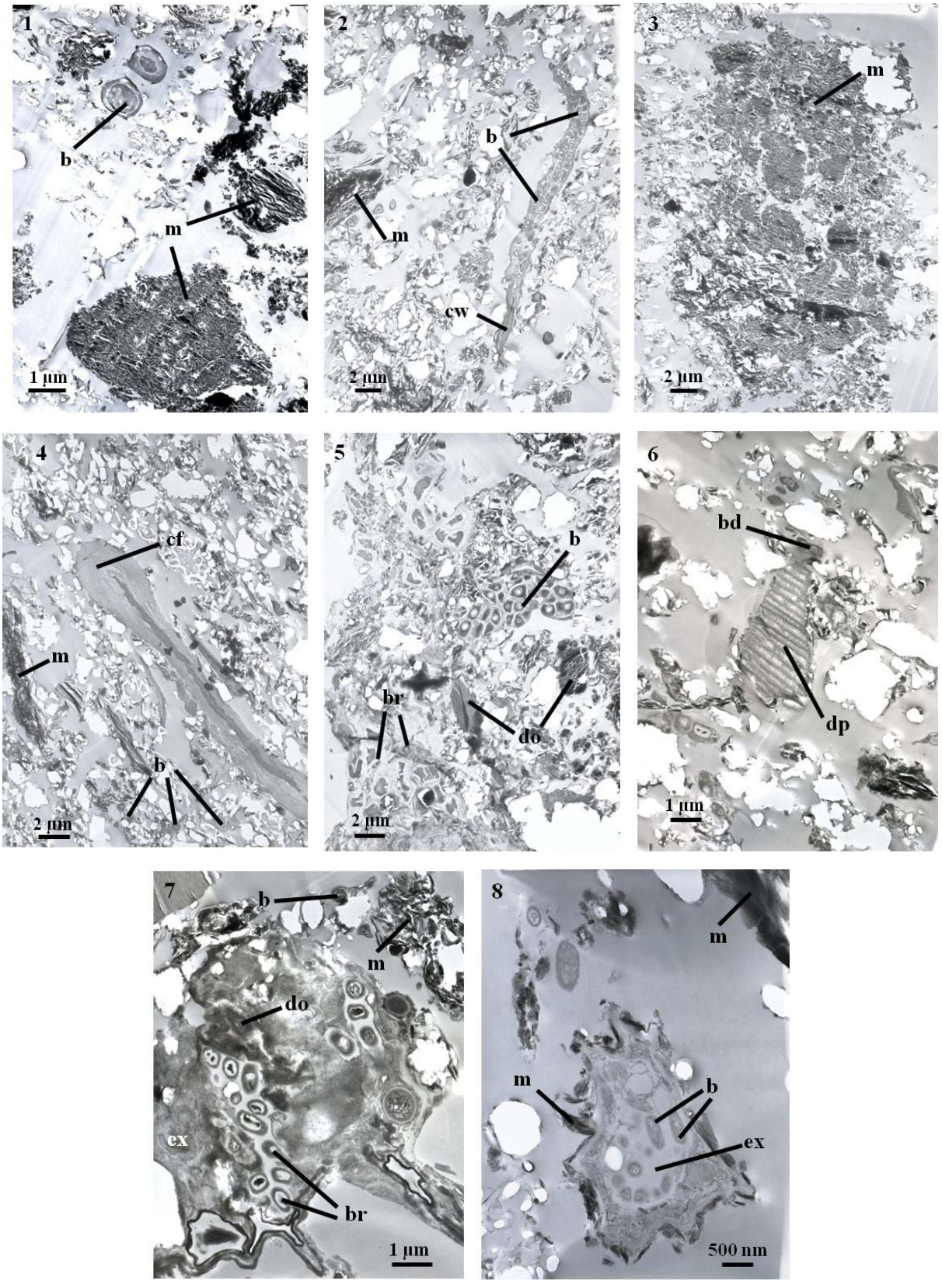


Figure 108. Comparaison schématique des galeries de* Lumbricus terrestris *et d'*Apporectodea caliginosa *de l'expérience « diversité ».

Pour *A. caliginosa*, la galerie observée à l'œil nu est d'un aspect homogène gris apparenté à du TIT/SPP. Les images ultratructurales laissent cependant apparaître une hétérogénéité de constitution entre la périphérie proche de la galerie et la périphérie éloignée qui n'est pas consécutive à un tapissage. La périphérie proche de la galerie, que l'on dénommera **partie interne minérale** (**M Ac**) est globalement peu tassée (Figure 109.1 & Figure 109.2). Elle est formée par des minéraux (Figure 109.1, Figure 109.2 & Figure 109.3) et par des fibres cellulosiques (Figure 109.4), qui participent peu à l'agrégation et ne sont pas sous dégradation bactérienne. Ces constituants sont similaires au TIT/SPP du sol de la modalité témoin. On distingue également des éléments qui proviennent du compost, sous différents états de dégradation. On discerne des tissus peu tassés, gardant leur forme originelle, ou de la matière organique plus fragmentée parfois sous dégradation bactérienne actuelle (Figure 109.5), et enfin des polyphénols très délavés (Figure 109.6), sans doute sous l'action d'une dégradation bactérienne. Globalement, l'activité bactérienne est plus élevée comparativement aux deux sols témoins. Elle est du même ordre de grandeur que dans la **cutane minérale** (**C Lt**) et l'**interface organo-minérale** (**I Lt**) de la galerie de *L. terrestris*. On y retrouve beaucoup de bactéries libres vivantes et à différents stades physiologiques (Figure 109.5) et enfin des bactéries identiques à celles des turricules (de la modalité 75%CDV – 25%TIT/SPP, expérience « comportement ») de *L. terrestris*, spécifiques du cycle de l'azote (Josserand et Cleyet-Marel, 1979). L'agrégation est rare et se limite à des associations bactéries-matières organiques passées (Figure 109.7) et à quelques rares agrégats bactériens avec des bactéries vivantes (Figure 109.8).

La périphérie éloignée, que l'on dénommera **cutane minérale** (**C Ac**) (Figure 108) présente de fortes similitudes avec la **partie interne minérale** (**M Ac**). On y remarque la présence de minéraux et de fibres cellulosiques (Figure 109.9 & Figure 109.10), de matière organique typique du compost (Figure 109.9) et de polyphénols dégradés. Par contre, elle se démarque par la présence de nombreuses plages d'exopolymères (Figure 109.11 & Figure 109.12) qui forment de nombreux agrégats bactériens résultant d'une activité bactérienne actuelle (Figure 109.11) ou passée (Figure 109.12). Globalement, l'activité bactérienne est intense et comparable à celle de la **cutane minérale**. L'agrégation y est plus forte, notamment l'agrégation bactérienne (Figure 109.11, Figure 109.12 et Figure 109.13).

Partie interne minérale : M Ac



Cutane minérale : C Ac

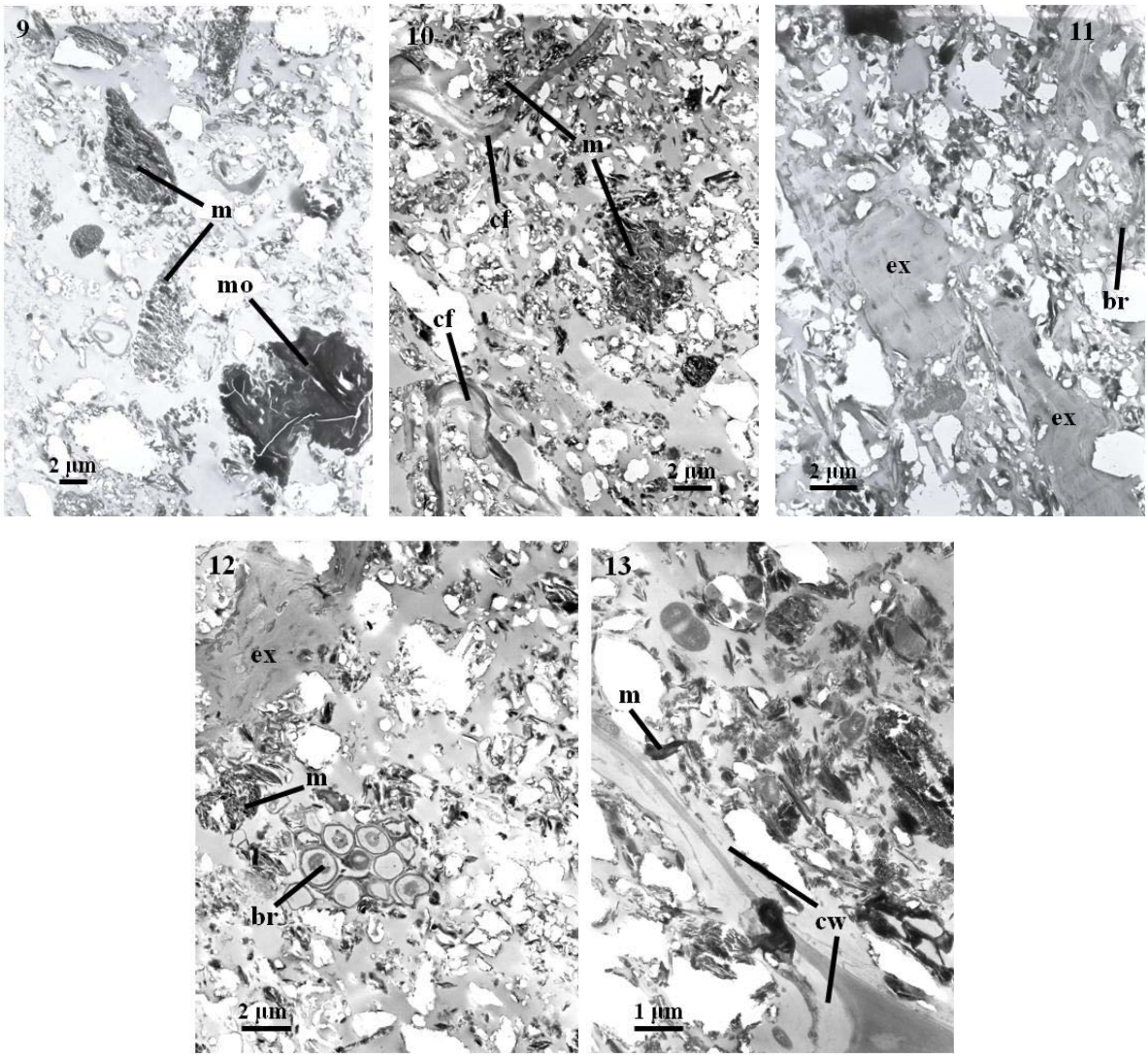


Figure 109. Micrographes de microscope électronique à transmission d'une galerie de la modalité contenant* Apporectodea caliginosa *dans l'expérience « diversité ». 1&2 : vue d'ensemble de la partie interne minérale ; 3 : minéraux ; 4 : fibre cellulosique et minéraux ; 5 : matière organique sous dégradation bactérienne ; 6 : polyphénol délavé ; 7& 8 : microagrégats organo-minéral ; 9 & 10 : vue d'ensemble de la cutane minérale ; 11 & 12 : plages d'exopolymères et agrégats bactériens ; 13 : association organo-minéral passée. b, bactéries vivantes ; bd, bactéries en division ; br, résidus bactériens ; cf, fibre cellulosique ; cr, résidu de cellules ; cw, paroi de cellule ; dp, polyphénol dégradé ; do, matière organique dégradée ; ex, exopolymères ; m, minéraux ; mo, matière organique.

3 Discussion

La perte de masse de la litière, est influencée de manière significative et par ordre d'intensité décroissant par *L. terrestris* et par *P. scaber*. Les cloportes sont connus pour se nourrir en premier lieu de restes végétaux en décomposition (Løkke et Van Gestel, 1997) et les vers anéciques pour déplacer de la matière organique de la surface en profondeur (Brown *et al.*, 2000). Par ailleurs, il n'y a pas de mécanisme de facilitation (Hooper, 1998) entre ces deux espèces puisque l'effet observé avec les deux animaux bien que significativement différent de la modalité avec *P. scaber* seul, n'est pas significativement différent de la modalité avec *L. terrestris* seul. Par ailleurs, l'effet de la modalité avec ces deux espèces est inférieur à l'effet cumulé des modalités monospécifiques. Ceci est en accord avec les travaux de Zimmer *et al.* (2005) qui montrent qu'en présence de litière fraîche, aucun effet synergique n'existe entre *Lumbricus rubellus* et *P. scaber* sur les processus de décomposition. Ce n'est qu'en présence d'une litière âgée que l'on met en évidence une facilitation (Zimmer *et al.*, 2005). Ainsi, ces résultats nous font penser que la relation ver de terre – cloporte dans le Technosol suit l'hypothèse de redondance (Naeem *et al.*, 2002), même si les deux animaux n'ont pas la même intensité d'action (Figure 110a.). Par ailleurs, la présence de *F. fimetaria* augmente la décomposition de litière en présence de *P. scaber* seul et de *L. terrestris* seul. Une fois encore, la performance des modalités plurifonctionnelles n'égale ni n'accroît la disparition au-delà des effets monospécifiques. Il y a redondance (Figure 110b.). Dans la combinaison avec les trois décomposeurs, au contraire, la disparition de litière est la plus basse des modalités avec *P. scaber* et *L. terrestris*. Il y a compétition de niches écologiques. Ceci est confirmé par le fait que c'est dans cette modalité que l'on retrouve la plus forte perte relative de biomasse pour *P. scaber* et *L. terrestris*. L'hypothèse idiosyncrasique (relation indéterminée entre la diversité et les processus) prévaut alors (Figure 110b.). A l'inverse, lorsque tous les groupes fonctionnels sont présents, la disparition de litière est la plus forte des modalités avec *P. scaber* et *L. terrestris*. L'ajout d'*A. caliginosa* semble éroder cette compétition de niches. Si on se restreint aux modalités avec *P. scaber* et *L. terrestris*, la relation biodiversité-fonction avec l'ajout d'*A. caliginosa* rejoint une hypothèse non décrite chez Naeem *et al.* (2002) qui consiste en une facilitation indirecte. En effet, l'ajout d'*A. caliginosa*, bien

qu'intervenant indirectement dans les processus, accroît la disparition de litière (Figure 110c.). Une hypothèse serait qu'*A. caliginosa* participe au turn-over de litière en profondeur et permette ainsi d'élargir la niche écologique des décomposeurs. Ceci aurait pour conséquence d'augmenter le turn-over de litière. Dans une certaine mesure, *L. terrestris* et *P. scaber* peuvent être considérés comme des espèce-clefs de la disparition de litière.

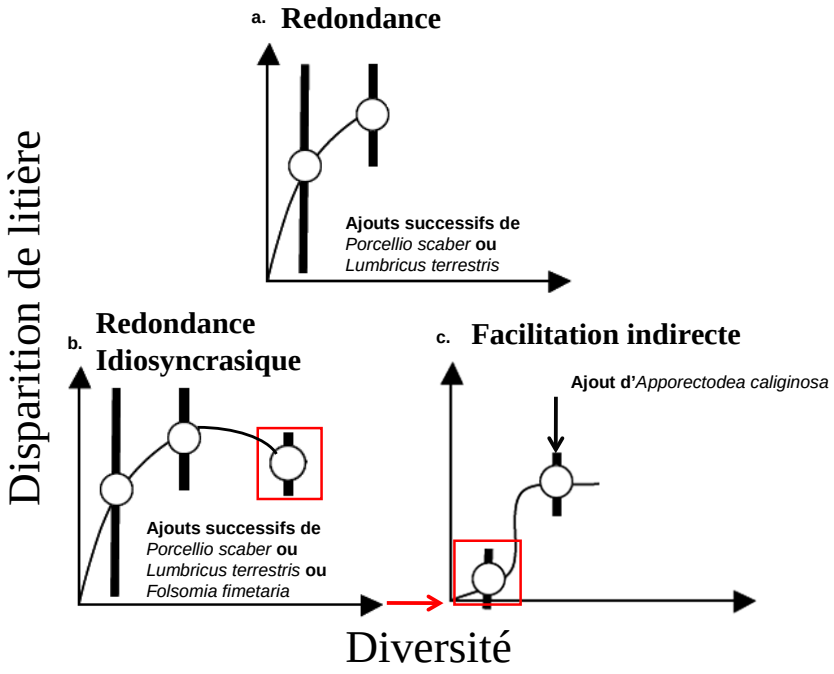


Figure 110. Hypothèses de relation biodiversité-fonction pour la disparition de litière de l'expérience « diversité ».

Lorsque *L. terrestris* est absent, l'intensité de la diminution de l'épaisseur de CDV suit le nombre de groupes fonctionnels présents, excepté pour la modalité monospécifique avec *A. caliginosa.* Celle-ci présente une valeur plus forte que le témoin. Ainsi, il semblerait que *P. scaber* et *F. fimetaria* contribuent à la baisse de l'épaisseur en CDV et que cet effet soit facilité par la présence d'*A. caliginosa.* On peut alors avancer l'hypothèse additive (Figure 111a.) entre *P. scaber* et *F. fimetaria*, suivie d'une hypothèse de facilitation indirecte (Figure 111b.) si *A. caliginosa* est ajouté. Ceci est peut-être consécutif à l'élargissement de niches par recyclage du CDV en profondeur. Si les diminutions d'épaisseurs de CDV restent faibles, lorsque *L. terrestris* est présent, la perte de CDV est plus prononcée. Dans une certaine mesure, *L. terrestris* peut être considéré comme une espèce-clef de la baisse d'épaisseur de CDV. L'ajout d'un seul décomposeur

(*P. scaber* ou *F. fimetaria*) puis d'un deuxième (*P. scaber* ou *F. fimetaria*) conduit néanmoins à une augmentation des performances (Figure 111c.). Par contre l'ensemble des trois décomposeurs (*P. scaber* et *F. fimetaria* et *L. terrestris*) et d'*A. caliginosa* ne change pas les performances par rapport à une modalité avec *L. terrestris* avec les deux autres décomposeurs (Figure 111c.). Dans les deux cas on est dans une hypothèse additive suivie d'une hypothèse nulle.

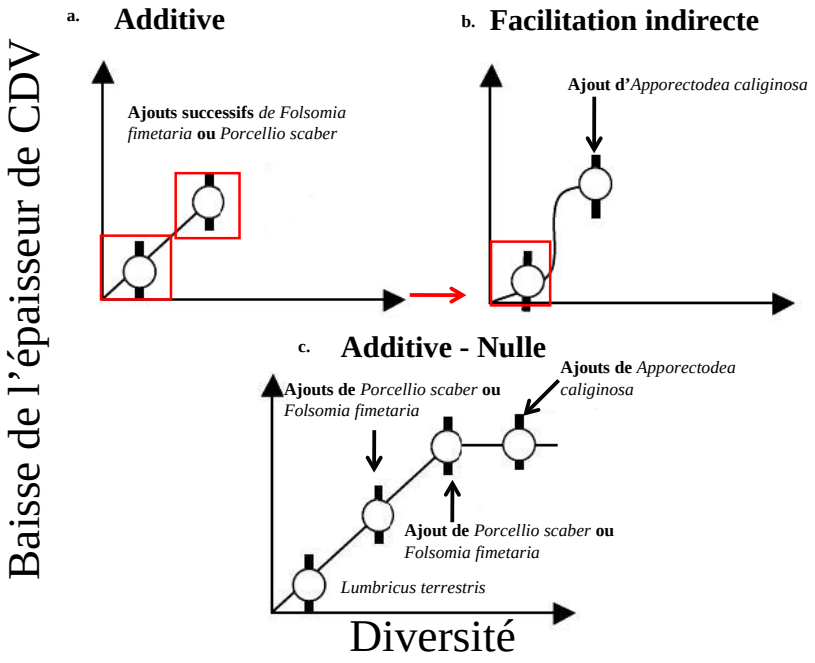


Figure 111. Hypothèses de relation biodiversité-fonction pour la disparition du CDV de l'expérience « diversité ».

Au regard des résultats sur l'humidité massique, seul un effet de la faune sur l'humidité massique dans l'horizon de CDV a été mis en évidence. Dans ce cas, il y a un effet monospécifique de *L. terrestris* et qui est amplifié par la présence d'*A. caliginosa. Lumbricus terrestris* peut être considéré comme une espèce clef (Figure 112a.). L'ajout d'*A. caliginosa* suit l'hypothèse de la facilitation indirecte une nouvelle fois (Figure 112b.). Ces deux vers sont connus pour assécher le sol en surface (Ernst *et al.*, 2009). Par ailleurs, une étude menée sur *Allobophora nocturna* (anécique) et *Allobophora chlorotica* (endogé) a démontré que le réseau de galeries de l'anécique est modifié en présence de l'endogé : le réseau présente moins de galeries verticales, qui sont plus petites et moins connectées (Capowiez *et al.*, 2001). Par opposition, le réseau de l'endogé reste inchangé. Dans notre cas, il semble que l'effet soit inverse puisqu'en présence des deux vers,

l'assèchement de la surface est accru. Autrement dit, une hypothèse serait que la connectivité des pores soit augmentée en leur présence. Une autre hypothèse est qu'en présence de l'endogé, *L. terrestris* localise plus son activité en surface. Enfin, lorsque *L. terrestris* est le seul ver et dans une moindre mesure lorsque que les deux vers sont présents, l'ajout de *P. scaber* et/ou *F. fimetaria* conduit à une réduction des performances. Cet effet est plus marqué quand ces deux espèces sont présentes (Figure 112c.). On peut penser à une hypothèse non décrite chez Naeem *et al.* (2002) qui consisterait en une compétition et qui aboutirait à une compétition de niches comme pour la disparition de litière. Cependant, cette compétition se produirait seulement à partir de deux décomposeurs présents et non plus trois. *L. terrestris* orienterait alors moins son activité en surface pour éviter la compétition.

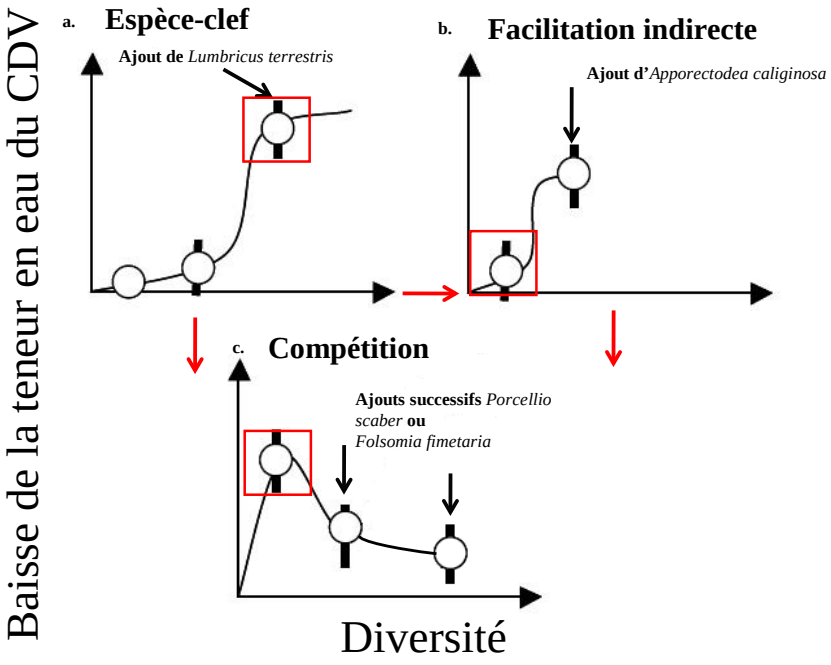


Figure 112. Hypothèses de relation biodiversité-fonction pour la teneur massique en eau du CDV de l'expérience « diversité ».

L. terrestris appauvrit l'horizon CDV en C_{org}, tandis que *F. fimetaria* enrichit l'horizon A. Ces deux espèces sont ainsi des espèces clefs du cycle du carbone dans leurs horizons respectifs. Les hypothèses probables sont que le collembole (i) incorpore du carbone de l'horizon du CDV et/ou de la litière dans le TIT/SPP et/ou (ii) par sa consommation de TIT/SPP, crée une microagrégration qui protège le carbone. Toutefois, la première hypothèse est à exclure puisqu'il n'y a pas d'effet significatif de *F. fimetaria* sur la

diminution du carbone de l'horizon de CDV et/ou sur la disparition de la litière qui pourrait expliquer un transport de carbone suffisant dans l'horizon A (Figure 113). *F. fimetaria* modifierais et/ou protégerais le carbone dans ses microagrégats. Les collemboles peuvent modifier la matière organique de la litière à une échelle moléculaire et l'incorporer au sol (Chamberlain *et al.*, 2006). Ceci pourrait expliquer les différences observées au niveau de l'horizon A (Figure 113). Toutefois, si modification moléculaire il y a dans le TIT/SPP de l'horizon A, il n'y en a pas eu dans l'horizon de CDV (dont la composition est très proche de celle d'une litière) dont la teneur en carbone ne varie pas en présence de *F. fimetaria*.

Une meilleure protection du carbone est lié au changement d'efficience d'utilisation des ressources carbonées par les microorganismes (Scullion et Malik, 2000). Toutefois, à l'échelle du cosme, les quantités d'ADN et de diversité microbienne en présence de *F. fimetaria* ne sont pas significativement différentes (Figure 113) et ne nous permettent pas d'affirmer que *F. fimetaria* joue sur les microorganismes. Dans l'horizon B, la densité de collemboles ne serait pas suffisante pour engendrer de telles modifications.

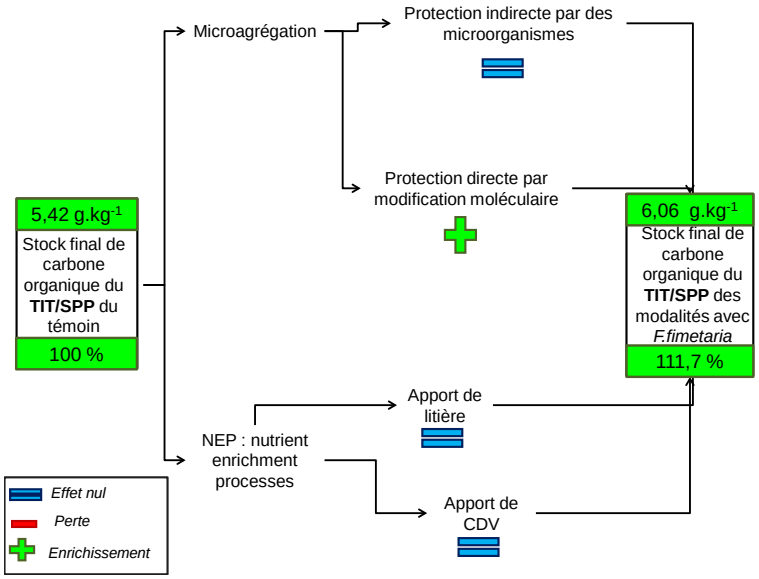


Figure 113. Mécanismes d'influence du collembole* Folsomia fimetaria *en modalités mono- et plurispécifiques sur le carbone organique dans l'horizon A de TIT/SPP du Technosol construit dans l'expérience « diversité » ; TIT/SPP=terre industrielle traitée et sous produit papetier.

Dans toutes les combinaisons où il est présent, *L. terrestris* engendre une perte de C_{org} dans l'horizon de CDV par rapport au témoin. Cette diminution de carbone reste faible. Un effet de dilution dans le cosme est à nouveau envisageable. Par analogie avec les

résultats concernant les turricules de surface : soit cette baisse est due à une consommation directe ou indirecte de carbone consécutive au passage du ver (GAP : gut associated processes), soit elle résulte d'un transport de matière (NEP : nutrient enrichment processes) par incorporation de litière et/ou de TIT/SPP dans l'horizon de CDV. Dans l'horizon A, la teneur en C_{org} est plus basse que celle du témoin dans la modalité avec *L. terrestris* seul, ce qui confirme que les diminutions de carbone observées ne sont pas seulement dues à un transfert de matière (NEP) (Figure 114). Si c'était le cas, les modifications de C_{org} dans l'horizon A résulteraient d'un apport de CDV et/ou de litière, qui tous deux auraient augmenté la teneur en C_{org} de l'horizon A. Il y a bien consommation de C_{org} par *L. terrestris* : le GAP (gut enrichment processes) est négatif (Figure 114). Bien que négligeable à l'échelle du cosme, la modalité avec *L. terrestris* présente des quantités d'ADN bactérien et fongique légèrement supérieures au témoin. Ceci est en accord avec la littérature qui assure que *L. terrestris* augmente la biomasse microbienne en surface et la diminue en profondeur (Jongmans *et al.*, 2003; Scullion et Malik, 2000) et qu'il ne modifie pas la diversité bactérienne (Postma-Blaauwa *et al.*, 2006). On peut donc penser à un effet local du ver sur les microorganismes qui est dilué au niveau du cosme. Toutefois, s'il y avait réellement une relation entre l'ADN des microorganismes et la dégradation du C_{org}, la modalité AcLtPsFf avec l'ensemble de la faune, qui présente des valeurs de dégradation de C_{org} plus basses que la modalité avec *L. terrestris* ne présenterait pas la plus forte valeur de quantités d'ADN. On ne peut donc pas affirmer que la dégradation est consécutive à un quelconque effet indirect sur les microorganismes (Figure 114). Par ailleurs, la teneur en C_{org} (horizon A) est par contre plus haute par rapport au témoin dans les combinaisons plurispécifiques contenant *L. terrestris* (effet de protection du carbone par *F. fimetaria* dans certaines modalités). Ceci est en désaccord avec la littérature qui montre qu'en présence de *L. terrestris* et d'*A. caliginosa*, la perte de carbone par minéralisation est supérieure aux combinaisons monospécifiques (Postma-Blaauwa *et al.*, 2006).

Toutefois, les NEP peuvent intervenir. Le transport de TIT/SPP de l'horizon A dans l'horizon de CDV (observé visuellement) pourrait expliquer une partie de la diminution du C_{org} de l'horizon CDV par *L. terrestris* (Figure 114a.). Ce n'est pas le cas de la litière qu'on estime être aussi riche en carbone que le CDV (Figure 114a.). Le transport de CDV et/ou de litière de l'horizon de CDV dans l'horizon A (observé visuellement) ne peut pas

en revanche expliquer la diminution de C_{org} de l'horizon A (Figure 114b.) observé dans la modalité avec *L. terrestris* seul. Mais ceci peut contribuer à expliquer l'augmentation de cette teneur dans les modalités contenant les combinaisons plurispécifiques avec *L. terrestris.* Les autres espèces permettraient ainsi de contrebalancer la faible perte de C_{org} dans l'horizon A provoqué par *L. terrestris* en y incorporant du CDV et/ou de la litière. Toutefois, il n'a pas été mis en évidence dans cette expérience une intensité différente de transport de matière et/ou de litière selon les modalités avec *L. terrestris* seul ou en combinaisons plurispécifiques. Ces assertions sont donc purement théoriques.

En conclusion, on peut avancer avec prudence que *L. terrestris* est une espèce clef (Naeem *et al.*, 2002) du cycle du carbone dans le Technosol, au moins dans le premier horizon qui engendre une consommation de carbone dans l'horizon de CDV (Figure 114a.) qui selon toute vraisemblance est imputable à une consommation locale de carbone, essentiellement du au GAP et dont une part peut être imputée au NEP. De plus un effet dilution intervient. Dans l'horizon A (Figure 114b.), seules des tendances sont décelables qui permettent d'expliciter les résultats obtenus dans l'horizon de CDV : la diminution légère serait imputable au GAP en modalité monospécifique et des NEP pourraient intervenir en modalité plurispécifique (non représentés sur la figure). Enfin dans l'horizon B, nous observons de forts écarts types qui ne nous permettent pas de conclure quoique ce soit. Aucune relation significative n'a pu être établie entre l'ADN des microorganismes et un quelconque effet sur le cycle du carbone.

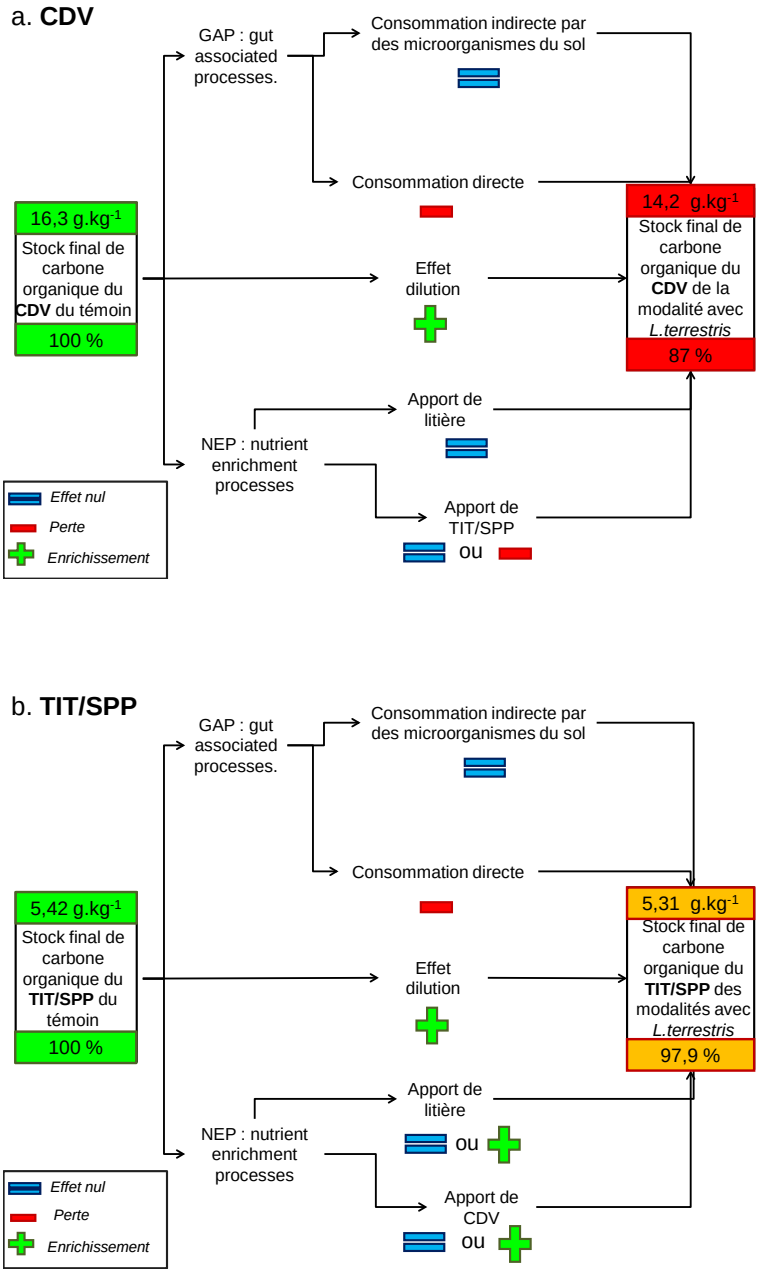


Figure 114. Mécanismes d'influence du ver* Lumbricus terrestris *en modalité monospécifique sur le carbone organique a) dans l'horizon de CDV b) dans l'horizon A de TIT/SPP du Technosol construit dans l'expérience « diversité » ; TIT/SPP=terre industrielle traitée et sous produit papetier ; CDV=compost de déchet vert.

Enfin, on ne remarque aucun effet de la diversité fonctionnelle sur la stabilité structurale du sol. Les valeurs présentent de forts écart-types et ainsi, les mêmes conclusions concernant *L. terrestris* dans le chapitre précédent restent valables pour l'ensemble de la faune. Le sol présente un « pouvoir tampon » qui lui permet d'assurer une forte stabilité avec ou sans faune.

Afin d'illustrer les propos qui ont été tenus à l'échelle du pédon, il a été choisi de comparer de structures biogéniques de deux ingénieurs de l'écosystème de deux catégories écomorphologiques différentes : épi-anéciques et endogés. Il s'agit de valider d'une part que ces deux structures, par leurs similitudes, proviennent d'un seul et même groupe fonctionnel et d'autre part, par leurs différences, proviennent de groupe écomorphologiques différents. A l'inverse de la galerie de *L. terrestris*, la galerie d'*A. caliginosa* ne présente pas deux parties distinctes visibles à l'œil nu. La galerie de *L. terrestris* comprend une périphérie éloignée de galerie essentiellement grise correspondant au TIT/SPP et un tapissage en périphérie proche plutôt noir de matière organique provenant du CDV. La galerie d'*A. caliginosa* apparaît entièrement minérale (TIT/SPP).

A l'échelle ultrastructurale, les deux galeries présentent des cutanes (**C Lt** et **C Ac**), tassées et riches en microorganismes. Ces structures du fait de l'enduit de mucus génèrent des microhabitats stables pour des communautés microbiennes spécifiques (Schrader, 1994; Tiunov et Scheu, 1999) qui pourront jouer un rôle dans l'agrégation. Il en résulte que la galerie de *L. terrestris* est légèrement plus stable que le témoin. Par contre la qualité de son agrégation (Figure 108) souvent à l'interface organo-minérale (**I Lt**) est peu différente du sol témoin. Malgré l'absence de mucus, les cutanes associées à une meilleure qualité de l'agrégation sont également des indices d'une meilleure stabilité chez les galeries d'*A. caliginosa*. Toutefois, à l'échelle du pédon, aucun ver n'a engendré de différence significative de stabilité du sol.

Par ailleurs, il est reconnu que les cutanes peuvent réduire la porosité au niveau des parois des galeries et modifier le transfert d'eau (Ehlers, 1975; Urbanek et Dolezal, 1992) suivant que le tapissage est organique (*L. terrestris*) ou minéral (*A. caliginosa*).

L'abondance et la diversité des microorganismes sont plus élevées dans les parois des galeries des deux vers que dans le sol témoin, conséquence possible du dépôt de mucus et à son C/N bas (Cortez et Bouché, 1987; Scheu, 1991) qui peut stimuler l'activité microbienne et les taux de minéralisation (Brown *et al.*, 2000). En effet, la structure des cutanes en fait des microhabitats favorables aux bactéries (Santruckova *et al.*, 1993; Zhang et Schrader, 1993). Par ailleurs, des bactéries impliquées dans le cycle de l'azote sont présentes dans les galeries d'*A. caliginosa* comme dans les turricules de *L. terrestris*.

Si les mêmes types de bactéries sont présents dans les galeries d'*A. caliginosa* et de *L. terrestris* le taux de minéralisation sera accéléré par rapport au sol témoin et d'autant plus que la galerie comporte de matière organique (CDV).

Ainsi, ces structures organo-minérales modifient la structure du sol en créant de la macroporosité, l'agrégation en stabilisant la structure par rapport au sol témoin (pour *L. terrestris*) et les transferts d'eau, par la création de macroporosité, les transferts de nutriments, par le déplacement de matière et les changements d'abondance et de communautés de microorganismes. Ces phénomènes prouvent qu'au niveau local, la notion d'ingénieurs de l'écosystème proposée pour les sols naturels (Brussaard, 1998) est valide pour un Technosol. On peut donc valider la notion de groupes écomorphologiques (épigé, anécique, endogé) tels que la perçoit la littérature (Bouche, 1972) pour le Technosol.

Au-delà de ces similitudes, il a été mis en évidence des différences dans les biostructures qui nous poussent à croire que l'intensité en sera différente. La différence de proportions de chaque matériau dans les galeries (plus minéral pour *A. caliginosa*) et le tapissage de CDV pour la galerie de *L. terrestris*, la différence d'agrégation dans les cutanes, sont autant d'indices qui nous font penser que les influences sur les divers processus seront contrastées en fonction des deux groupes écomorphologiques. Enfin, il faut rappeler que la composition des galeries de *L. terrestris* dépend fortement des conditions abiotiques. Quand est-il lorsque les galeries présentent une cutane organique (CDV) et un tapissage minéral ou organo-minéral (TIT/SPP et/ou litière) ?

4 Conclusion partielle

L'approche ultrastructurale à l'échelle de l'agrégat démontre que les contributions des deux ingénieurs de l'écosystème sont de même nature mais pourraient conduire à des effets d'intensités différentes. Des effets monofonctionnels de différentes natures et intensités ont ainsi été mis en évidence à l'échelle du cosme (Tableau 16) :

- en modalités monospécifiques :
  - une disparition de litière significative en présence de *P. scaber* seul et plus intense en présence de *L. terrestris* seul

- une disparition de CDV significative en présence de *L. terrestris* seul

❖ dans toutes les modalités excepté celles avec *A. caliginosa*

- une baisse de la teneur en eau du CDV significative en présence de *L. terrestris*

❖ quelles que soient les combinaisons d'espèces :

- une baisse de la teneur en C_{org} du CDV significative par *L. terrestris*
- une protection de la dégradation du C_{org} significative par *F. fimetaria*

Des interactions biotiques influencent l'intensité de ces contributions (Tableau 16) :

❖ pour la perte de masse de litière :

- un effet de redondance intervient entre *P. scaber* et *L. terrestris* dans les modalités sans *F. fimetaria*
- un effet de compétition à la ressource a lieu lorsque *P. scaber*, *L. terrestris* et *F. fimetaria* sont présents

❖ pour la diminution de l'épaisseur du CDV :

- un effet additif non significatif a lieu lorsque l'on ajoute successivement *P. scaber* ou *F. fimetaria* sans *L. terrestris*. Enfin l'ajout d'*A. caliginosa* accroît cet effet qui reste non significatif.
- un effet additif d'augmentation a lieu lorsque l'on ajoute successivement *P. scaber* ou *F. fimetaria* à *L. terrestris*. Enfin l'ajout d'*A. caliginosa* n'accroît pas cet effet non significatif.

❖ pour la teneur en eau du CDV:

- l'ajout d'*A. caliginosa* accroît l'effet de *L. terrestris*.
- un effet additif de diminution non significatif a lieu lorsque l'on ajoute successivement *P. scaber* ou *F. fimetaria* à *L. terrestris*.

Tableau 16. Récapitulatif des relations biodiversité-fonctions dans le Technosol construit.

	Perte de masse de litière	***Diminution de la hauteur de CDV***	***Assèchement de l'horizon de CDV***	***Diminution en C_{org} de l'horizon de CDV***	***Enrichissement en C_{org} de l'horizon A***
Espèce clef	1. *Lumbricus terrestris* 2. *Porcellio scaber*	*Lumbricus terrestris*	*Lumbricus terrestris*	*Lumbricus terrestris*	*Folsomia fimetaria*
Interactions biotiques	OUI	OUI	OUI	NON	NON
Type d'interactions	Redondance augmentation (*Lt* et *Ps*) Compétition (*Lt* et *Ps* et *Ff*)	Additive (*Ps* et *Ff*) + Facilitation indirecte (*Ps* et *Ff* et *Ac*) Additive (*Ps* et *Ff* et *Lt*)	Facilitation indirecte (Lt et *Ac*)		

Il convient à présent d'envisager les conséquences de ces contributions sur les processus pédogénétiques afin d'évaluer l'effet de la diversité fonctionnelle de la faune sur la pédogenèse du Technosol.

A l'échelle du pédon et de quelques mois d'évolution, la diversité fonctionnelle n'a pas d'influence détectée sur l'agrégation au sein du Technosol. Toutefois, les observations ultrastructurales des galeries des deux vers ont montré des morphologies et compositions ultrastructurales différentes (tapissages, cutanes, teneur en matière organique, taille). *Porcellio scaber*, *L. terrestris* et *F. fimetaria* participent aussi de manière directe ou indirecte à la régulation du cycle du carbone, pouvant influencer à long-terme la structure du sol et son agrégation. L'association de *L. terrestris* et d'*A. caliginosa* engendrant un assèchement plus intense en surface, ces deux groupes fonctionnels pourraient ainsi avoir des conséquences drastiques sur la dynamique

hydrique. La dynamique du carbone dans le Technosol construit est influencée par l'enfouissement de la litière par *L. terrestris* et *P. scaber*. Même si ces effets sont partiellement substituables et redondants, l'effet de *L. terrestris* domine et le ver contribue à diminuer la teneur en C_{org} et donc à le minéraliser et à enfouir le CDV par le tapissage organique de ses galeries en profondeur. En parallèle, *F. fimetaria* protège le carbone dans l'horizon A. L'enfouissement durable du carbone en profondeur et une minéralisation en surface seront accélérés en associant ces deux groupes.

Il y a donc un réel effet de la nature du groupe fonctionnel sur la régulation du cycle de l'eau et du carbone. Les interactions biotiques existent tout en restant peu significatives dans le temps de l'expérience.

L'ajout des espèces *L. terrestris* et *F. fimetaria* au sol constitue ainsi une première étape vers la restauration du fonctionnement du sol. *L. terrestris* assurera une bonne aération du sol, une minéralisation du sol en surface et un enfouissement de C_{org} en profondeur (d'autant plus s'il est associé à des d'autres décomposeurs). *Folsomia fimetaria* régulera l'apport de carbone en profondeur par sa protection d'une lixiviation ou minéralisation trop intenses. L'ajout d'autres espèces bien que présentant certains atouts pourraient amener à des dysfonctionnements du sol comme par exemple un assèchement prononcée en présence des deux vers ou une compétition de niches entre décomposeurs ralentissant l'enfouissement de carbone.

La notion de groupes fonctionnels écomorphologiques existe dans le Technosol construit. En effet, selon les groupes fonctionnels considérés, on obtient soit une absence de contribution pour le processus considéré soit des contributions différentes en nature (*F. fimetaria* et *L. terrestris* pour le C_{org}) et en intensité (*P. scaber* ou de *L. terrestris* pour la disparition de litière) qui auront donc une influence différente sur la pédogenèse.

Des interactions biotiques ont lieu dans le Technosol tout en étant rares et de faible intensité à l'échelle du pédon. Il semblerait qu'aux échelles de temps et d'espace considérées, l'influence des groupes fonctionnels pris individuellement sur l'évolution du sol soit supérieure à celle résultant des interactions entre ces groupes. En fait, en conditions de laboratoire, le nombre d'espèces impliquées est très faible, ce qui conduit

à amplifier les caractéristiques spécifiques de chacune des espèces et à difficilement interpréter les liens diversité-fonctions (idiosyncrasie) (Huhta *et al.*, 1998).

Chapitre VI Discussion générale

L'ensemble des résultats présentés dans les chapitres précédents a permis d'évaluer la survie et le comportement de la faune du sol au sein d'un Technosol construit modèle, ainsi que les conséquences fonctionnelles et pédogénétiques liées à la présence de la faune. Trois thèmes ont été étudiés : (i) la survie de la macro- et de la mésofaune dans ce sol, (ii) la contribution d'un ingénieur de l'écosystème modèle, le ver *L. terrestris* aux processus pédogénétiques, (iii) l'intérêt de considérer la diversité fonctionnelle de la faune du sol dans l'étude des processus pédogénétiques.

L'objectif de ce chapitre consiste à faire le bilan des résultats acquis en élargissant autant que possible les débats à l'ensemble des sols très anthropisés et en dégageant des résultats à vertu générique. Il s'agit également, sous un angle appliqué, de contribuer au développement du génie pédologique qui se définit comme le savoir-faire relatif à la gestion des sols très anthropisés (Séré, 2007). Sous cette entrée finalisée, nous proposons la mise en place d'outils d'aide à la décision afin de donner des orientations aux décideurs et gestionnaires de sites. L'objectif est alors d'optimiser la refonctionnalisation de sols très anthropisés.

1 Le Technosol construit : un caractère néoformé, frein de l'expression de la faune du sol et de sa diversité

1.1 La théorie du « pouvoir tampon »

Les ingénieurs de l'écosystème *L. terrestris* et *A. caliginosa* agissent sur les processus pédogénétiques du Technosol construit. Toutefois, l'intensité de leur contribution dépend de l'échelle d'espace à laquelle on se place. A l'échelle de l'agrégat, l'ensemble des processus est influencé significativement, ce qui n'est pas le cas à l'échelle du pédon. Ce résultat vaut à l'échelle de temps considérée de quelques mois à quelques années. Il

semblerait ainsi que les propriétés initiales du sol (*e.g.* quantité et qualité du carbone, stabilité structurale initiale) occultent l'effet du ver sur un certain nombre de processus à l'échelle du pédon. Cette capacité du sol, que l'on peut qualifier de « pouvoir tampon » (par analogie avec le terme utilisé pour caractériser la faible variation de pH d'une solution par ajout d'acides ou de bases) est observable pour les processus liés au cycle du carbone et à la stabilité du sol, qui tous deux font intervenir la matière organique du sol.

Par ailleurs, nos travaux ont mis en évidence que la nature et l'intensité de la contribution de la faune dépendent, au moins à l'échelle de l'agrégat, fortement des contraintes abiotiques (habitat). Le procédé de construction de sol associant des choix de matériaux, leur proportion et leur formulation au sein du pédon conditionnent donc de manière significative l'effet de la faune.

Dans le cas du Technosol construit, deux hypothèses sont envisageables :

1) soit l'effet du ver est de même intensité que dans un sol naturel, mais replacé à l'échelle du pédon il est dilué par le « pouvoir tampon » (dilution spatiale associé à une forte teneur en matière organique du sol) du Technosol. De tels effets peuvent être relevés dans la littérature concernant la stabilisation du sol par les vers (Schrader et Zhang, 1996) : plus la teneur en carbone du sol est élevée, moins l'effet du ver sur la stabilité du sol est perceptible,

2) soit l'addition de carbone disponible par l'apport de matériaux réduit les performances du ver. Par exemple, l'ajout intentionnel de carbone et d'azote dans un système forestier augmente la biomasse de la chaîne trophique de décomposeurs (nématodes) tout en entraînant une diminution de l'intensité du processus écologique observé (dans ce cas, ratio masse/ longueur de tige de pins) (Nieminen et Setälä, 2001).

L'expérience « diversité » avec *L. terrestris* ainsi que d'autres espèces, conforte plutôt la première hypothèse, puisque les différences mesurées sur les sols sont peu significatives. L'expérience « comportement » avec les divers procédés de construction de Technosol donne des résultats qui vont dans le même sens : les variations de biomasse et les contributions du ver, si elles ne suivent pas strictement la teneur brute en carbone (on aurait par exemple, les plus grandes biomasse et contributions pour la modalité 100% compost), suivent bien un gradient de carbone biodisponible. Cette

biodisponibilité est multifactorielle et dépend de la teneur brute en carbone mais aussi de l'humidité du matériau. Ainsi, la deuxième hypothèse est réfutée, car teneur en carbone disponible et effets de la faune sont corrélés positivement. En effet, le procédé de construction dans la modalité 25% CDV-75% TIT/SPP présente la plus grande teneur en carbone disponible et permet la plus forte valeur relative de biomasse des vers et les plus fortes valeurs de contributions relatives (qui correspondent au rapport de l'intensité d'un processus en présence de faune sur l'intensité du même processus sans faune). Les sols construits ont donc une capacité à masquer les effets de la faune, surtout dans le cas d'apports de matériaux organiques en grande quantité. Le masquage des effets pourrait alors disparaître progressivement avec la dégradation des matières organiques via d'autres processus chimiques et/ou biologiques.

1.2 La théorie des conditions non limitantes

Une niche écologique est définie (Hutchinson, 1975) comme un hypervolume pour lequel chaque dimension représente soit une condition (*e.g.* température, humidité) soit une ressource (*e.g.* alimentaire, spatial). Pour une espèce, la niche écologique fondamentale représente la combinaison linéaire dans cet espace qui lui confère toutes les ressources et les conditions nécessaires à son existence. La niche réalisée est proche et ressemble à la niche fondamentale, mais du fait de contraintes diverses (biotiques et abiotiques), elle ne lui confère pas la totalité des ressources et conditions optimales. La niche réalisée est la niche écologique qu'une espèce est contrainte d'occuper dans un milieu donné.

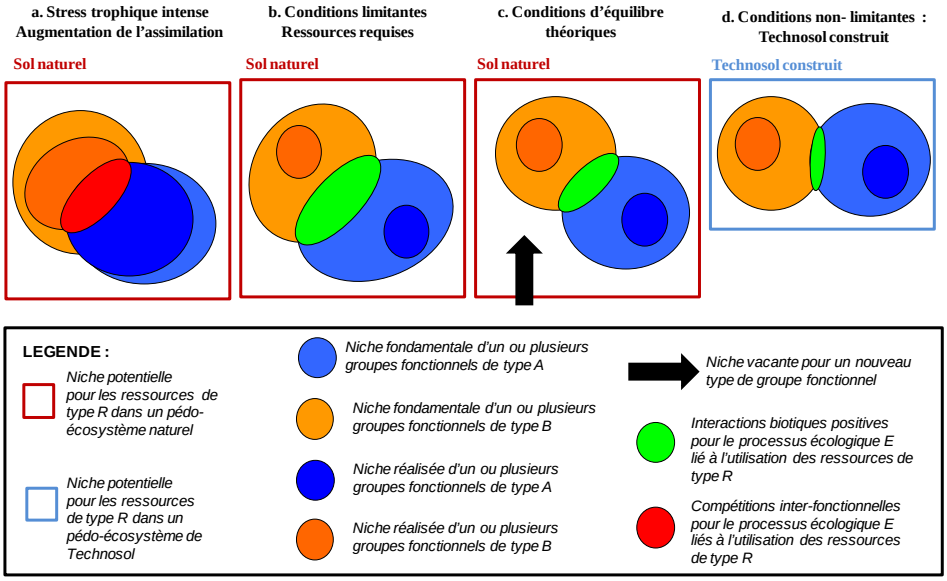
En milieu naturel, en cas de limitation de ressources, la taille de la niche écologique fondamentale d'une espèce ou d'un groupe fonctionnel augmente tandis que la niche réalisée reste la même (Berg et Ellers, 2010) (Figure 115). La limitation de ressources entraîne des modifications physiologiques de l'animal qui augmente ainsi ses capacités à explorer les ressources : sa niche fondamentale s'en voit agrandie. Il en résulte plusieurs conséquences sur la dynamique des communautés de groupes fonctionnels et sur l'effet de ces communautés sur un processus écologique ciblé (*e.g.* décomposition de la matière organique). Tout d'abord, le fait que les tailles des niches fondamentales augmentent, conduit à une plus grande utilisation de la niche potentielle du pédo-écosystème et

réduit ainsi les niches vacantes. L'arrivée de nouveaux groupes fonctionnels est peu probable. Par contre, cette augmentation ne réduit pas la coexistence des groupes fonctionnels déjà présents. Par ailleurs, en théorie, si les niches réalisées ne changent pas, le processus écologique ne devrait pas varier en intensité. Toutefois, si les deux niches fondamentales se chevauchent, l'augmentation de la taille des niches fondamentales peut conduire à des interactions positives entre groupes fonctionnels qui résultent d'une meilleure utilisation qualitative des ressources. Le processus écologique en question s'en voit légèrement augmenté en intensité (Petersen, 1994).

En cas d'apparition d'un stress intense, la taille de la niche fondamentale qui a déjà augmentée auparavant, n'augmente pas à nouveau. L'animal a déjà modifié sa physiologie lors de la limitation des ressources : ses capacités d'adaptation ne sont pas infinies. Par contre, les tailles des niches écologiques réalisées augmentent (Berg et Ellers, 2010) (Figure 115). Ceci aboutit à une compétition entre groupes fonctionnels qui aboutira à l'exclusion de l'un des deux. Même si les niches réalisées augmentent de taille, le processus écologique diminue en intensité du fait de la naissance de la compétition. Il en résulte un effet nul de la diversité sur les processus écologiques (Liiri *et al.*, 2002b).

Même si un Technosol est formé de matériaux contrastés, chaque matériau constitutif présente initialement une offre de ressources de qualité homogène. C'est pourquoi la taille de la niche potentielle d'un Technosol construit est réduite par rapport à celle d'un pédo-écosystème naturel qui présente très souvent une plus grande hétérogénéité de ressources. Les niches vacantes pour un grand nombre de groupes fonctionnels sont ainsi réduites initialement (*e.g.* dans les études *in situ*, l'essentiel des espèces de collemboles possèdent des traits de vie similaires typiques des collemboles hémiédaphiques de compost). A l'opposé, en termes de ressources quantitatives, le Technosol est beaucoup plus fourni qu'un sol « naturel ». Les conditions pour les groupes fonctionnels de faune présents sont donc non limitantes (*e.g.* dans les études *in situ*, l'abondance et la diversité spécifique sont supérieures à un milieu naturel dans les premiers mois) sauf en cas de toxicité du sol. Par opposition avec ce qui se passe dans les milieux naturels, on peut envisager que la taille de la niche fondamentale diminue dans le Technosol construit. Il est aussi envisageable que si des conditions non limitantes perdurent, la taille des niches réalisées se réduise également. Toutefois, en

situation monospécifique, nos résultats indiquent que ce n'est pas le cas aux échelles de temps de nos expériences. En effet, l'intensité de la contribution de *L. terrestris* à un processus écologique ne diminue pas avec l'augmentation quantitative des ressources du Technosol. La réduction des niches fondamentales réduit les niches vacantes, ce qui diminue d'autant plus le potentiel de colonisation par d'autres groupes fonctionnels. L'augmentation des niches fondamentales aboutit également par rapport aux autres situations à une plus faible complémentarité fonctionnelle (diminution de la zone verte hachurée, Figure 115) et ainsi le processus écologique en question diminue en intensité.



	a. Stress trophique intense Augmentation de l'assimilation	b. Conditions limitantes Ressources requises	c. Conditions d'équilibre théoriques	d. Conditions non-limitantes : Technosol construit
Changements des niches écologiques par rapport aux conditions d'équilibre	Elargissement des niches fondamentales et réalisées	Elargissement des niches fondamentales	/	Réduction des niches fondamentales (et/ou des niches réalisées)
Dynamique des communautés	Compétition entre espèces présentes Pas de niches vacantes	Pas de compétition entre espèces présentes Réduction des niches vacantes pour d'autres groupes fonctionnels	Pas de compétition entre espèces présentes Niches vacantes pour d'autres groupes fonctionnels	Pas de niches vacantes du fait de l'étroitesse de la niche potentielle
Impact sur le processus écologique	Nul	Impact fort	Impact moyen	Impact faible
Complémentarité fonctionnelle	Aucune complémentarité fonctionnelle	Complémentarité fonctionnelle forte	Complémentarité fonctionnelle moyenne	Très faible complémentarité fonctionnelle

Figure 115. Théorie des niches écologiques appliquée au Technosol construit (d'après Berg & Ellers, 2010).

Cette théorie des conditions non limitantes semble en accord avec les principaux résultats de la Thèse. Les résultats de l'étude des communautés de faune dans un

Technosol construit tendent à prouver que les communautés de microarthropodes du sol sont largement inféodées à la couche de compost de surface du Technosol construit puisqu'elle comporte essentiellement des individus pionniers ou inféodées au compost. Ces communautés dépendent essentiellement de la nature de l'habitat. En revanche, la communauté de macrofaune semble moins corrélée à la formulation du Technosol, même si des indices le suggèrent : on retrouve une majorité de décomposeurs (vers épigés, cloportes, millipèdes) du fait de la présence de compost, le seul ver endogé est typique des milieux hydromorphes (boue de papeterie). En outre, seules quelques interactions biotiques ont été mise en évidence *in situ* (collemboles/gamases ; collemboles/collemboles). L'influence des groupes fonctionnels de faune pris individuellement semble supérieure à celle résultant des interactions entre ces groupes. Ce phénomène serait consécutif à la réduction de la taille des niches fondamentales qui engendre une réduction des complémentarités fonctionnelles.

La théorie des ressources non limitantes explique ainsi la présence de communautés spécifiques du compost et leur forte abondance. Elle explique aussi les faibles complémentarités fonctionnelles observées et établit une hiérarchie forte des contraintes : la contrainte d'habitat (procédé de construction du Technosol) joue un rôle prépondérant par rapport aux contraintes biotiques (interactions fonctionnelles) au moins pendant les premiers stades d'évolution du sol. Pendant les trois premières années, les communautés de faune du Technosol construit (Huhta *et al.*, 1979) sont très inféodées aux matériaux technogéniques organiques. La contrainte de dispersion n'est pas prise en compte dans cette théorie mais peut bien entendu jouer un rôle dans la colonisation des niches vacantes. L'absence totale de macrofaune au temps zéro de la formation du sol démontre l'influence forte de ces contraintes (Haimi, 2000).

En revanche, la théorie des ressources non limitantes n'explique pas en totalité la faible intensité de contribution de *L. terrestris* aux processus de fonctionnement et d'évolution du sol. Ceci serait dû au « pouvoir tampon » du sol qui masque l'effet de *L. terrestris* à l'échelle du pédon.

En résumé, la nature néoformée d'un Technosol constitué de matériaux bruts et contrastés constitue un puissant filtre qui régit les réponses et les effets de la faune et qui masque les interactions biotiques internes. Ces phénomènes apparaissent au moins

dans les premiers stades d'évolution du Technosol. Les Technosols, et plus généralement les sols très anthropisés, sont en effet soumis à des facteurs d'évolution autres que biologiques. La transformation physique et chimique des constituants de ces sols est concomitante de l'action des agents biologiques et pourrait engendrer progressivement des conditions de milieu plus propices à l'expression des effets de la faune.

2 Apports de la Thèse au génie pédologique : vers un modèle décisionnel

2.1 Objectifs et structure du modèle décisionnel

L'objectif du génie pédologique est d'atteindre pour un sol et un contexte donné un niveau de fonctionnalité optimal. Cette approche nécessite des prises de décision nombreuses pour optimiser le procédé de construction de sol et sa gestion. Les résultats acquis dans cette Thèse doivent alors être valorisés dans un modèle d'aide à la décision afin de systématiser l'approche du génie pédologique dans le contexte de restauration des sols très anthropisés (Séré, 2007). La démarche de modélisation prédictive associée au développement d'un outil d'aide à la décision passe par différentes étapes : (i) le choix du modèle, (ii) la construction du modèle conceptuel, (iii) le développement de sous-modèles fonctionnels indépendants et enfin, (iv) la réalisation d'une interface qui relie les sous-modèles entre eux.

Nous nous proposons dans un premier temps de reprendre la structure du modèle décisionnel existant pour les Technosols construits (Séré, 2007) et de l'amender avec nos résultats. Ce modèle préexistant est un modèle décisionnel de type multi-attributs qui consiste à décomposer le problème décisionnel en sous-problèmes ou modules plus simples à résoudre (Bohannec, 2003). Dans un deuxième temps, nous détaillerons la démarche de construction d'un sous-modèle.

L'objectif du modèle conceptuel doit, en fonction des caractéristiques du site et des fonctionnalités attendues, optimiser le procédé de construction de sol à l'aide de déchets et sous-produits mais aussi optimiser la gestion de la faune du sol. La structure

conceptuelle se divise en quatre modules (Figure 116). Les paramètres d'entrée du modèle sont les caractéristiques du site à requalifier (*e.g.* situation, substrat), les objectifs de remise en état (*e.g.* usage futur, qualité environnementale, moyens économiques) et les gisements de matériaux disponibles pour la construction de sols (*e.g.* nature, propriétés, coût) (Figure 116). Les paramètres de sorties sont les fonctionnalités attendues, les propriétés nécessaires initiales pour atteindre ce niveau de fonctionnalité et le procédé de construction du Technosol pour atteindre ces propriétés (module 1, Figure 116), les propriétés faunistiques initiales (module 2, Figure 116), les propriétés du sol évolué (module 3, Figure 116), et les choix de la faune inoculée et des pratiques culturales (module 4, Figure 116),

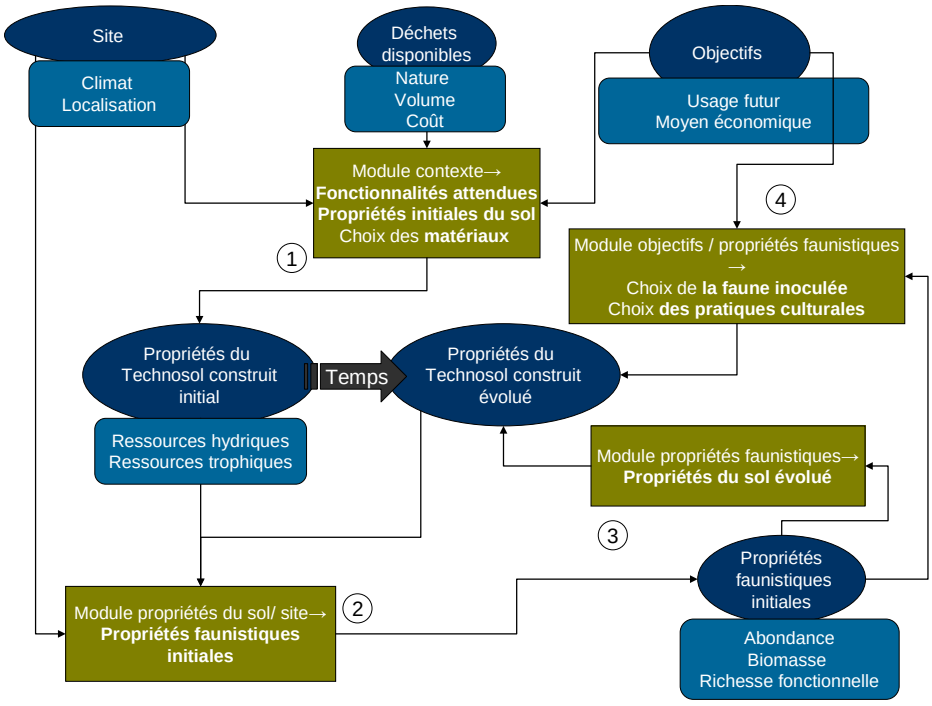


Figure 116. Structure conceptuelle du modèle décisionnel. En bleu, les variables d'entrée et de sortie, en beige, les sous-modules, modifié d'après Séré, 2007.

2.2 Exemple de sous module : influence de *Lumbricus terrestris* sur la macroporosité

Dans la structure du modèle décisionnel proposé, nous nous plaçons dans une démarche « d'évaluation » de l'effet du ver sur la pédogenèse du Technosol basée sur des résultats d'expérimentations en laboratoire (sous-module 3, Figure 116). Nous avons choisi de

développer un modèle de l'effet de *L. terrestris* sur la macroporosité du Technosol construit à l'échelle du cosme et à un pas de temps de l'ordre du mois. En effet, l'impact de *L. terrestris* sur la macroporosité du sol est bien décelable et quantifiable à l'échelle de l'agrégatosphère, mais aussi à l'échelle du pédon.

La démarche globale de la modélisation de l'effet de *L. terrestris* dans le Technosol est élaborée à travers le logiciel STELLA (Costanza et Gottlieb, 1998; Laganis et Debeljak, 2006). STELLA est un logiciel qui permet de modéliser des systèmes complexes par la construction de diagrammes « stocks et flux ». La première étape consiste à définir les constituants de temps (Annexe XI), d'espace et les sous-constituants du système que décrit le modèle (Jørgensen et Bendoricchio, 2001).

Nous focalisons donc notre étude sur l'effet du ver sur la macroporosité à l'échelle du cosme (qui permet d'accéder à des résultats acquis de l'échelle de l'agrégat à l'échelle du cosme) et à l'échelle de temps de l'ordre de quelques semaines.

Un modèle conceptuel qui présente les variables d'état, les processus et les paramètres est construit. Les variables d'état (Figure 117) sont définies comme étant le plus petit groupes de données qui contienne suffisamment d'informations sur l'histoire du système pour permettre le calcul de son comportement futur. Pour le Technosol, nous voulons connaître à la fois le volume total de galeries et les volumes de galeries répartis dans l'horizon de CDV et celui de TIT/SPP sous l'influence du ver *L. terrestris*. Les variables d'état sont donc *le volume total* de galeries créées, le *volume de galeries CDV* dans le CDV et le *volume de galeries TIT/SPP* dans le TIT/SPP. Les variables d'état initiales sont représentées par le *volume de CDV* initial et *le volume de TIT/SPP* initial. Enfin, la variable d'état d'influence est *la biomasse des vers*. Les liens entre variables d'état sont listées à travers une matrice d'adjacence (Tableau 17) (Jørgensen et Bendoricchio, 2001).

Tableau 17. Matrice d'adjacence du sous-modèle. 0 = absence de lien direct ; 1 = lien direct. Biomasse en grammes, volumes en cm³ sauf volume de TIT/SPP dans le CDV en mm³,.

	Biomasse des vers	*Volume de CDV*	*Volume de galeries CDV*	*Volume de TIT/SPP*	*Volume de galeries TIT/SPP*	*Volume total*
Biomasse des vers		0	1	0	1	1
Volume de CDV	0		1	0	0	0
Volume de galeries CDV	1	1		0	0	1
Volume de TIT/SPP	0	0	0		1	1
Volume de galeries TIT/SPP	1	0	0	1		1
Volume total	1	0	1	0	1	

A partir de cette matrice et des liens biologiques connus de la littérature, nous pouvons décrire les processus qui sont les liens entre les variables d'état (Figure 117).

Le *volume total* de galeries est relié aux *volumes CDV* et *TIT/SPP* initiaux respectivement par le processus d'ingestion de CDV et par l'ingestion de TIT/SPP. On a voulu distinguer parmi le volume total des galeries, le volume représenté par les galeries dans le CDV de celles dans le TIT/SPP. Ainsi, le *volume de CDV* est relié au *volume de galeries CDV* par le processus d'ingestion de CDV. Il en est de même pour le TIT/SPP. Même s'ils sont représentés deux fois, les processus d'ingestion de CDV et d'ingestion de TIT/SPP sont biologiquement les mêmes. Enfin *la biomasse des vers* dépend de la croissance. Et bien que présentant des liens dans la matrice d'adjacence avec les volumes ingérées de galeries, il n'existe pas de processus biologiques directs reliant la *biomasse des vers* avec les deux variables d'état que sont : le *volume de galeries CDV*, le *volume de galeries TIT/SPP* et le *volume total*. Ce lien biologique, s'il est à prendre en compte (cela sera développé dans la partie hiérarchisation des paramètres), sera formalisé par un lien entre le processus considéré (ici, l'ingestion de CDV ou l'ingestion de TIT/SPP) et la variable d'état (ici, *la biomasse des vers*) qui joue dans ce cas à la fois un rôle de variable d'état et un rôle de paramètre pour le processus ciblé. Ce lien entre variable d'état et processus, s'il existe, est alors représenté par une flèche rose.

Chaque processus représenté sur le schéma conceptuel renferme une équation à plusieurs paramètres (Figure 117), qui relie deux variables d'état. Comme on l'a vu précédemment, une variable d'état peut jouer le rôle de paramètre. La logique de modélisation préconise de trouver un maximum de paramètres dans la littérature (Jørgensen *et al.*, 2000; Jørgensen et Bendoricchio, 2001). Toutefois, lorsque les paramètres ne sont pas disponibles, les techniques d'estimation à partir d'expérimentations *in situ* ou en laboratoire sont nécessaires (Jørgensen et Bendoricchio, 2001). Dans notre cas, nous n'avons trouvé aucun paramètre à notre connaissance dans la littérature pouvant être utilisé dans notre modèle. Dans l'exemple du Technosol, les paramètres renseignés avec nos expériences à différents temps sont alors : l'*humidité initiale*, le *C/N initial*, le *volume de TIT/SPP dans le CDV*, la *production de turricules en surface* (Figure 117). S'y ajoute le paramètre *formulation initiale* que nous proposons pour pallier l'absence de données sur les variables d'état concernant les volumes de TIT/SPP et de CDV initiaux (Figure 117).

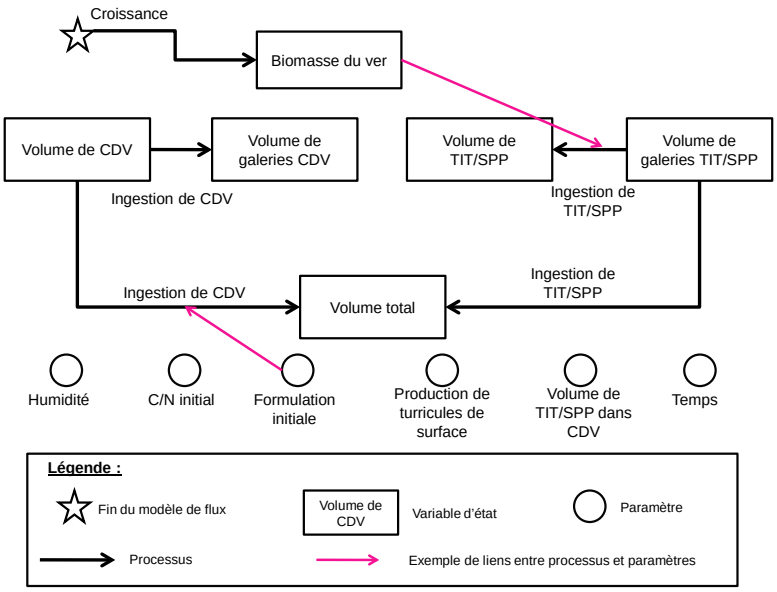


Figure 117. Schéma conceptuel de la modélisation par STELLA de la création de galeries par* Lumbricus terrestris*: les variables, les processus et les paramètres.

A partir de ces paramètres, il convient de créer des équations mathématiques pour formaliser chaque processus entre deux variables d'état. Pour cela, une hiérarchisation de l'effet des paramètres sur les processus est réalisée grâce au data mining (Han et Kamber, 2006; Lavrač *et al.*, 2007). Dans le cas de la prédiction de la variable d'état

volume total de galeries par exemple, nous avons utilisé les données expérimentales renseignant les variables d'état : volume total de galeries (volume total), volume final de galeries dans le CDV (volume de galeries CDV), volume final de galeries dans le TIT/SPP (volume de galeries TIT/SPP), biomasse initiale de vers au début de l'expérience (biomasse initiale ver), variation en pourcentage de la biomasse des vers au cours de l'expérience (biomasse ver) et renseignant les paramètres : production finale de turricules de surface (production de turricules de surface), temps (temps), volume de TIT/SPP final dans le CDV (volume de TIT/SPP dans le CDV) , humidité initiale (humidité), C/N initial (C/N), proportion initiale de compost (formulation initiale). Les mesures de volumes proviennent de la tomographie. Les résultats montrent que le volume total de galeries dépend en premier lieu du « volume de galeries dans le CDV » suivi par la « formulation initiale du sol » et du « volume de TIT/SPP déplacé dans le CDV » (figure 7).

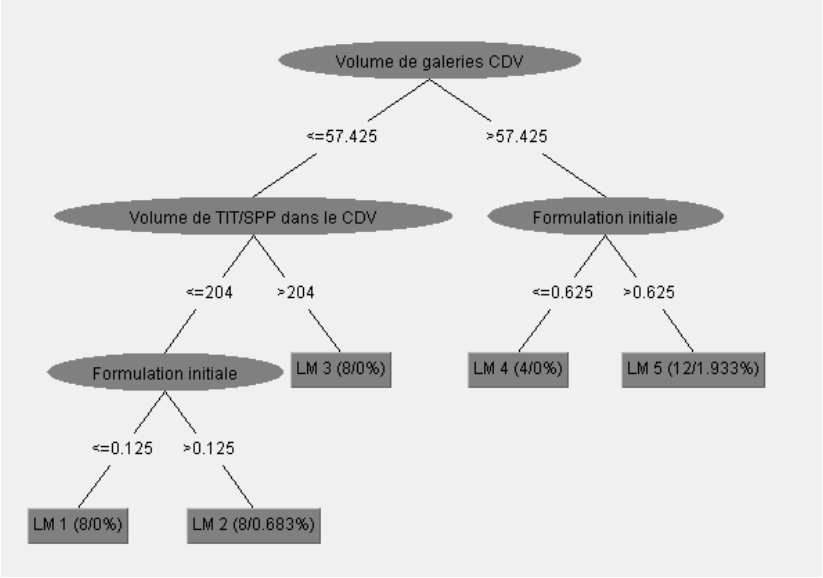


Figure 118. Arbre de classification et groupes (WEKA) explicatifs de l'attribut « volume total » de galeries après data mining sur tous les attributs. Coefficient de corrélation = 0.97 (Annexe X). Volume de galeries en cm^3, volume de TIT/SPP dans le CDV en mm^3, formulation initiale en % de CDV. TIT/SPP=terre industrielle traitée et sous produit papetier ; CDV=compost de déchet vert.

De la même manière, la hiérarchisation des paramètres influençant le volume de galeries CDV, est résumé en Figure 119.

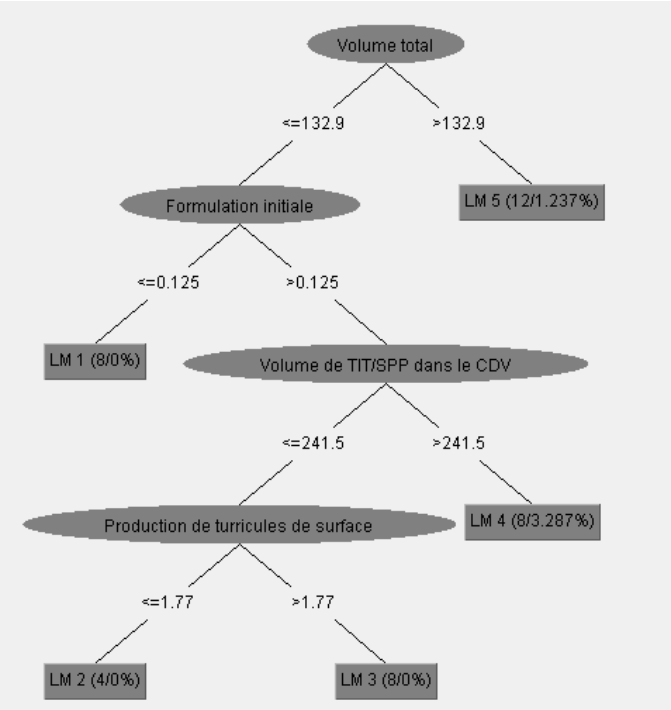


Figure 119. Arbre de classification et groupes (WEKA) explicatifs de l'attribut « volume total » de galeries après data mining sur tous les attributs excepté l'attribut « volume de galeries CDV ». Coefficient de corrélation = 0.99 (Annexe X). Volume total de galeries en cm^3, volume de TIT/SPP dans le CDV en mm^3, formulation initiale en % de CDV, production de turricules de surface en grammes de turricules secs. TIT/SPP=terre industrielle traitée et sous produit papetier ; CDV=compost de déchet vert.

Le volume de galeries dans le CDV dépend en premier lieu du « volume total de galeries », puis, le cas échéant, de la « formulation initiale ». Deux autres paramètres apparaissent ensuite, le « volume de TIT/SPP dans le CDV » et la « production de turricules de surface ».

Par des procédures récurrentes de data mining, certains paramètres seront exclus de notre modèle, car leur poids dans la modélisation est minime. Ainsi le paramètre « formulation initiale » revient de manière récurrente dans les simulations de data mining et apparaît à nouveau comme un paramètre majeur expliquant l'effet de la faune sur le Technosol.

Conclusion générale

Les conclusions majeures de cette Thèse se structurent autour des trois grandes hypothèses posées en début de travail.

En premier lieu, il apparait évident que la faune du sol survit dans le Technosol construit. Que ce soit *in situ* ou en laboratoire, le Technosol est support de vie de la faune du sol. Deux facteurs d'influence de ces paramètres de vie ont été testés, à savoir le procédé de construction du Technosol construit représentatif des contraintes abiotiques et les interactions entre groupes fonctionnels, représentatives des interactions biotiques. Il s'avère que le procédé de construction du Technosol influence fortement la survie des animaux tandis que les interactions biotiques apparaissent comme un facteur de seconde importance. Ainsi, l'hypothèse **I** : la survie de la faune du sol dans un Technosol construit dépend : (i) des contraintes environnementales (dispersion et habitat) et (ii) des interactions biotiques est confirmée mais avec une certaine nuance puisque la survie de la faune du sol est dépendante majoritairement des contraintes abiotiques et minoritairement des contraintes biotiques (Figure 120). La faune du sol peut néanmoins être considérée à part entière comme un facteur d'évolution de la pédogenèse du Technosol construit.

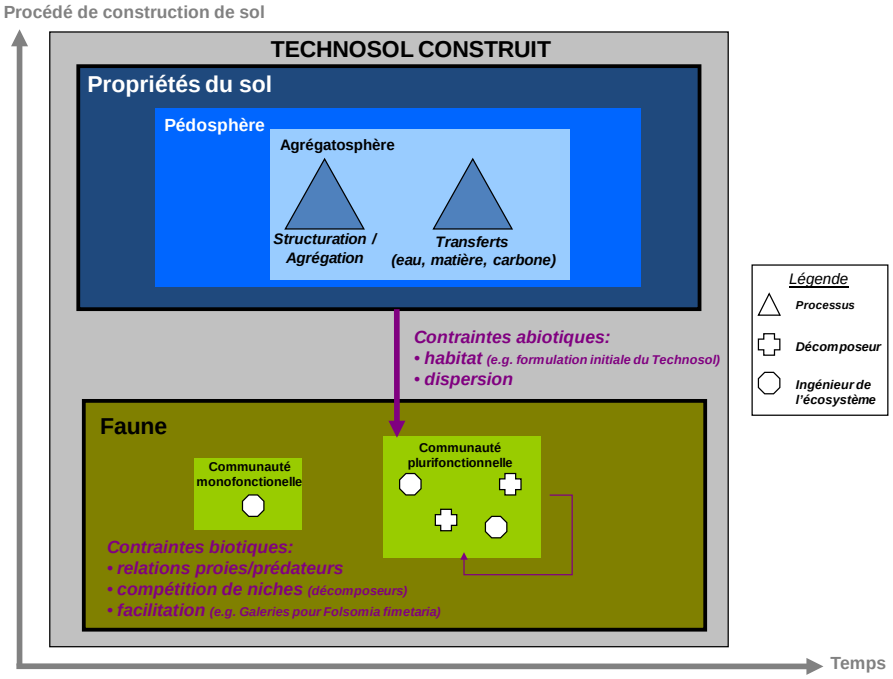


Figure 120. Principaux résultats de la question scientifique I : quel type de faune du sol est susceptible de coloniser le Technosol construit ?

En deuxième lieu, nous nous sommes attachés à expliciter l'effet d'un modèle d'ingénieur de l'écosystème *L. terrestris* sur la pédogenèse du Technosol construit. Il s'avère que *L. terrestris* contribue effectivement à la pédogenèse mais que cette contribution dépend du processus pédogénétique et de l'échelle spatiale considérés. Le ver favorise principalement la structuration des matériaux par la création d'une macroporosité, amplifiant la circulation de l'eau. Par les structures biogéniques formés, le ver contribue dans une moindre mesure à la formation d'agrégats stables et à la décomposition de la matière organique, modifiant la teneur en carbone organique du sol. La nature et l'intensité de l'effet du ver dépendent des caractéristiques du Technosol et les différences sont plus marquées à l'échelle de l'agrégat qu'à l'échelle du pédon. L'hypothèse **II** : les vers de terre ont un effet significatif sur les processus pédogénétiques dans le Technosol construit est donc en partie réfutée puisque l'action de la faune du sol dépend de l'échelle spatiale considérée (Figure 121).

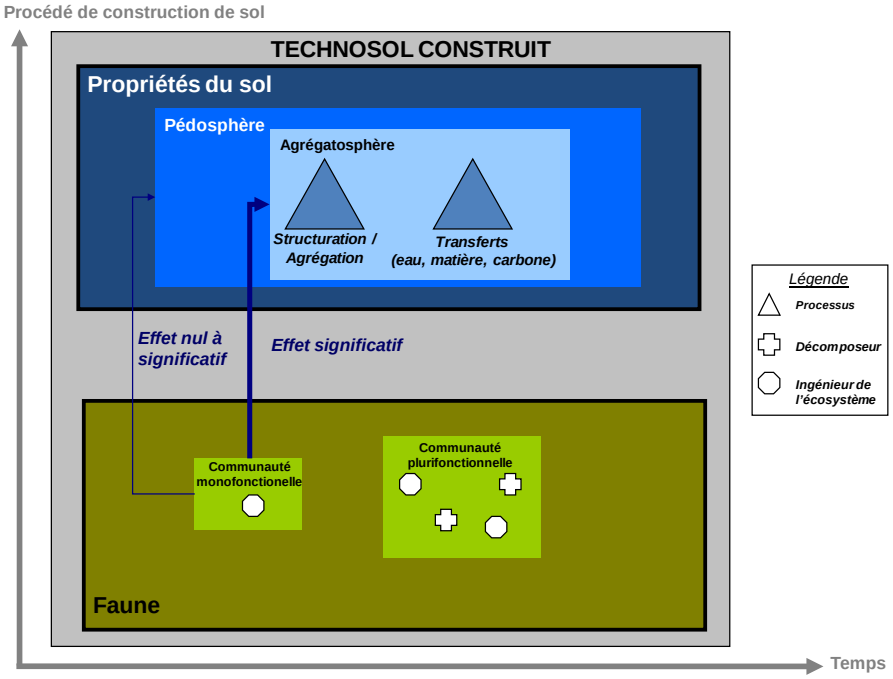


Figure 121. Principaux résultats de la question scientifique II : est ce que la faune du sol a un effet significatif sur la dynamique de structuration/agrégation, les transferts d'eau, de matière et de carbone au sein d'un Technosol construit ?

Lorsque plusieurs groupes d'organismes assurant des fonctions différentes sont associés dans le profil de Technosol, des effets sont mesurés majoritairement sur la décomposition de la matière organique et dans une moindre mesure sur les transferts d'eau et l'agrégation. L'influence des groupes fonctionnels pris individuellement sur l'évolution du sol sont d'intensités variables selon les échelles de temps et d'espace considérées. L'effet d'un groupe fonctionnel écomorphologique est unique (ou absent) en nature et/ou en intensité pour un processus donné. Ceci vient confirmer les résultats obtenus avec *L. terrestris*. Les interactions biotiques observées sont rares et de faible intensité. L'influence des groupes fonctionnels pris individuellement semble être supérieure à celle résultant des interactions entre ces groupes. L'hypothèse **III** : la notion de diversité fonctionnelle existe dans un Technosol construit est en partie réfutée (Figure 122).

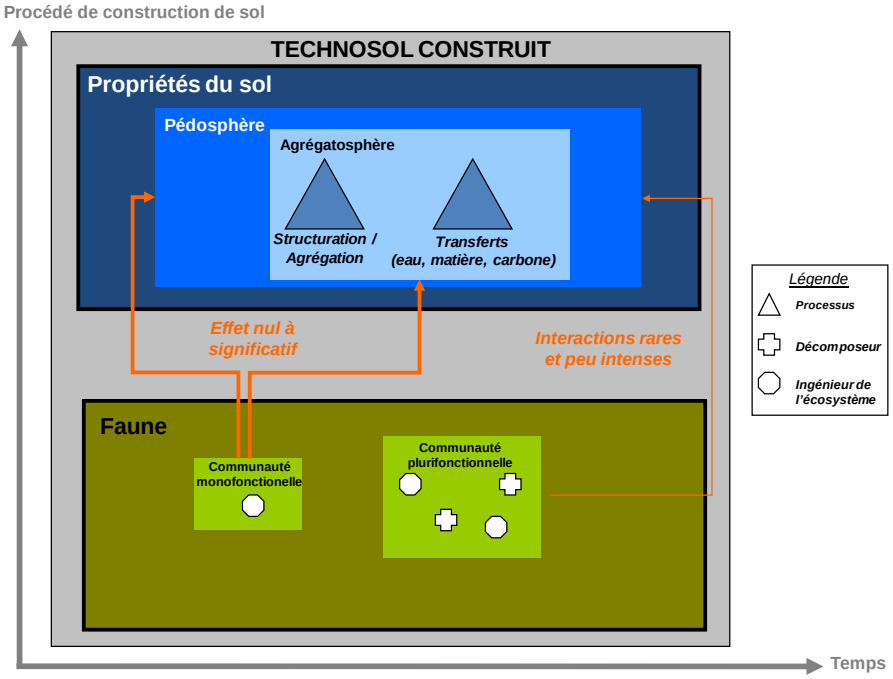


Figure 122. Principaux résultats de la question scientifique III : est ce que la notion de diversité fonctionnelle de la faune existe dans un Technosol construit ?

De toutes ces conclusions, on peut en dégager des principes généraux qui peuvent être élargis aux Technosols dans le cadre du génie pédologique :

1. Les effets de la faune sur la macroporosité et les transferts d'eau semblent significatifs et semblable à ceux décrits en écosystèmes naturels. La théorie du « pouvoir tampon » permet d'expliquer la faible intensité avec laquelle la faune contribue aux processus qui font intervenir de la matière organique (agrégation, décomposition). Du fait de la forte proportion de matière organique des matériaux parents et de la dilution spatiale, l'effet de la faune, au moins dans les premiers stades d'évolution, est peu significatif.

2. La théorie des niches permet d'expliquer les réponses et les effets observés de la diversité de la faune du sol dans les Technosols construits. Le pédo-écosystème du Technosol construit représente une niche qui présente une faible diversité de ressources mais un grand réservoir de ressources. La faible diversité des ressources engendre une niche étroite qui ne peut accueillir initialement que peu de groupes fonctionnels. La non limitation des ressources a deux conséquences : elle réduit d'autant plus la niche initiale pour l'accueil de nouveaux groupes fonctionnels ; elle limite les complémentarités fonctionnelles tant au niveau des réponses que des effets.

Ainsi, dans les premiers stades d'évolution du Technosol construit, les contraintes environnementales (ici le procédé de construction de sol) au travers du caractère néoformé que revêt le Technosol priment largement sur les facteurs biologiques, et plus particulièrement sur les effets de la diversité des organismes présents.
Au-delà de notre modèle de Technosol construit, dans le cadre plus large des Technosols, la nature trophique des matériaux technogéniques jouera un rôle déterminant dans l'impact qu'aura la faune sur la pédogenèse. Par ailleurs, l'âge du Technosol qui indique l'état d'avancement des processus physiques et chimiques concomitants à cet agent biologique pourrait engendrer progressivement des conditions de milieu plus propices à l'expression des effets de la faune.

Sous un angle finalisé et en termes de génie pédologique, le choix du procédé de construction de sol doit aussi être réfléchi pour favoriser l'action de la faune. En cas de choix de matériaux technogéniques fortement organiques, une inoculation de faune est envisageable pour initier des mécanismes d'évolution des Technosols et les accélérer. Le choix des espèces à inoculer doit être pensé selon les fonctionnalités attendus mais également en prenant en compte les critères environnementaux (invasions biologiques, accumulation de polluants dans la chaîne trophique, sol support de biodiversité), économiques (coût de l'inoculation à grande échelle) et sociales.

Perspectives

Les perspectives peuvent s'envisager à travers trois grands axes : la poursuite de l'étude des mécanismes fins qui régissent la contribution de la faune dans le Technosol (« théorie du pouvoir tampon ») à travers le modèle d'ingénieur de l'écosystème ; la poursuite de l'étude des rôles des filtres environnementaux et biotiques dans la réponse et l'effet de la diversité de la faune du sol (« théorie de la non-limitation des ressources ») et enfin la poursuite de la démarche de modélisation.

Pour la première théorie (« pouvoir tampon »), les perspectives concernent chacun des deux processus (agrégation et décomposition de la matière organique/transfert de carbone) pour lesquels l'effet du ver à l'échelle du pédon n'est pas significatif et est conditionné par les ressources initiales du Technosol. L'hypothèse retenue est qu'un effet existe, mais est dilué à cette échelle spatiale. La confirmation et/ou la compréhension des mécanismes fins qui régissent ces processus sont nécessaires pour confirmer cette hypothèse. Pour l'agrégation, il s'agirait essentiellement de caractériser plus finement les liaisons organo-minérales au sein du Technosol en conditions contrôlées. Les résultats acquis sur la stabilité sont basés sur un test normé (Le bissonais, 1996). Des analyses supplémentaires de l'agrégat de sol témoin, de turricules et de parois de galeries sont nécessaires : *e.g.* humidité, teneur en carbonates, argiles, polysaccharides et matières organiques (Zhang et Schrader, 1993). Il sera envisagé de faire varier les facteurs d'influence connus de l'agrégation, *e.g.* absence/présence de microorganismes, durée de vieillissement (Marinissen *et al.*, 1996) et les modalités de construction de sol. L'objectif final est de savoir à quelle(s) condition(s) le ver peut s'avérer un agent significatif d'amélioration de l'agrégation. Il faut également comprendre quels sont les mécanismes qui entraînent la diminution de carbone après le passage du ver. Des mesures de NIRS (Near Infrared Spectroscopy) sur des turricules, des galeries, sur des agrégats non bioturbés et sur les prélèvements de sol de l'expérience « diversité » permettraient de caractériser les signatures de la matière organique (Fouad *et al.*, 2010; Jouquet *et al.*, 2010). De plus, des mesures d'activité enzymatique sur ces mêmes matrices permettraient d'évaluer l'importance de l'activité

des microorganismes dans cette perte de carbone. Ces deux approches, confrontées aux observations ultrastructurales déjà acquises, devraient nous renseigner sur la nature de cette disparition. Des prélèvements de turricules, de galeries, d'agrégats témoins dans les lysimètres ou *in situ* pourront être réalisés afin de les comparer à celles effectuées en laboratoire. Enfin, il faut poursuivre les analyses des percolats, des bougies poreuses afin de caractériser l'effet de *L. terrestris* sur la décomposition. A plus long terme des analyses de métaux (Si, Al, Mn, Fe) indicateurs de l'altération chimique du sol pourront être envisagé.

Pour la deuxième théorie, une des premières perspectives est de poursuivre les échantillonnages *in situ* mais en les couplant à l'acquisition des propriétés physico-chimiques du sol. Cette mise en commun de jeu de données pourra compléter nos acquis sur la réponse des communautés à leur environnement et aussi de mesurer l'effet des communautés sur le sol. Par ailleurs, les études *in situ* et en laboratoire n'ont pris en compte que le rôle des filtres d'habitat au travers du procédé de construction du Technosol et celui des interactions biotiques au travers des interactions fonctionnelles. Toutefois, deux filtres sont également à considérer : la dispersion et les pratiques culturales. Afin d'expliciter la contrainte de dispersion, il est nécessaire de caractériser l'ESP (Ecological Species Pool) qui dans le cas du Technosol consisterait à lister les espèces présentes à proximité du site ainsi que dans les matériaux parents. Dans le cadre de la restauration des sols anthropisés, les pratiques culturales pourraient être un puissant levier afin d'orienter l'action de la faune vers une fonctionnalité donnée. Il serait ainsi envisageable de réaliser plusieurs itinéraires culturaux connus de la littérature sur les grandes parcelles afin d'estimer l'influence de ce filtre. Un itinéraire cultural, comme un labour superficiel, qui favoriserait l'enfouissement du compost en profondeur pourrait par exemple aboutir à une diversification fonctionnelle de la faune pionnière inféodée au compost. En laboratoire, il serait souhaitable d'envisager une expérimentation qui fasse varier à la fois le facteur « diversité fonctionnelle de la faune » et le facteur « procédé de construction de sol » afin de valider le fait que l'augmentation de ressources agit uniquement sur les niches fondamentales mais pas sur les niches réalisées (prouvé uniquement en modalité monospécifique). L'ensemble de ce travail nous aiderait à mieux décomposer l'influence des différents types de filtres et ainsi à orienter l'action du génie pédologique. Par ailleurs, une attention particulière est à

porter aux nouvelles approches qui travaillent sur les traits de réponse et d'effets des espèces (Vandewalle *et al.*, 2010) afin de les utiliser dans les Technosols. Ils ont pour vocation de constituer des indicateurs de réponses de l'écosystème facilement mesurables et généralisables.

Pour la modélisation enfin, la suite logique de notre travail consisterait à (Annexe XI) : continuer la procédure de formalisation des équations mathématiques, procéder à la vérification du modèle, qui consiste à répondre aux deux questions suivantes: réagit-il comme ce qui était escompté ? Est-il stable à long-terme ? (Jørgensen et Bendoricchio, 2001) ; procéder à l'analyse de sensibilité du modèle, qui permet de cerner les variables d'état et les paramètres qui ont une influence majeure sur les résultats de la modélisation (Jørgensen et Bendoricchio, 2001), procéder à la calibration, qui passe par une calibration manuelle et ensuite automatique des paramètres d'influence mis en avant lors de l'analyse de sensibilité. A ce stade, un retour au schéma conceptuel est possible afin de mieux reformuler la définition du problème scientifique posé. Enfin, l'étape de validation est l'ultime étape, qui confronte des données réelles avec des données de sorties de la modélisation.

Annexes

Annexe I Analyses des microorganismes

- Extraction d'ADN

Les échantillons frais de sol ont été conservé à -80°C. Une fois décongelés, les échantillons ont subi une procédure d'extraction de l'ADN (FastDNA SPIN kit for Soil, mpbio) suivant le protocole suivant. Cinq cent mg de sol frais par échantillon sont placés dans des tubes de lyses. Neuf cent soixante dix-huit microL de tampon de phosphate de sodium et 122 microL de tampon MT sont ajoutés. Les tubes sont agités par un agitateur mécanique pendant 1 minute afin d'homogénéiser la solution. Les tubes sont centrifugés pendant 5-10 minutes à 14000 tours/minutes. Le surnageant est transféré dans des tubes propres dans lesquelles on ajoute 250 microL de PPS (Protein Precipitation Solution). Les tubes sont alors agités à la main 10 fois et centrifugés 5 minutes à 14000 tours/minutes. Le surnageant est transféré dans des tubes de 15 mL. Une fois la solution remise en suspension, 1,0 mL de matrice de fixation est ajouté. Les tubes sont alors laissés au repos pendant 3 minutes. Cinq cent microL du surnageant sont alors évacués. La matrice de fixation est remise en suspension avec le surnageant restant et 600 microL sont alors transférés dans un SPIN filter. Après avoir centrifugé le SPIN filter pendant 1 minute à 14000 tours/minutes, le tube de récupération est vidé. La précédente étape est répétée une nouvelle fois. Cinq cent microL de SEWS-M est ajouté et est remis en suspension avec le culot à l'aide de la micropipette puis centrifugé pendant 1 minute à 14000 tours/minutes. Le tube de récupération est ensuite vidé. Une nouvelle centrifugation est effectuée pendant 2 minutes à 14000 tours/minutes. Le tube de récupération est une nouvelle fois vidé puis laissé à sécher pendant 5 minutes à température ambiante. La matrice de fixation est à nouveau remise en suspension et 50-100 microL de DES (DNase, Pyrogen-Free Water) est ajouté. Une dernière centrifugation est nécessaire pendant 1 minute à 14000 tours/minutes. L'ADN est alors extrait et près pour subir une PCR (Polymerase Chain Reaction).

- Estimation de la diversité des ADN

Des amplifications préalables par PCR (Polymerase Chain Reaction) ont été effectuées pour amplifier respectivement l'ADN16S bactérien et l'ADN18S fongique. Les

amplifications ont eu lieu dans un iCyler iQ (Bio-Rad). Après électrophorèse, le gel est incubé pendant 15 minutes dans du dH20 contenant 0,5 mg.L^{-1} de bromure d'ethidium puis rincé, avec du dH20. Les produits de la PCR ont été visualisés et photographiés sous trans-éclairage U.V. (GelDoc) pour contrôler leur taille et leur qualité. Pour éviter les problèmes d'absence d'inhibiteurs lors de la PCR, les échantillons ont été dilués 10 fois dans un tampon Tris-HCl (10 mM, pH 8.0).

Une fois amplifié, l'ADN a subi une TTGE (Temporal Temperature Gradient gel Electrophoresis) qui sépare les brins d'ADN de même taille amplifiés par PCR, dans un gel d'acrylamide partiellement dénaturant. Ces fragments doubles brins se séparent sous l'effet de la température par rupture des liaisons reliant les paires de bases entre elles. Lorsque le double brin est ouvert, il ralentit ou stoppe sa migration, permettant ainsi de distinguer les fragments constitués de séquences nucléotidiques différentes. Chaque échantillon analysé par TGGE est caractérisé par un profil de bandes, c'est-à-dire par le nombre et la localisation dans le gel des bandes qu'il génère au cours de l'analyse. La comparaison des profils de bandes permet de comparer rapidement la structure des communautés microbiennes présentes dans les différents échantillons. Après l'électrophorèse, le gel est incubé pendant 15 minutes dans du dH20 contenant 1 X SYBR Gold (Invitrogen) puis rincé, avec du dH20 et les produits de la TTGE ont été visualisés et photographiés sous trans-éclairage U.V. (GelDoc). L'analyse TTGE a été faite avec un Dcode Universal Mutation Detection System (Bio-Rad). Le profil de bandes a été analysé à l'aide du logiciel DNA Melting Profil analysis Software (version 2.0, Biorad).

Les PCR bactériennes ont été réalisées dans un volume réactionnel de 50 microL contenant 5 microL de 1× PCR buffer (Invitrogen), additionné de 3 microL de $MgCl_2$ (25mM), 1 microL de dNTP (10mM), 0,5 microL de l'amorce 1401r (10mM), 0,5 microL de l'amorce GC968f (10mM), 0,5 U de Taq ADN polymérase recombinante, 3 microL de sérum d'albumine bovine (BSA) à 3%, de 1,5 microL de dimethyl sulfoxide (DMSO) et 1 microL de l'échantillon d'ADN d'intérêt.

Les conditions de la PCR ont été les suivantes : une dénaturation initiale à 94°C pendant 5 minutes, suivi de 30 secondes à 94°C, suivi de 16 cycles à 62°C pendant 45 secondes puis à 72°C pendant 45 secondes, les températures diminuant d'un demi-degré tous les cycles, suivi de 30 secondes à 64°C, pour arriver à 20 cycles à 55°C pendant 45 secondes puis à 72°C pendant 45 secondes. Pour la TTGE bactérienne, 10 microlitres d'ADN

amplifié a été doublement dilué dans un tampon de charge puis appliqué directement sur un gel polyacrylamide/bisacrylamide (37,5 :1 ; 30%) (Sigma) à 6% (poids/volume), contenant 6 M d'urée avec 1,25X de tampon TAE (50 mM Tris base, 25 mM acide acétique, glacial, 1,25 mM EDTA, pH 8.0), 0,1% (poids/volume) de TEMED et 0,1% (poids/volume) de persulfate d'ammonium. L'électrophorèse a été effectuée avec un voltage constant de 130V, et un gradient de température de 57 à 67 °C avec un accroissement de 2°C.h^{-1}.

Les PCR fongiques ont été réalisées dans un volume réactionnel de 50 microL contenant 5 microL de 1× PCR buffer (Invitrogen), additionné de 3 microL de $MgCl_2$ (25mM), 1 microL de dNTP (10mM), 0,5 microL de l'amorce 1401r (10mM), 0,5 microL de l'amorce GC968f (10mM), 0,5 U de Taq ADN polymérase recombinante, 3 microL de sérum d'albumine bovine (BSA) à 3%, de 1,5 microL de dimethyl sulfoxide (DMSO) et 1 microL de l'échantillon d'ADN d'intérêt.

Les conditions de la PCR ont été les suivantes : une dénaturation initiale à 95°C pendant 5 minutes, suivi de 30 secondes à 95°C, suivi de 40 cycles à 50°C pendant 30 secondes puis à 72°C pendant 30 secondes, les températures diminuant d'un demi-degré tous les cycles, et suivi de 10 minutes à 72°C. Pour la TTGE fongique, 10 microlitres d'ADN amplifié a été doublement dilué dans un tampon de charge puis appliqué directement sur un gel polyacrylamide/bisacrylamide (37,5 :1 ; 30%)(Sigma) à 6% (poids/volume), contenant 5,5 M d'urée avec 1,25X de tampon TAE (50 mM Tris base, 25 mM acide acétique, glacial, 1,25 mM EDTA, pH 8.0), 0,1% (poids/volume) de TEMED et 0,1% (poids/volume) de persulfate d'ammonium. L'électrophorèse a été effectuée avec un voltage constant de 130V, et un gradient de température de 51,5 à 60,5 °C avec un accroissement de 1,5°C.h^{-1}.

- Estimation de la quantité totale d'ADN

Les concentrations d'ADN des extrait ont été déduites par lecture spectométrique à 260 et 280 nm à l'aide d'un spectromètre (Shimadzu UV 1800 W) muni d'une Tray Cell (Hellma). Les valeurs ont été ramenées au poids de sol pesé, (corrigé par l'humidité) lors de l'extraction d'ADN pour obtenir une concentration d'ADN dans le sol en microg/g de sol sec.

- Estimation spécifique de la quantité d'ADN

Pour estimer la quantité d'ADN bactérien et fongique, les extraits ont été soumis à une PCR en temps réel. Cette technique, basée sur l'utilisation d'un marqueur fluorescent, permet par l'obtention de la cinétique complète de la réaction de polymérisation d'obtenir une quantification absolue de la quantité initiale d'ADN. Les standards pour la PCR en temps réel permettant une calibration quantitative ont été crées en produisant des séries de dilution. A la fin de la PCR, la ligne de seuil a été manuellement définie grâce à la phase d'accroissement logarithmique des données de fluorescence. Les valeurs de Ct (nombre de cycles où les données de fluorescence dépassent la ligne de seuil) ont été déterminées pour tous les échantillons et ainsi le nombre initial de copies présents dans les échantillons a été déduit de la courbe standard.

Les PCR bactériennes en temps réel ont été réalisées dans un volume réactionnel 20 microL contenant 10 microL de 1×iQ SYBR Green Supermix (Bio-Rad), 10 microL de 968F (10mM), 10 microL de 1401R (10mM), 0,4 microL de sérum d'albumine bovine (BSA) à 3%, de 0,2 microL de dimethyl sulfoxide (DMSO) (densité=1,1), 0,1 microL de bactériophage T4G32 gene 32 Product (QBiogene) (500mg/mL) et 1 microL de l'échantillon d'ADN d'intérêt ou d'eau distillé (témoin négatif). Les standards pour la PCR en temps réel permettant une calibration quantitative ont été crées en produisant des séries de dilution allant de 10^2 à 10^8 copies d'ADN par microL^{-1}.

Les PCR fongiques en temps réel ont été réalisées dans un volume réactionnel 20 microL contenant 10 microL de 1×iQ SYBR Green Supermix (Bio-Rad), 10 microL de Fung5F (10mM), 10 microL de FF390R (10mM), 0,4 microL de sérum d'albumine bovine (BSA) à 3%, de 0,2 microL de dimethyl sulfoxide (DMSO) (densité=1,1), 0,1 microL de bactériophage T4G32 gene 32 Product (QBiogene) (500mg/mL) et 1 microL de l'échantillon d'ADN d'intérêt ou d'eau distillé (témoin négatif). Les standards pour la PCR en temps réel permettant une calibration quantitative ont été crées en produisant des séries de dilution allant de 10^2 à 10^7 copies d'ADN par microL^{-1}.

Annexe II Analyses chimiques

- Matériaux parents

• pHeau (NF ISO 10390) : une suspension de sol a été préparée dans cinq fois son volume d'eau. Le pH a été mesuré à l'aide d'un pH mètre préalablement étalonné.

• Calcaire total ($CaCO_3$) (NF ISO 10693) : de l'acide chlorhydrique a été ajouté à un échantillon de sol pour décomposer tous les carbonates présents, permettant ainsi la formation de CO_2. Le volume de gaz dégagé a été ensuite mesuré à l'aide d'un appareil Scheibler. La teneur en carbonates est ensuite déterminée par soustraction entre le dégagement de gaz avant et après ajout d'acide.

• Calcaire actif ($CaCO_3$ actif) (NF X 31-106) : une solution de terre a été placée en contact avec de l'oxalate d'ammonium, qui a permis la précipitation des ions calcium « non actifs ». Après ajout de soude, l'oxalate d'ammonium n'ayant pas réagi a été dosé avec une solution de permanganate de potassium.

• Carbone total : le carbone dans le sol présent dans le sol a été oxydé en dioxyde de carbone par chauffage à une température d'au moins 900°C. La quantité de CO_2 dégagée a ensuite été mesurée par chromatographie.

• Matière organique et carbone organique (NF ISO 10694) : le carbonate a été éliminé et le C_{org} présent dans le sol a été oxydé en dioxyde de carbone par chauffage à une température d'au moins 900°C. La quantité de CO_2 dégagée a ensuite été mesurée par chromatographie.

• Le rapport C/N est obtenu en effectuant le rapport de la teneur en carbone organique et la teneur en azote total.

• Azote (N) total (NF 13878) : la teneur en azote (organique et minéral) de l'échantillon a été déterminée en le chauffant à 1000°C en présence d'oxygène. Les produits de combustion ou décomposition ont été réduits à l'état d'azote moléculaire (N2). Les quantités de N_2 formées ont quantifiées après séparation chromatographique.

- N minéral (NO3-, NH4+) (INRA) : Après déplacement des ions NH_4^+ par le chlorure de potassium et réduction des nitrates en ammoniac, les ions ont été dosés par distillation par entraînement à la vapeur.

- Phosphore assimilable (méthode Olsen, NF ISO 11263) : une solution d'hydrogénocarbonate de sodium a permis de faire précipiter les ions calcium, aluminium et fer (III), solubilisant ainsi des ions phosphates. La teneur en phosphore a alors été mesurée par spectrométrie à 825 nm.

- Cations échangeables, calcium (Ca), magnésium (Mg), potassium (K), sodium (Na) (acétate d'ammonium) : les cations du sol ont été extraits par une solution d'acétate d'ammonium à pH 7 et ont ensuite été dosés par spectrométrie d'émission atomique.

- Capacité d'échange cationique (CEC) (NF X 31-130) : une solution d'acétate d'ammonium a été mise en contact avec la solution de sol. Cette solution a permis la percolation des ions ammonium en solution, qui ont alors remplacé les cations initialement présents sur la CEC. L'excès d'ammonium a été éliminé, puis les ions ammonium fixés ont été extraits par agitation, mélangés à de la soude et dosés à l'acide sulfurique.

- Matériaux expérimentaux

- Teneur en carbone total (Expériences « comportement » & « diversité ») : quelques grammes de sol préalablement séchés à 105°C pendant 24h ont été finement broyés à l'aide d'un mortier. De 7 à 10 mg de CDV et de 20 à 22 mg de TIT/SPP ont alors été pesés dans des capsules en étain. Le C_{tot} a été alors mesuré par un analyseur élémentaire vario MICRO cube Elementar.

- Teneur en carbone organique (Expériences « comportement » & « diversité ») : quelques grammes de sol préalablement séchés à 105°C pendant 24h ont été finement broyés. De 7 à 10 mg de sol ont alors été pesés dans des capsules en argent. Les sols ont été décarbonatés à l'aide d'acide chlorhydrique (0,62 mol/L) (Nieuwenhuize *et al.*, 1994). Pour que la décarbonatation soit la plus totale possible, un planning d'alternance d'application d'acide et de phases de séchage à l'étuve a été établi (Tableau ci-après), du fait de la forte teneur en $CaCO_3$ du TIT/SPP. Le carbone organique a été alors mesuré par un analyseur CN Flash EA1112 Thermo.

Alternance des pulvérisations d'acide chlorhydrique et des phases de séchage en étuve lors de la décarbonatation du Technosol.

Volume d'acide (microL)	60 - 80	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	40	60	60	80	100	100	130
Phase de séchage minimum	3h	1h	1h	1h	1h	1h	1h	1h	1h	1h	1h	1h	1h	1h	1h	1h	1h45	5h30	une nuit
Température (°C)	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	40	40

Annexe III Analyses physiques

- Matériaux parents

• Granulométrie sans décarbonatation (NF X 31-107) : la quantification des différentes fractions granulométriques (de 0 à 2 mm de diamètre) des matériaux a été réalisée, après destruction de la matière organique par réaction avec H_2O_2, par séparation gravitaire.

• Humidité massique à la capacité au champ (MO-LSE-004) : la mesure consiste à saturer en eau les échantillons de matériaux frais et tamisés à 2 mm puis à les soumettre à une pression déterminée dans une chambre fermée d'où l'eau peut être évacuée par une membrane poreuse. Les humidités caractéristiques ont été mesurées à pF 2 (capacité au champ, 0,10 bars).

- Matériaux expérimentaux

• Disparition de la litière : l'ensemble de la litière de surface a été récupéré au temps final. Elle a été placée à 45°C pendant 48h puis pesée au dixième de grammes près (Expérience « diversité »).

• Macroporosité : le volume de la macroporosité a été évaluée par la tomographie à rayons X (Capowiez *et al.*, 1998) (Expérience « comportement »). Une fois passé en tomographie, une série d'images 2D de 0,625 mm est obtenue avec une résolution horizontale de 0,4 mm par pixel approximativement. Les réglages de l'appareil correspondent à 80 mA et 120kV. La macroporosité peut alors être reconstituée en 3D d'après les images grâce à un algorithme décrit en détails (Capowiez *et al.*, 2003). Le volume de la macroporosité (mm^3) est alors estimé. On peut également différencier quantitativement le volume de la macroporosité dans la couche de CDV de celle de la couche de TIT/SPP.

• Déplacement de matière : du fait de la forte différence de densité des deux matériaux, la différence de tons de gris sur les images était clairement visible (sans chevauchement des niveaux de gris). Il a alors été possible de distinguer les différences de niveaux de gris des deux matériaux sur les images afin de déterminer le volume de

chaque matériau (mm^3) qui a été déplacé par le ver le long de la paroi des galeries (Expérience « comportement »).

- Mesure de la stabilité structurale : la stabilité structurale du sol a été évaluée (Expérience « diversité »). Quelques dizaines de grammes de sols intacts ont été prélevés. L'échantillon a été ensuite été séché à l'air libre pendant plusieurs jours. Un jour avant l'analyse, l'échantillon est délicatement déposé dans un cristallisoir pour être séché à 40°C pendant 12h. La stabilité structurale a ensuite été évaluée par une méthode adaptée de Le bissonais (Le bissonais, 1996). L'ensemble du prélèvement a été immergé dans un bécher contenant 300 mL d'eau déionisée pendant 1 heure. L'eau a été ensuite évacuée au moyen d'une pipette. Dès que l'eau est évacuée, la désagrégation provoquée par l'eau est stoppée par un ajout d'éthanol recouvrant entièrement les agrégats. Les agrégats ont ensuite été transférés dans un cristallisoir à l'aide d'une pissette d'éthanol. Ils sont mis à séché à 105°C pendant 24h. L'ensemble de l'échantillon est alors tamisé à l'aide de cinq tamis (diamètre 15cm ; maille : 2mm, 1 mm, 500 microm et 200 microm). L'ensemble des tamis a été secoué de façon homogène pendant 10 secondes. Chaque fraction est ensuite pesée et rapportée à la masse initiale de l'échantillon. On exprime donc les résultats soit par un histogramme représentant le pourcentage pondéral de chaque fraction, soit par le diamètre moyen pondéral (MWD) :

$$MWD = \Sigma\ Wi\ MDi$$

Wi masse pondérale de la fraction i

MDi diamètre moyen de la fraction i

- Mesure de la stabilité structurale des galeries de *L. terrestris* a été évaluée (Expérience « diversité ») : quelques grammes de sol contenant des galeries ainsi que du sol de la modalité témoin ont été prélevés en conservant la structure intacte. Les échantillons ont ensuite été séchés à l'air libre pendant plusieurs jours. Une fois secs, les galeries ont été extraites délicatement du sol avec des outils métalliques fins (pince, spatule, pointe) et le sol témoin a été légèrement désagrégé. Les morceaux de galeries et le sol témoin ont alors été passés au tamis de 2mm pour ne conserver que quelques grammes d'agrégats supérieur à 2mm. Un jour avant l'analyse, l'échantillon est délicatement déposé dans un cristallisoir pour être séché à 40°C pendant 12h. La stabilité structurale a ensuite été évaluée par une méthode en tout point similaire à la

précédente à ceci près que la période d'immersion n'a duré que 10 secondes au lieu d'une heure.

- Estimation de la production de turricules : la production totale de turricules (Expérience « comportement ») a été estimée grâce à une série de quatre tamis (diamètre 15cm ; maille : 5,6 ; 4 ; 3,15 ; 2,5 mm). L'ensemble du sol a été tamisé, en partant du principe que l'activité des vers change la granulométrie des agrégats, conduisant à une augmentation de la quantité de sol retenu dans les tamis de plus grandes mailles (turricules) et à une diminution dans les tamis de plus petites mailles (consommation de sol). Tout le sol du cosme y compris celui qui adhère à la paroi a été délicatement retiré, en évitant de casser les agrégats. L'ensemble des tamis a été secoué de façon homogène pendant 10 secondes. Chaque fraction est ensuite pesée. L'effet du ver a été déterminé par le changement de distribution de taille des agrégats par rapport au tamisage du sol témoin sans ver (Capowiez *et al.*, 2009). Dans notre expérience, seule la fraction supérieure à 5,6 mm a montré des résultats positifs, la production de turricules a été estimée seulement avec ce tamis.

- Estimation de la production de turricules de surface : l'ensemble des turricules de surface (Expérience « comportement ») a été récupéré délicatement. Ils ont été ensuite passés à l'étuve à 50°C pendant 48 heures puis pesés.

- Humidité massique : pour l'humidité massique du CDV (Expérience « diversité ») et du TIT/SPP (horizons A et B, expérience « diversité »), quelques dizaines de grammes homogénéisés ont été prélevés et pesés (P1). Ils ont été mis à l'étuve à 105°C pendant 24 heures puis pesé à nouveau (P1). L'humidité massique (Hm) est alors définie :

$$Hm\ (\%) = (P1/P2) * 100$$

- Observations d'échantillons ultrastructuraux : des fragments (quelques mm^3) des échantillons d'intérêts et du « bulk soil » correspondant (pour l'expérience « comportement » CDV et TIT/SPP, pris quelques centimètres à côté de l'échantillon et pour l'expérience « diversité », interface organo-minéral) ont été fixé par du tétroxide d'osmium, méthode qui préserve la structure (Villemin et Toutain, 1987). Les échantillons fixés dans l'osmium ont été ensuite déshydratés dans une série de bains d'acétone à concentration croissante et ensuite implantés dans une résine epoxy (Epon 812) jusqu'à polymérisation complète. Des fractions granulométriques ont été obtenues

également à partir de quelques fragments d'échantillons et de « bulk soil » plongés dans de l'eau déionisée. Après décantation, le surnageant et le culot ont été séparés et implantés dans la résine de la même manière. Des coupes ultrafines (80–100 nm) ont été réalisées avec un couteau à diamant (Leica Ultracut S ultramicrotome) puis maculés d'acétate d'uranyl et de citrate de plomb. Les coupes ont été observées par un microscope électronique à transmission (80kV).

Annexe IV Indices de diversité

L'abondance et l'identification d'espèces des collemboles nous ont permis de calculer différents indices de diversité:

– La richesse taxonomique (S) : nombre d'espèces présent dans l'échantillon.

– La diversité spécifique ou indice de Shannon-Weaver (H'x) : permet d'observer la diversité du milieu. Par exemple, dans la nature la valeur de H' se situe en général entre 0,5 (très faible diversité) et 4,5 (dans le cas d'échantillon de grande taille de communautés complexes) :

$$H' = - \Sigma ((Ni/N) \times \log 2 (Ni/N))$$

Ni = nombre individu par espèce

N = nombre individu totale

log de base 2

– L'équitabilité (E) : indique la répartition des espèces parmi les échantillons observées. Cette valeur est comprise entre 0 et 1 et plus elle proche de 1 plus la distribution des individus est équitable :

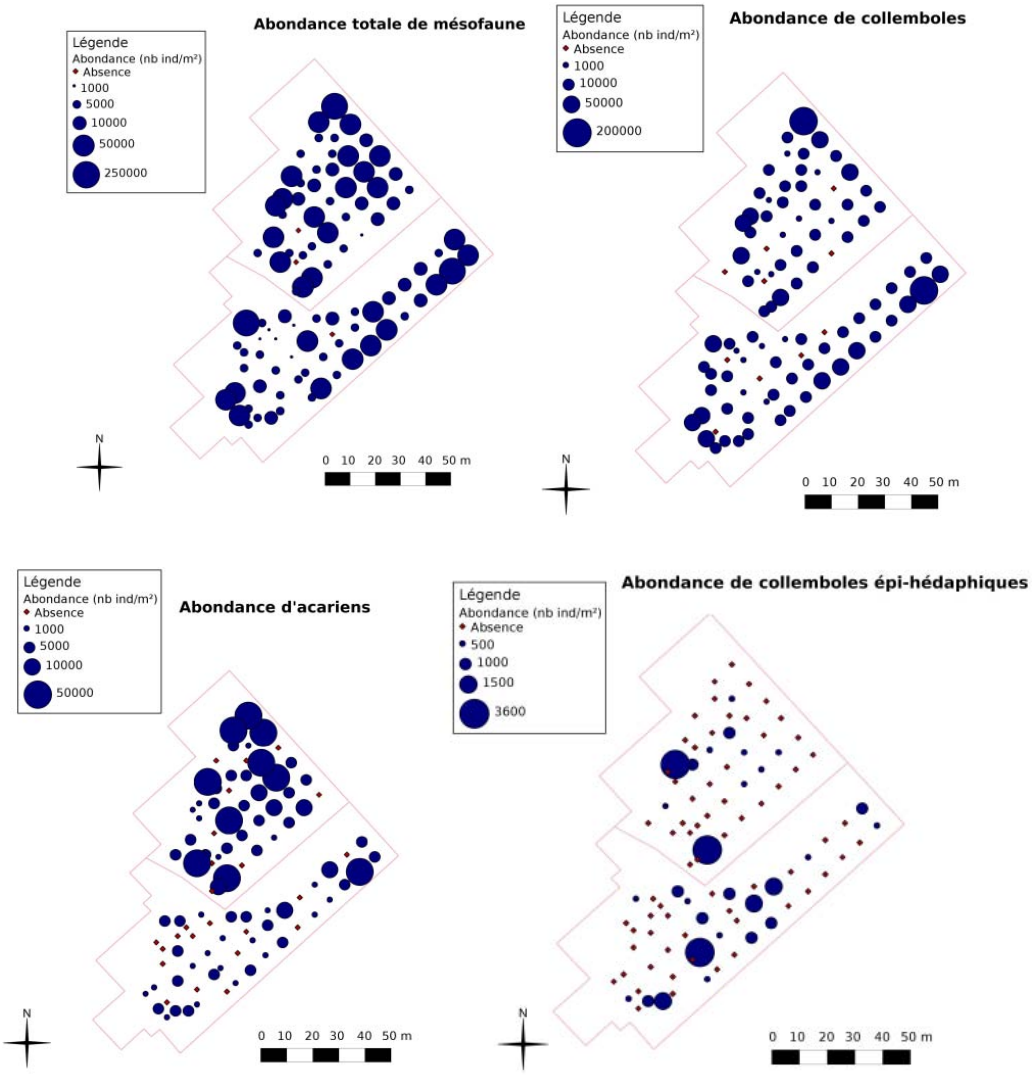
$$E = H' / \log 2 (S)$$

H' = indice de diversité

S = nombre d'espèce

Log de base 2

Annexe V Cartes des abondances des grandes parcelles




Abondance de collemboles hémi-hédaphiques
Légende
Abondance (nb ind/m²)
Absence
1000
5000
10000
50000
250000
N
0 10 20 30 40 50 m
Abondance de collemboles eu-hédaphiques
Légende
Abondance (nb ind/m²)
Absence
500
1500
5000
8000
N
0 10 20 30 40 50 m
Indice de diversité
Légende
Indice de diversité
0 - 0.63
0.63 - 1.26
1.26 - 1.89
1.89 - 2.53
N
0 10 20 30 40 50 m
Equitabilité
Légende
Equitabilité
0 - 0,15
0,15 - 0,74
0,74 - 0,92
0,92 - 1
N
0 10 20 30 40 50 m
Humidité relative
Légende
humidité
0.18 - 0.24
0.24 - 0.27
0.27 - 0.31
0.31 - 0.46
N
0 10 20 30 40 50 m
Hauteur de compost
Légende
Hauteur de compost (cm)
<2
2-6
>6
eau
Sites non réalisés
N
0 10 20 30 40 50 m

Annexe VI Matrices de corrélation de l'ACP « grandes parcelles »

Matrice de corrélation (Spearman) :

Variables	Epaisseur de compost	hemi	epi	eu	H	S	E	Mesofaune	Collemboles	Arthropodes	Acariens	Oribates	Gamasidés	Actinidés	Humidité	Proisotoma minuta	Hypogastura manubrialis	Paratomota notabilis	Mesaphorura	Cryptopygus thermophilus
Epaisseur de compost	**1**	-0.080	0.038	-0.164	0.016	0.011	0.093	0.014	0.005	0.053	-0.051	-0.190	0.007	0.050	0.104	0.073	-0.003	-0.199	-0.069	0.030
hemi	-0.080	**1**	0.214	0.319	**0.438**	**0.577**	0.181	**0.727**	**0.881**	0.651	0.170	0.136	0.177	-0.144	-0.004	**0.468**	**0.556**	**0.397**	0.222	**0.412**
epi	0.038	0.214	**1**	0.199	**0.418**	**0.469**	0.161	0.219	0.271	0.119	0.059	0.166	0.049	-0.063	-0.205	0.119	-0.048	0.265	0.187	0.341
eu	-0.164	0.319	0.199	**1**	**0.522**	**0.585**	0.235	0.345	**0.499**	0.164	-0.004	0.127	-0.024	-0.089	-0.013	0.069	-0.098	**0.412**	**0.811**	**0.414**
H	0.016	**0.438**	**0.418**	**0.522**	**1**	**0.918**	**0.702**	0.343	**0.593**	0.164	-0.090	0.111	-0.115	-0.027	-0.019	0.324	0.098	**0.624**	**0.531**	**0.563**
S	0.011	**0.577**	**0.469**	**0.585**	**0.918**	**1**	**0.495**	**0.561**	**0.742**	0.210	0.070	0.162	-0.003	-0.037	-0.105	**0.374**	0.188	**0.641**	**0.567**	**0.655**
E	0.093	0.181	0.161	0.235	**0.702**	**0.495**	**1**	-0.023	0.254	-0.055	-0.179	0.061	-0.220	0.028	-0.017	0.171	0.040	**0.396**	0.298	0.207
Mésofaune	0.014	**0.727**	0.219	0.245	0.343	**0.561**	-0.023	**1**	**0.812**	0.253	**0.598**	0.298	**0.563**	0.038	-0.120	0.346	**0.403**	0.337	0.270	**0.497**
Collemboles	0.005	**0.881**	0.271	**0.409**	0.593	**0.742**	0.254	**0.812**	**1**	0.129	0.175	0.140	0.174	-0.050	-0.059	**0.460**	**0.474**	**0.463**	**0.455**	**0.549**
Arthropodes	0.053	0.651	0.119	0.084	0.164	0.210	-0.095	0.253	0.129	**1**	0.168	0.317	0.026	0.167	-0.006	-0.042	-0.096	0.232	0.030	0.257
Acariens	-0.051	0.170	0.059	-0.004	-0.090	0.070	-0.179	0.598	0.175	0.168	**1**	**0.521**	**0.895**	0.214	0.173	-0.042	-0.017	0.092	-0.064	0.291
Oribates	-0.190	0.136	0.166	0.127	-0.090	0.162	0.061	0.298	0.140	0.317	**0.521**	**1**	0.231	0.113	-0.260	0.006	-0.077	0.162	-0.031	0.216
Gamasidés	0.007	0.177	0.049	-0.024	-0.115	-0.003	-0.220	**0.563**	0.174	0.026	**0.895**	0.231	**1**	0.028	-0.109	-0.037	-0.025	-0.032	-0.049	0.247
Actinidés	0.050	-0.144	-0.063	-0.089	-0.027	-0.037	0.028	0.038	-0.050	0.167	0.214	0.113	0.028	**1**	0.041	-0.178	-0.131	-0.010	0.016	0.084
Humidité	0.104	-0.004	-0.205	-0.013	-0.019	-0.105	-0.017	-0.120	-0.059	-0.006	-0.173	-0.260	-0.109	0.041	**1**	-0.077	-0.040	-0.075	0.009	0.060
Proisotoma minuta	0.073	**0.468**	0.119	0.069	0.324	**0.374**	0.171	0.346	**0.460**	-0.042	-0.042	0.006	-0.037	-0.178	-0.077	**1**	**0.397**	0.003	0.162	-0.036
Hypogastura manubrialis	-0.003	**0.556**	-0.048	-0.098	0.098	0.188	0.040	**0.403**	**0.474**	-0.096	-0.017	-0.064	-0.025	-0.131	-0.040	**0.397**	**1**	-0.144	-0.077	-0.129
Paratomota notabilis	-0.199	**0.397**	0.265	0.187	**0.624**	**0.641**	**0.396**	0.337	**0.463**	-0.042	-0.017	0.092	-0.032	-0.010	-0.075	0.003	-0.144	**1**	0.339	**0.495**
Mesaphorura	-0.069	0.222	0.187	**0.811**	**0.531**	**0.567**	0.298	0.270	**0.455**	0.030	-0.054	-0.031	-0.049	0.016	0.009	0.162	-0.077	0.339	**1**	**0.407**
Cryptopygus thermophilus	0.030	**0.412**	0.341	**0.414**	**0.563**	**0.655**	0.207	**0.497**	**0.549**	0.257	0.291	0.216	0.247	0.084	0.060	-0.036	-0.129	**0.495**	**0.407**	**1**

Les valeurs en gras sont différentes de 0 à un niveau de signification alpha=0,001

Annexe VII Simulations WEKA sur les données des « grandes parcelles »

- Simulation « Epaisseur de compost »

=== Run information ===

Scheme: weka.classifiers.trees.M5P -M 4.0

Relation: WEKA totale

Instances: 95

Attributes: 29

Lepidocyrtus cyaneus

Proisotoma minuta

Hypogastura manubrialis

Parisotoma notabilis

Isotoma viridis

Mesaphorura

Cryptopygus thermophilus

Folsomia candida

Entomobrya sp

Folsomia penicula

Sminthurinus elegans

Heteromurus major

Lepidocyrtus violaceus

Deuterosminthunus pallipes

Isotoma antennalis

Isotomodes productus

Sphaeridia pumilis

Oribates

Gamasidés

Actinididés

Arthropodes

H

S

E

Humidité

Epi

Hémi

Eu

Epaisseur de compost

Test mode: 10-fold cross-validation

=== Classifier model (full training set) ===

M5 pruned model tree:

(using smoothed linear models)

Humidité <= 0.241 : LM1 (28/26.594%)

Humidité > 0.241 :

| Humidité <= 0.315 : LM2 (46/98.69%)

| Humidité > 0.315 : LM3 (21/41.529%)

LM num: 1

Epaisseur de compost =

0.0008 * Mesaphorura

+ 0.0026 * Isotomodes productus

- 0.9071 * E

- 0.0008 * Eu

+ 3.6817

LM num: 2

Epaisseur de compost =

0.0057 * Lepidocyrtus cyaneus

- 0.0008 * Parisotoma notabilis

+ 0.0004 * Mesaphorura

+ 0.0048 * Isotomodes productus

+ 0.312 * H

- 4.986 * E

- 0.0004 * Eu

+ 8.1778

LM num: 3

Epaisseur de compost =

-0.0002 * Parisotoma notabilis

+ 0.0004 * Mesaphorura

- 0.0004 * Cryptopygus thermophilus

+ 0.0029 * Isotomodes productus

+ 0.5286 * H

- 2.4678 * E

- 0.0004 * Eu

+ 5.1034

Number of Rules : 3

Time taken to build model: 0.09 seconds

=== Cross-validation ===

=== Summary ===

Correlation coefficient	-0.1176
Mean absolute error	3.343
Root mean squared error	5.5463
Relative absolute error	124.47 %
Root relative squared error	132.1051 %
Total Number of Instances	95

- Simulation « Humidité »

=== Run information ===

Scheme: weka.classifiers.trees.M5P -M 4.0

Relation: WEKA totale

Instances: 95

Attributes: 29

Lepidocyrtus cyaneus

Proisotoma minuta

Hypogastura manubrialis

Parisotoma notabilis

Isotoma viridis

Mesaphorura

Cryptopygus thermophilus

Folsomia candida

Entomobrya sp

Folsomia penicula

Sminthurinus elegans

Heteromurus major

Lepidocyrtus violaceus

Deuterosminthunus pallipes

Isotoma antennalis

Isotomodes productus

Sphaeridia pumilis

Oribates

Gamasidés

Actinididés

Arthropodes

H

S

E

Humidité

Epi

Hémi

Eu

Epaisseur de compost

Test mode: 10-fold cross-validation

=== Classifier model (full training set) ===

M5 pruned model tree:

(using smoothed linear models)

LM1 (95/93.916%)

LM num: 1

Humidité =

0 * Isotoma viridis

- 0 * Oribates

+ 0.0455 * H

- 0.0088 * S

- 0.0626 * E

+ 0.2994

Number of Rules : 1

Time taken to build model: 0.05 seconds

=== Cross-validation ===

=== Summary ===

Correlation coefficient	-0.0048
Mean absolute error	0.0474
Root mean squared error	0.0603
Relative absolute error	107.9219 %
Root relative squared error	109.8536 %
Total Number of Instances	95

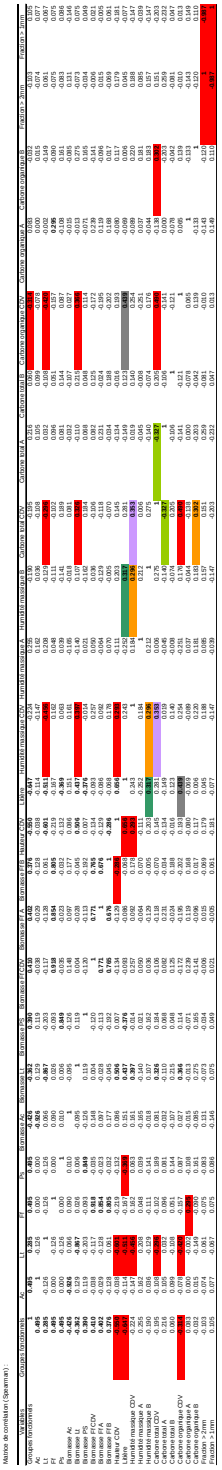
Annexe VIII Matrices de corrélation de l'ACP « parcelles lysimétriques »

Matrice de corrélation (Spearman) :

Variables	rosoma notabilis	Cryptopygus thermo	Ceratophysella gibbosa	Mesaphorura sp.	Cryptopygus bipunctatus	Folsomia quadrioculata	Hypogastura manubrialis	Collemboles	Oribates	Gamasides	Actinedida	Arthropodes	Acariens	Mésofaune	H'	S	E	Hémi	Epi	Eu
Parisotoma notabilis	**1**	0.389	0.406	-0.350	0.375	0.061	0.013	**0.790**	0.291	**0.553**	0.211	0.432	**0.527**	**0.793**	-0.393	0.384	**-0.635**	**0.819**	0.148	-0.327
Cryptopygus thermophilus	0.389	**1**	0.350	**-0.670**	-0.151	-0.073	0.174	**0.478**	0.268	0.247	-0.050	**0.479**	0.147	**0.464**	-0.050	0.322	-0.285	**0.584**	0.400	**-0.671**
Ceratophysella gibbosa	0.406	0.350	**1**	-0.238	0.215	0.180	0.221	**0.627**	0.384	**0.575**	0.346	0.252	**0.717**	**0.654**	0.045	**0.598**	-0.382	**0.662**	0.341	-0.221
Mesaphorura sp	-0.350	**-0.670**	-0.238	**1**	0.042	0.298	0.136	-0.231	-0.172	-0.216	0.136	-0.236	-0.104	-0.231	0.225	-0.041	0.261	-0.469	-0.155	**0.891**
Cryptopygus bipunctatus	0.375	-0.151	-0.215	0.042	**1**	0.171	-0.059	0.167	0.048	**0.456**	0.268	0.111	**0.488**	0.376	-0.179	-0.132	0.061	-0.349	0.166	0.055
Folsomia quadrioculata	0.061	-0.073	0.180	0.298	0.171	**1**	0.338	0.270	0.108	0.036	0.235	-0.170	0.152	0.247	0.136	0.290	-0.079	0.176	-0.018	0.319
Hypogastura manubrialis	0.013	0.174	0.221	0.136	-0.050	0.338	**1**	0.278	0.177	0.179	0.241	0.082	0.284	0.290	0.265	**0.483**	-0.020	0.264	0.277	0.130
Collemboles	**0.790**	**0.478**	**0.627**	-0.231	0.365	0.270	0.278	**1**	0.416	**0.591**	0.301	0.415	**0.642**	**0.993**	-0.352	**0.602**	**-0.755**	**0.960**	0.388	-0.216
Oribates	0.291	0.268	0.384	-0.172	0.048	0.108	0.177	0.416	**1**	0.431	0.078	0.392	**0.518**	**0.456**	0.007	0.421	-0.240	**0.448**	0.258	-0.153
Gamasides	**0.553**	0.247	**0.575**	-0.216	**0.456**	0.036	0.179	**0.591**	0.431	**1**	0.060	0.419	**0.841**	**0.642**	-0.178	**0.523**	**-0.489**	**0.644**	0.340	-0.193
Actinedida	0.211	-0.050	0.346	0.136	0.268	0.235	0.241	0.301	0.078	0.060	**1**	0.145	**0.488**	0.336	0.097	0.302	-0.097	0.234	0.052	0.115
Arthropodes	0.432	**0.479**	0.252	-0.236	0.111	0.152	0.082	0.415	0.392	0.419	0.145	**1**	0.426	**0.455**	**0.704**	**1**	-0.333	**0.617**	**0.960**	0.402	-0.217
Acariens	**0.527**	0.147	**0.717**	-0.104	**0.488**	0.284	**0.518**	**0.841**	**0.642**	**0.841**	**0.488**	0.426	**1**	**0.704**	-0.008	**0.671**	-0.426	**0.654**	0.383	-0.088
Mésofaune	**0.793**	**0.464**	**0.654**	-0.231	0.376	0.247	0.290	**0.993**	**0.456**	**0.642**	0.336	**0.455**	**0.704**	**1**	-0.333	**0.617**	**-0.742**	**0.960**	0.402	-0.217
H'	-0.393	-0.050	0.045	0.225	-0.132	0.136	0.265	-0.352	0.007	-0.178	0.097	-0.021	-0.008	-0.333	**1**	0.286	**0.739**	-0.331	0.300	0.214
S	0.384	0.322	**0.598**	-0.047	0.361	0.290	**0.483**	**0.602**	0.421	**0.523**	0.302	**0.446**	**0.671**	**0.617**	0.286	**1**	-0.362	**0.633**	**0.591**	-0.039
E	**-0.635**	-0.285	-0.382	0.261	-0.179	-0.079	-0.020	**-0.755**	-0.240	**-0.489**	-0.097	-0.210	-0.426	**-0.742**	**0.739**	-0.362	**1**	**-0.756**	-0.004	0.040
Hémi	**0.819**	**0.584**	**0.662**	-0.469	0.349	0.176	0.264	**0.960**	**0.448**	**0.644**	0.234	**0.478**	**0.654**	**0.960**	-0.331	**0.633**	**-0.756**	**1**	0.416	-0.393
Epi	0.148	0.400	0.341	-0.155	0.044	-0.018	0.277	0.388	0.258	0.340	0.052	0.301	0.383	0.402	0.300	**0.591**	-0.094	0.416	**1**	-0.169
Eu	-0.327	**-0.671**	-0.221	**0.891**	0.055	0.319	0.130	-0.216	-0.153	-0.193	0.115	-0.233	-0.088	-0.217	0.214	-0.039	0.240	-0.393	-0.169	**1**

Les valeurs en gras sont différentes de 0 à un niveau de signification alpha=0,001

Annexe IX Matrices de corrélation de l'ACP des données de l'expérience « diversité »



Annexe X Simulations WEKA sur les données de l'expérience « comportement »

- Volume total

=== Run information ===

Scheme: weka.classifiers.trees.M5P -M 4.0
Relation: volume total weka
Instances: 40
Attributes: 11
Formulation initiale
Biomasse initiale ver
Biomasse ver
Production de turricules de surface
Temps
Volume total
Volume de galeries CDV
Volume de galeries TIT/SPP
Volume de TIT/SPP dans le CDV
Humidité
C/N
Test mode: 10-fold cross-validation

=== Classifier model (full training set) ===

M5 pruned model tree:
(using smoothed linear models)

Volume de galeries CDV <= 57.425 :
| Volume de TIT/SPP dans le CDV <= 204 :
| | Formulation initiale <= 0.125 : LM1 (8/0%)

| | Formulation initiale > 0.125 : LM2 (8/0.683%)

| Volume de TIT/SPP dans le CDV > 204 : LM3 (8/0%)

Volume de galeries CDV > 57.425 :

| Formulation initiale <= 0.625 : LM4 (4/0%)

| Formulation initiale > 0.625 : LM5 (12/1.933%)

LM num: 1

Volume total =

-3.3535 * Formulation initiale

+ 1.522 * Temps

+ 0.2774 * Volume de galeries CDV

+ 0.0686 * Volume de TIT/SPP dans le CDV

+ 37.0497

LM num: 2

Volume total =

-3.3535 * Formulation initiale

+ 1.3448 * Temps

+ 0.2774 * Volume de galeries CDV

+ 0.0686 * Volume de TIT/SPP dans le CDV

+ 42.066

LM num: 3

Volume total =

-24.9152 * Formulation initiale

+ 1.2767 * Temps

+ 0.2774 * Volume de galeries CDV

+ 0.085 * Volume de TIT/SPP dans le CDV

+ 56.9826

LM num: 4

Volume total =

-16.0657 * Formulation initiale

+ 0.5664 * Temps

+ 0.349 * Volume de galeries CDV

+ 0.0268 * Volume de TIT/SPP dans le CDV
+ 93.1913

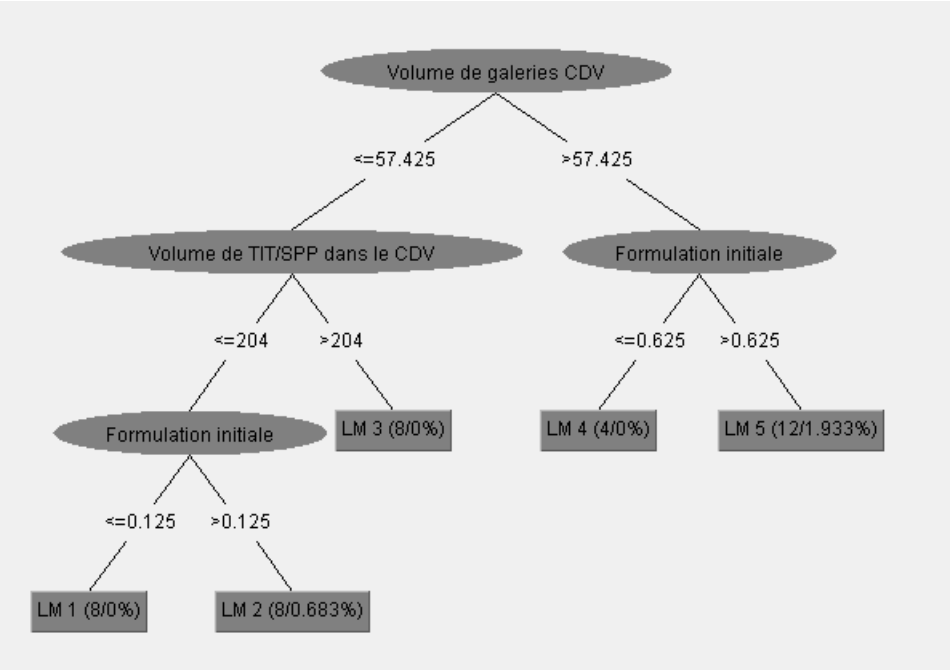
LM num: 5
Volume total =
-32.1735 * Formulation initiale
+ 0.5664 * Temps
+ 0.349 * Volume de galeries CDV
+ 0.0268 * Volume de TIT/SPP dans le CDV
+ 109.9001

Number of Rules : 5

Time taken to build model: 0.02 seconds

=== Cross-validation ===
=== Summary ===

Correlation coefficient	0.97
Mean absolute error	5.6047
Root mean squared error	7.7187
Relative absolute error	18.8488 %
Root relative squared error	24.0857 %
Total Number of Instances	40



Arbre de classification et groupes (WEKA) explicatifs de l'attribut « volume total » de galeries après data mining sur tous les attributs. Volume de galeries en cm³, volume de TIT/SPP dans le CDV en mm³, formulation initiale en % de CDV. TIT/SPP=terre industrielle traitée et sous produit papetier ; CDV=compost de déchet vert.

- Volume galeries CDV

=== Run information ===

Scheme: weka.classifiers.trees.M5P -M 4.0

Relation: volume total weka

Instances: 40

Attributes: 11

Formulation initiale

Biomasse initiale ver

Biomasse ver

Production de turricules de surface

Temps

Volume total

Volume de galeries CDV

Volume de galeries TIT/SPP

Volume de TIT/SPP dans le CDV

Humidité

C/N

Test mode: 10-fold cross-validation

=== Classifier model (full training set) ===

M5 pruned model tree:

(using smoothed linear models)

Volume total <= 132.9 :

| Formulation initiale <= 0.125 : LM1 (8/0%)

| Formulation initiale > 0.125 :

| | Volume de TIT/SPP dans le CDV <= 241.5 :

| | | Production de turricules de surface <= 1.77 : LM2 (4/0%)

| | | Production de turricules de surface > 1.77 : LM3 (8/0%)

| | Volume de TIT/SPP dans le CDV > 241.5 : LM4 (8/3.287%)

Volume total > 132.9 : LM5 (12/1.237%)

LM num: 1

Volume de galeries CDV =

52.0233 * Formulation initiale

- 0.0684 * Production de turricules de surface

+ 0.0076 * Temps

+ 0.2857 * Volume total

+ 0.0009 * Volume de TIT/SPP dans le CDV

- 18.8044

LM num: 2

Volume de galeries CDV =

43.9292 * Formulation initiale

- 0.3482 * Production de turricules de surface

+ 0.0115 * Temps

+ 0.2857 * Volume total

+ 0.012 * Volume de TIT/SPP dans le CDV

- 8.7596

LM num: 3

Volume de galeries CDV =

43.9292 * Formulation initiale

- 0.3273 * Production de turricules de surface

+ 0.0312 * Temps

+ 0.2857 * Volume total

+ 0.012 * Volume de TIT/SPP dans le CDV

- 9.684

LM num: 4

Volume de galeries CDV =

43.9292 * Formulation initiale

- 0.2603 * Production de turricules de surface

- 0.0511 * Temps

+ 0.2857 * Volume total

+ 0.0152 * Volume de TIT/SPP dans le CDV

- 5.3237

LM num: 5

Volume de galeries CDV =

105.1388 * Formulation initiale

- 0.2606 * Temps

+ 0.455 * Volume total

- 0.0332 * Volume de TIT/SPP dans le CDV

- 26.0052

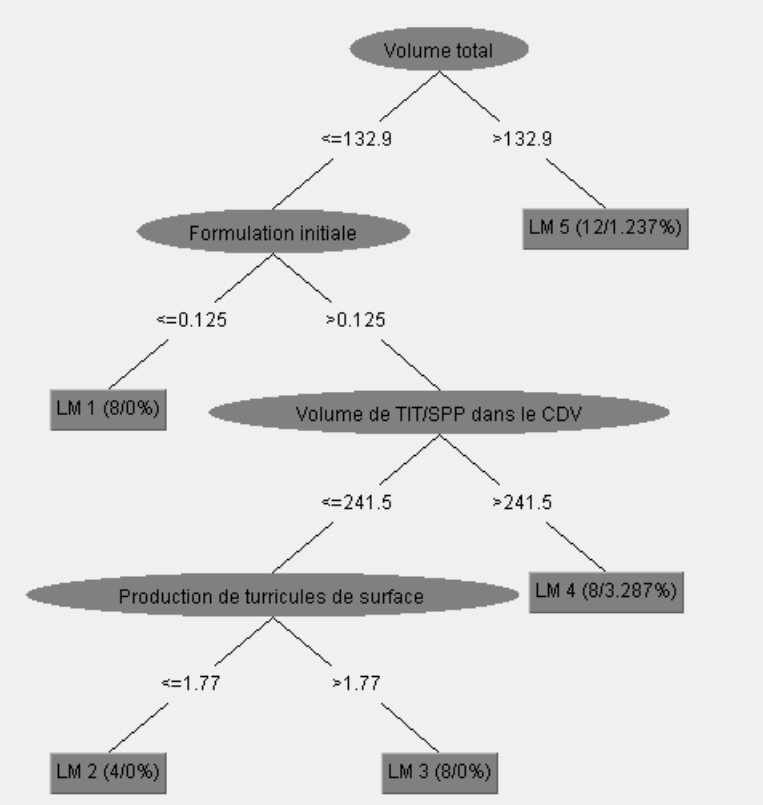
Number of Rules : 5

Time taken to build model: 0.02 seconds

=== Cross-validation ===

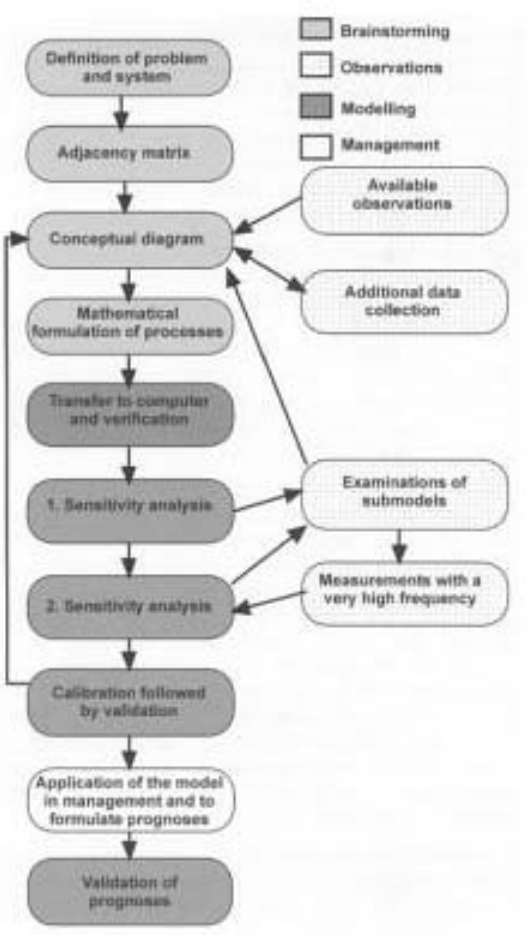
=== Summary ===

Correlation coefficient	0.9941
Mean absolute error	4.3534
Root mean squared error	5.5214
Relative absolute error	10.4044 %
Root relative squared error	11.0345 %
Total Number of Instances	40



Arbre de classification et groupes (WEKA) explicatifs de l'attribut « volume total « de galeries après data mining sur tous les attributs excepté l'attribut « volume de galeries CDV ». Volume total de galeries en cm³, volume de TIT/SPP dans le CDV en mm³, formulation initiale en % de CDV, production de turricules de surface en grammes de turricules secs. TIT/SPP=terre industrielle traitée et sous produit papetier ; CDV=compost de déchet vert.

Annexe XI Description des étapes de modélisation sous STELLA (Jørgensen et Bendoricchio, 2001)



Bibliographie

Addinsoft, S. A. R. L., Ed. (2009). XLSTAT software Paris, France.

Armstrong, M. J. et Bragg, N. C. (1984). "Soil physical parameters and earthworm populations asoociated with opencast coal working and land restoration." Agriculture, Ecosystems & Environment **11**: 131-143.

Arpin, P., Betsch, J. M., Ponge, J. F., Vannier, G., Blandin, P., dajoz, R. et Luce, J. M. (2001). "Les invertébrés dans l'ecosystème forestier: Expression, fonction, gestion de la diversité." Office national des forêts.

Bachelier, G. (1978). La faune des sols, son écologie et son action. Paris.

Baize, D. et Girard, M.-C. (2008). Référentiel Pédologique

Baker, G. H., Brown, G., Butt, K., Curry, J. P. et Scullion, J. (2006). "Introduced earthworms in agricultural and reclaimed land: their ecology and influences on soil properties, plant production and other soil biota." Biological Invasions **8**: 1301-1316.

Bardgett, R. D. et Chan, K. F. (1998). "Experimental evidence that soil fauna enhance nutrient mineralization and plant uptake in montane grassland ecosystems." Soil Biology & Biochemistry **31**: 1007-1014.

Bardgett, R. D., Usher, M. B. et Hopkins, D. W. (2005). Biological Diversity and Function in Soils. Cambridge.

Barois, I., Villemin, G., Lavelle, P. et Toutain, F. (1993). "Transformation of the soil structure through Pontoscolex corethrurus (Oligochaeta) intestinal tract." Geoderma **56**: 57-66.

Barrios, E. (2007). "Soil biota, ecosystem services and land productivity." Ecological Economics **64**(64): 269-295.

Bausenwein, U., Gattinger, A., Langer, U., Embacher, A., Hartmann, H. P., Sommer, M., Munch, J. C. et Schloter, M. (2008). "Exploring soil microbial communities and soil organic matter: Variability and interactions in arable soils under minimum tillage practice." Applied Soil Ecology **40**(1): 67-77.

Bellinger, P. F., Christiansen, K. A. et Janssens, F. (2003). "Checklist of the Collembola of the World."

Belyea, L. R. et Lancaster, J. (1999). "Assembly rules within a contingent ecology." Oikos **86**: 402-416.

Berg, M. P. et Ellers, J. (2010). "Trait plasticity in species interactions: a driving force of community dynamics." Evolutionary Ecology **24**: 617-629.

Berg, M. P., Stoffer, M. et Van den Heuvel, H. H. (2002). Feeding guilds in Collembola based on digestive enzymes 6th INTERNATIONAL SEMINAR ON APTERYGOTA. Siena.

Berry, E. C. et Karlen, D. L. (1993). "Comparison of alternative farming systems. II. Earthworm population density and species diversity." American Journal of Alternative Agriculture **8**: 21-26.

Bohannec, M. (2003). Data mining and decision support: Integration and collaboration. Kluwer.

Boitaud, L., Salmon, S., Bourlette, C. et Ponge, J.-F. (2006). "Avoidance of low doses of naphthalene by Collembola." Environmental Pollution **139**(3): 451-454.

Bonnard, M., Eom, I. C., Morel, J. L. et Vasseur, P. (2009). "Genotoxic and reproductive effects of an industrially contaminated soil on the earthworm Eisenia fetida." Environmental and Molecular Mutagenesis **50**(1): 60-67.
Bouche, M. B. (1972). Lombriciens de France, Ecologie et systématique, Inra Fr.
Bouche, M. B. (1972). Lombriciens de France. Ecologie et Systématique.
Bouché, M. B. et Aliaga, R. (1986). "L'échantillonnage des lombriciens: une urgente nécessité." La Défense des Végétaux **242**: 30-36.
Boyer, S. et Wratten, S. D. (2010). "The potential of earthworms to restore ecosystem services after opencast mining - A review." Basic and Applied Ecology **11**(3): 196-203.
Bradshaw, A. D. (2000). "The use of natural processes in reclamation - advantages and difficulties." Landscape and Urban Planning **51**: 89-100.
Bradshaw, A. D. et Hüttl, R. F. (2001). "Future minesite restoration involves a broader approach." Ecological Engineering **17**(2-3): 87-90.
Bretfled, G. (1999). Synopses on paleoartic collembola. Symphypleona. Görlitz.
Brown, G. G., Barois, I. et Lavelle, P. (2000). "Regulation of soil organic matter dynamics and microbial activity in the drilosphere and the role of interactions with other edaphic functional domains." European Journal of Soil Biology **36**(3): 177-198.
Brussaard, L. (1998). "Soil fauna, guilds, functionnal groups and ecosystem processes." Applied Soil Ecology **9**: 123-135.
Buck, C., Langmaack, M. et Schrader, S. (1999). "Nutrient content of earthworm casts influenced by different mulch types." European Journal of Soil Biology **35**(1): 23-30.
Buck, C., Langmaack, M. et Schrader, S. (2000). "Influence of mulch and soil compaction on earthworm cast properties." Applied Soil Ecology **14**(3): 223-229.
Butt, K., Frederickson, J. et Morris, R. M. (1994). "The life cycle of the earthworm *Lumbricus terrestris* L. (oligochaeta: Lumbricidae) in laboratory culture." European Journal of Soil Biology **30**(2): 49-54.
Butt, K. R. (1993). "Utilisation of solid paper-mill sludge and spent brewery yeast as a feed for soil-dwelling earthworms." Bioresource Technology **44**(2): 105-107.
Butt, K. R. (1999). "Inoculation of earthworms into reclaimed soils." Land Degradation & Development **10**: 565-575.
Butt, K. R., J., F. et Morris, R. M. (1997). "The Earthworm Inoculation Unit technique: An integrated system for cultivation and soil-inoculation of earthworms " Soil Biology & Biochemistry **29**(3-4): 251-257.
Capowiez, Y., Dittbrenner, N., Rault, M., Triebskorn, R., Hedde, M. et Mazzia, C. (2009). "Earthworm cast production as a new behavioural biomarker for toxicity testing." Environmental Pollution **158**(2): 388-393.
Capowiez, Y., Monestiez, P. et Belzunces, L. (2001). "Burrow systems made by Aporrectodea nocturna and Allolobophora chlorotica in artificial cores: morphological differences and effects of interspecific interactions." Applied Soil Ecology **16**: 109-120.
Capowiez, Y., Pierret, A., Daniel, O., Monestiez, P. et Kretzschmar, A. (1998). "3D skeleton reconstructions of natural earthworm burrow systems using CAT scan images of soil cores." Biology and Fertility of Soils **27**: 51-59.
Capowiez, Y., Pierret, A. et Moran, C. (2003). "Characterisation of the three-dimensional structure of earthworm burrow systems using image analysis and mathematical morphology." Biology and Fertility of Soils **38**(5): 301-310.

Capowiez, Y., Rault, M., Costagliola, G. et Mazzia, C. (2005). "Lethal and sublethal effects of imidacloprid on two earthworm species (*Aporrectodea nocturna* and *Allolobophora icterica*)." Biology and Fertility of Soils **41**(3): 135-143.

Caruso, T., Migliorini, M., Bucci, C. et Bargagli, R. (2009). "Spatial patterns and autocorrelation in the response of microarthropods to soil pollutants: The example of oribatid mites in an abandoned mining and smelting area." Environmental Pollution **157**: 2939-2948.

Chamberlain, P. M., McNamara, N. P., Chaplow, J., Stott, A. W. et Black, H. I. (2006). "Translocation of surface litter carbon into soil by Collembola." Soil Biology & Biochemistry **38**: 2655-2664.

Cluzeau, D., Bellido, A., Boulonne, L., Cannavacciuolo, M., Chaussod, R., Cortet, J., Fargette, M., Giteau, J.-L., Guernion, M., Jolivet, C., Lavelle, P., Lemercier, B., Martin, F., Mateille, T., Mercier, V., Péres, G., Plantard, O., Ponge, J. F., Ranjard, L., Rougé, L., Ruiz, N., Tico, S., Velasquez, H., Villenave, C. et Walter, C. (2009). RMQS Biodiv.

Coineau, Y., Cleva, R. et Du Chatenet, G., Eds. (1997). Ces animaux minuscules. . Paris.

Coleman, D. C. et Whitman, W. B. (2005). "Linking species richness, biodiversity and ecosystem function in soil systems." Pedobiologia **49**: 479-497.

Cortet, J., Joffre, R., Elmholt, S. et Henning Krogh, P. (2002). "Increasing species and trophic diversity of mesofauna affects fungal biomass, mesofauna community structure and organic matter decomposition processes." Biol Fert Soils **37**: 302-312.

Cortet, J., Joffre, R., Elmholt, S. et Henning Krogh, P. (2003). "Increasing species and trophic diversity of mesofauna affects fungal biomass, mesofauna community structure and organic matter decomposition processes." Biology and Fertility of Soils **37**: 302-312.

Cortet, J., Vauflery, A. G.-D., Poinsot-Balaguer, N., Gomot, L., Texier, C. et Cluzeau, D. (1999). "The use of invertebrate soil fauna in monitoring pollutant effects." European Journal of Soil Biology **35**(3): 115-134.

Cortez, J. et Bouché, M. B. (1987). Composition chimique du mucus cutané de Allolobophora chaetophora chaetophora (Oligochaeta: Lumbricidae). Comptes Rendus de l'Academie des Sciences Paris, Sér. **III** 207-210.

Costanza, R. et Gottlieb, S. (1998). "Modelling ecological and economic systems with STELLA: Part II." Ecological Modelling **112**(2-3): 81-84.

Cragg, R. G. et Bardgett, R. D. (2001). "How changes in soil faunal diversity and composition within a trophic group influence decomposition processes." Soil Biology & Biochemistry **33**(15): 2073-2081.

Curry, J. P. et Cotton, D. C. F. (1983). Earthworms and land reclamation. Earthworm ecology. Frome Darwin to vermiculture. J. E. Satchell. New Tork, Chapman and Hall.

Curry, J. P. et Schmidt, O. (2007). "The feeding ecology of earthworms - A review." Pedobiologia **50**(6): 463-477.

Daniel, O. et Anderson, J. M. (1992). "Microbial biomass and activity in contrasting soil materials after passage through the gut of the earthworm Lumbricus rubellus Hoffmeister." Soil Biology & Biochemistry **24**: 465-470.

Decaens, T., Margerie, P., Aubert, M., Hedde, M. et Bureau, F. (2008). "Assembly rules within earthworm communities in North-Western France—A regional analysis." Applied Soil Ecology.

Decäns, T., Galvis, J. H. et Amézquita, E. (2001). "Properties of the structures created by ecological engineers at the soil surface of a Colombian savanna." Comptes Rendus de l'Academie des Sciences - Serie III **324**(5): 465-478.
Deharveng, L. (2004). "Recent advances in Collembola systematics." Pedobiologia **48**(5-6): 415-433.
Devliegher, W., Verstraete, W., Laboratory of Microbial Ecology, F. o. A. a. A. B. S., University et of Gent, C. L., B-9000, Gent , Belgium (1996). "The effect of Lumbricus terrestris on soil in relation to plant growth : effects of nutrient-enrichment processes (NEP) and gut-associated processes." Soil Biology & Biochemistry **29**(3/4): 341-346.
Dickinson, N. M. (2000). "Strategies for sustainable woodland on contaminated soils." Chemosphere **41**(1-2): 259-263.
Domínguez, J. (2004). State of the art and new perspectives on vermicomposting research. Earthworm Ecology, second edition. I. C. A. Edwards. Boca Raton, FL CRC Press**:** 401-442.
Dunger, W. et Voigtländer, K. (2005). "Assessment of biological soil quality in wooded reclaimed mine sites." Geoderma **129**(1-2): 32-44.
Dunger, W., Wanner, M., Hauser, H., Hohberg, K., Schulz, H. J., Schwalbe, T., Seifert, B., Vogel, J., Voigtländer, K., Zimdars, B. et Zulka, K. P. (2001). "Development of soil fauna at mine sites during 46 years after afforestation." Pedobiologia **45**(3): 243-271.
Edwards, C. A. (1991). "The assessment of populations of soil-inhabiting invertebrates." Agriculture, Ecosystems & Environment **34**(1-4): 145-176.
Edwards, C. A. (2004). Earthworm Ecology Second Edition. C. Press**:** 456.
Edwards, C. A. et Bohlen, P. J. (1996). Biology and Ecology of Earthworms. London.
Edwards, W. M., Shipitalo, M. J., Owens, L. B. et Norton, L. D. (1990). " Effect of Lumbricus terrestris on hydrology of continuous no-till corn fields." Geoderma **46**: 73-84.
Ehlers, W. (1975). "Observations on earthworms channels and infiltration on tilled and untilled loess soils." Soil Science Society of America Journal **119**: 242-249.
El Khalil, H., Schwartz, C., Elhamiani, O., Kubiniok, J., Morel, J. et Boularbah, A. (2008). "Contribution of technic materials to the mobile fraction of metals in urban soils in Marrakech (Morocco)." Journal of Soils and Sediments **8**(1): 17-22.
Emmerling, C. et Paulsch, D. (2001). "Improvement of earthworm (Lumbricidae) community and activity in mine soils from open-cast coal mining by the application of different organic waste materials." Pedobiologia **45**(5): 396-407.
Ernst, G., Felten, D., Vohland, M. et Emmerling, C. (2009). "Impact of ecologically different earthworm species on soil water characteristics." European Journal of Soil Biology **45**(3): 207-213.
Ester, A. et van Rozen, K. (2002). "Earthworms (Aporrectodea spp.; Lumbricidae) cause soil structure problems in young Dutch polders." European Journal of Soil Biology **38**(2): 181-185.
Fouad, Y., Walter, C., Morvan, T., Zaouchi, Y. et Sanaa, M. (2010). Near infrared spectroscopy as a potential tool to monitor the mineralization of exogenous organic matter within the soil. EGU General Assembly. Vienna, Austria**:** 10163.
Frouz, J., Elhottová, D., Pizl, V., Tajovský, K., Sourková, M., Picek, T. et Malý, S. (2007). "The effect of litter quality and soil faunal composition on organic matter dynamics in post-mining soil: A laboratory study." Applied Soil Ecology **37**(1-2): 72-80.

Frouz, J., Keplin, B., Pizl, V., Tajovský, K., Starý, J., Lukesová, A., Nováková, A., Balík, V., Hánel, L., Materna, J., Düker, C., Chalupský, J., Rusek, J. et Heinkele, T. (2001). "Soil biota and upper soil layer development in two contrasting post-mining chronosequences." Ecological Engineering **17**(2-3): 275-284.

Fründ, H.-C., Butt, K., Capowiez, Y., Eisenhauer, N., Emmerling, C., Ernst, G., Potthoff, M., Schädler, M. et Schrader, S. (2010). "Using earthworms as model organisms in the laboratory: Recommendations for experimental implementations." Pedobiologia **53**(2): 119-125.

Geoffroy, J. J. (1992). "Millipettia n°1."

Geoffroy, J. J. (1993). "Millipettia n°2."

Gillet, S. et Ponge, J.-F. (2003). "Changes in species assemblages and diets of Collembola along a gradient of metal pollution." Applied Soil Ecology **22**: 127-138.

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

Gisin, H. (1960). Collembolen fauna Europas. Genève.

Haarlov, N. (1955). Vertical distribution of mites and collembola in relation to soil structure. Soil Zoology. D. K. M. E. Kevan. London, H.F. & G. Witherby Ltd**:** 167-179.

Haimi, J. (2000). "Decomposer animals and bioremediation of soils." Environmental Pollution **107**: 233-238.

Haimi, J. et Mätäsniemi, L. (2002). "Soil decomposer animal community in heavy-metal contaminated coniferous forest with and without liming." European Journal of Soil Biology **38** 131–136.

Han, J. et Kamber, M. (2006). Data mining: concepts and techniques. Los Altos.

Hanlon, R. D. G. (1981). "Influence of grazing by Collembola on the activity of senescent fungal colonies grown on media of different nutrient concentration." Oikos **36**: 362-367.

Hanlon, R. D. G. et Anderson, J. M. (1979). "The effects of Collembola grazing on microbial activity in decomposing leaf litter." Oecologia **38**: 93-99.

Hanlon, R. D. G. et Anderson, J. M. (1980). "The influence of macroarthropod feeding activities on fungi and bacteria in decomposing oak leaves." Soil Biology & Biochemistry **12** 255-261.

Hassal, L., Turner, J. G. et Rands, M. R. W. (1987). "Effects of terrestrial isopods on the decomposition of woodland leaf litter." Oecologia **72**: 597-604.

Hedde, M. (2006). Etude de la relation entre la diversité des macro-invertébrés et la dynamique de la matière organique des sols limoneux de Haute-Normandie.

Heemsbergen, D. A., Berg, M. P., Loreau, M., van Hal, J. R. et Faber, J. H. V., H.A. (2004). "Biodiversity effects on soil processes explained by interspecific functionnal dissimilarity." Science **306**: 1019-1020.

Hendriksen, N. B. (1990). "Leaf litter selection by detritivore and geophagous earthworms." Biology and Fertility of Soils **10**(1): 17-21.

Hindell, R. P., Mc Kenzie, B. M. et Tisdall, J. M. (1997). "Influence of drying and ageing on the stabilization of earthworms (Lumbricidae) casts." Biology and Fertility of Soils **25**: 27-35.

Hoogerkamp, M., Rogaar, H. et Eijsackers, H. J. P. (1983). Effect of earthworms on grassland on recently reclaimed polder soils in the Netherlands.

Hooper, D. U. (1998). The role of complementarity and competition in ecosystem responses to variation in plant diversity. **79:** 704-719.
Hopkin, S. P. (1991). "A key to the woodlice of Britain and Ireland." FSC, Environmental for all **204**.
Hopkin, S. P. (1997). Biology of the springtails (Insecta: collembola). New York.
Hopkin, S. P. (2007). A Key to the Springtails (Collembola) of Britain and Ireland.
Hopkin, S. P., Hardisty, G. N. et Martin, M. H. (1986). "The woodlouse Porcellio scaber as a [`]biological indicator' of zinc, cadmium, lead and copper pollution." Environmental Pollution Series B, Chemical and Physical **11**(4): 271-290.
Huhta, V. (2007). "The role of soil fauna in ecosystems: A historical review." Pedobiologia **50**(6): 489-495.
Huhta, V., Ikonen, E. et Vilkamaa, P. (1979). "Sucession of invertebrate populations in artificial soil made of sewage sludge and crushed bark." Ann. Zool. Fennici **16**: 223-270.
Huhta, V., Persson, T. et Setala, H. (1998). "Functional implications of soil fauna diversity in boreal forests." Applied Soil Ecology **10**(3): 277-288.
Hutchinson, G. E. (1975). "Concluding remarks." Cold Spring Harb Symp Quant Biol **22**: 415-427.
ISO (2004). 23611-2 Draft: Soil Quality--Sampling of Soil Invertebrates Part 2: Sampling and Extraction of Microarthropods (Collembola and Acarina). Geneva, Switzerland.
ISO (2005). "Sampling and soil extraction of enchytraeids."
Jégou, D., Cluzeau, D., Wolf, H. J., Gandon, Y. et Tréhen, P. (1998). "Assessment of the burrow system of Lumbricus terrestris, Aporrectodea giardi and Aporrectodea caliginosa using X-ray computed tomography." Biology and Fertility of Soils.
Jégou, D., Schrader, S., Diestel, H. et Cluzeau, D. (2001). "Morphological, physical and biochemical characteristics of burrow walls formed by earthworms." Applied Soil Ecology **17**(2): 165-174.
Jongmans, A. G., Pulleman, M. M., Balabane, M., van Oort, F. et Marinissen, J. C. Y. (2003). "Soil structure and characteristics of organic matter in two orchards differing in earthworm activity." Applied Soil Ecology **24**(3): 219-232.
Jørgensen, H. B., Johansson, T., Canback, B., Hedlund, K. et Tunlid, A. (2005). "Selective foraging of fungi by collembolans in soil." Biology Letters **1**: 243-246.
Jørgensen, H. B., Patten, B. C. et Straskraba, M. (2000). "Ecosystem emerging: 4. Growth." Ecological Modelling **126**: 249-284.
Jørgensen, S. E. et Bendoricchio, G. (2001). Fundamentals of ecological modelling.
Josserand, A. et Cleyet-Marel, J. C. (1979). "Isolation from Soils of Nitrobacter and Evidence for Novel Serotypes Using Immunofluorescence." Microbial Ecology **5**: 197-205.
Jouquet, P. (2008). "Above-ground earthworm casts affect water runoff and soil erosion in Northern Vietnam." Catena **74**(1): 13-21.
Jouquet, P., Dauber, J., Lagerlöf, J., Lavelle, P. et Lepage, M. (2006). "Soil invertebrates as ecosystem engineers : Intended and accidental effects on soil and feedback loops." Applied Soil Ecology **32**: 153-164.
Jouquet, P., Henry-des-Tureaux, T., Mathieu, J., Thu, T. D., Duc, T. T. et Orange, D. (2010). "Utilization of near infrared reflectance spectroscopy (NIRS) to quantify the impact of earthworms on soil and carbon erosion in steep slope ecosystem: A study case in Northern Vietnam." Catena **81**(2): 113-116.

Kandeler, E., Winter, B., Kampichler, C. et Bruckner, A. (1994). Effects of mesofaunal exclusion on microbial biomass and enzymatic activities in field mesocosms. Beyond the biomass - Compositional and functional analysis of soil microbial communities. D. J. Ritz K., Giller K.E. Chichester, Wiley & Sons**:** 181-189.

Kapanen, A. et Itävaara, M. (2001). "Ecotoxicity Tests for Compost Applications." Ecotoxicology and Environmental Safety **49**(1): 1-16.

Kautz, G. et Topp, W. (1998). "Nachhaltige waldbauliche Maßnahmen zur Verbesserung der Bodenqualität." Forstwissenschaftliches Centralblatt **117**: 23-43.

Kautz, G., Zimmer, M. et Topp, W. (2002a). "Does Porcellio scaber (Isopoda: Oniscidea) gain from coprophagy?" Soil Biology & Biochemistry **34**(9): 1253-1259.

Kautz, G., Zimmer, M. et Topp, W. (2002b). "Does Porcellio scaber (Isopoda: Oniscidea) gain from coprophagy?" Soil Biology and Biochemistry **34**(9): 1253-1259.

Kelt, D. A., Taper, M. L. et Meserve, P. L. (1995). "Assessing the impact of competition on community assembly: a case study using small mammals." Ecology **76**: 1283-1296.

Kersanté, A. (2003). Rôle régulateur de la macrofaune lombricienne dans la dynamique de l'herbicide atrazine en sol cultivé tempéré., UNIVERSITÉ DE RENNES 1

U.M.R. 6553 ECOBIO.

Kobel-Lamparski, A. et Lamparski, F. (1987). "Burrow constructions during the development of *Lumbricus badensis* individuals." Biology and Fertility of Soils **3**(1): 125-129.

Koehler, H. H. (1997). "Mesostigmata (Gamasina, Uropodina), efficient predators in agroecosystems." Agriculture, Ecosystems & Environment **62**: 105-117.

Krantz, G. W. (1978). A manual of acarology Inc. Corvallis n. é. Oregon State University Book Stores**:** 509.

Kretzschmar, A. (1991). "Burrowing ability of the earthworm *Apporectodea longa* limited by the soil compaction and water potential." Biology and Fertility of Soils **18**: 119-126.

Kretzschmar, A. et Bruchou, C. (1991). "Weight response to the soil water potential of the earthworm *Apporectodea longa*." Biology and Fertility of Soils **112**: 209-212.

Krogh, P. H. (1995). "Effects of pesticides on the reproduction of Hypoaspis aculeifer (Gamasisa Laelapidae) in the laboratory." Acta Zoologica Fennica **196**.

Laganis, J. et Debeljak, M. (2006). "Sensitivity analysis of the emergy flows at the solar salt production process in Slovenia." Ecological Modelling **194**(1-3): 287-295.

Lamparski, F. (1985). Einfluss der Regenwurmart Lumbricus badensis auf Waldböden den im Schwarzwald.

Lapied, E., Nahmani, J. et Rousseau, G. X. (2009). "Influence of texture and amendments on soil properties and earthworm communities." Applied Soil Ecology **43**(2-3): 241-249.

Lavelle, P. (1996). "Diversity of Soil Fauna and Ecosystem Function." Biology International.

Lavelle, P. (1997). "Faunal activities ans soil processes : adaptative strategies that determine ecosystem fonction." Advances in ecological research **27**: 93-132.

Lavelle, P., Decaëns, T., Aubert, M., Barot, S., Blouin, M., Bureau, F., Margerie, P., Mora, P. et J.-P., R. (2006). "Soil invertebrates and ecosystem services." European Journal of Soil Biology **42** S3–S15.

Lavelle, P. et Spain, A. V., Eds. (2001). Soil Ecology.

Lavorel, S. et Garnier, E. (2002). "Predicting changes in community composition and ecosystem functioning from plant traits: revisiting the Holy Grail." Functional Ecology **16**: 545-556.
Lavrač, N., Bohanec, M., Pur, A., Cestnik, B., Debeljak, M. et Kobler, A. (2007). "Data mining and visualization for decision support and modeling of public health-care resources." Journal of Biomedical Informatics **40**(4): 438-447.
Le bissonais, Y. (1996). "Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility: I. Theory and methodology." European Journal of Soil Science **47**: 425-431.
Lee, K. E. (1985). "Earthworms: Their ecology and Relationships with Soils and Land use." Academic Press.
Lee, K. E. et Foster, R. C. (1991). "Soil fauna and soil structure." Australian Journal of Soil Research **29**(6): 745-775.
Lehman, A. (2006). "Technosols and other proposals on urban soils for the WRB (World Reference Base for Soil Resources)." International Agrophysics **20**: 129-134.
Ligthart, T. N. et Peek, G. J. C. W. (1997). "Evolution of earthworm burrow systems after inoculation of lumbricid earthworms in a pasture in the Netherlands." Soil Biology & Biochemistry **29**(3-4): 453-462.
Liiri, M., Setala, H., Haimi, J., Pennanen, T. et Fritze, H. (2002a). Relationship between soil microarthropod species diversity and plant growth does not change when the system is disturbed. **96:** 137-149.
Liiri, M., Setala, H., Haimi, J., Pennanen, T. et Fritze, H. (2002b). "Soil processes are not influenced by the functional complexity of soil decomposer food webs under disturbance." Soil Biology & Biochemistry **34**(7): 1009-1020.
Lock , K., Janssens, F. et Janssen, C. R. (2003). "Effects of metal contamination on the activity and diversity of springtails in an ancient Pb-Zn mining area at Plombières, Belgium." European Journal of Soil Biology **39**: 25-29.
Løkke, H. et Van Gestel, C. A. M. (1997). Handbook of Soil Invertebrate Toxicity Tests. New York.
Loranger-Merciris, G., Laossia, K. R. et Bernhard-Reversata, F. (2008). "Soil aggregation in a laboratory experiment: Interactions between earthworms, woodlice and litter palatability " Pedobiologia: in press.
Lowe, C. N. et Butt, K. R. (2005). "Culture techniques for soil dwelling earthworms : A review." Pedobiologia **49**: 401-413.
Lu, L., Wang, R., Chen, F., Xue, J., Zhang, P. et Lu, J. (2005). "Element mobility during pyrite weathering: Implications for acid and heavy metal pollution at mining-impacted sites." Environmental Geology **49**: 82-89.
Luginbühl, Y. (2002). "Occupation du sol et paysages, Etude rétrospective et prospective des évolutions de la société française (1950-2030)." Futuribles **7**.
Lukkari, T., Taavitsainen, M., Väisänen, A. et Haimi, J. (2004). "Effects of heavy metals on earthworms along contamination gradients in organic rich soils." Ecotoxicology and Environmental Safety **59**: 340-348.
MacArthur, R. et Wilson, E. O., Eds. (1967). The Theory of Island Biogeography, Princeton University Press
Mäder, P., Fließbach, A., Dubois, D., Lucie, G., Padruot, F. et Niggli, H. (2002). "Soil fertility and biodiversity in organic farming." Science **296**: 1694-1697.
Malecki, M. R., Neuhauser, E. F. et Loehr, R. C. (1982). "The effects of metals on the growth and reproduction of *Eisenia fetida*." Pedobiologia **24**: 129-137.

Marashi, A. R. A. et Scullion, J. (2003). "Earthworm casts form stable aggregates in physically degraded soils." Biology and Fertility of Soils **37**(6): 375-380.
Marashi, A. R. A. et Scullion, J. (2004). Porosity and hydrological changes in surface mine soils. ISCO - 13th International Soil Conservation Organisation Conference. Brisbane, Conserving Soil and Water for Society: Sharing Solutions.
Maraun, M., Martens, H., Migge, S., Theenhaus, A. et Scheu, S. (2002). "Adding to the enigma of soil animal diversity : fungal feeders and spaprophageous soil invertebrates prefer similar substrates." European Journal of Soil Biology **39**: 85-95.
Marinissen, J. C. Y. (1994). "Earthworm population and stability of soil structure in a silt loam soil of a recently reclaimed polder in the Netherlands." Agriculture, Ecosystems & Environment **51**: 75-87.
Marinissen, J. C. Y. et Dexter, A. R. (1990). "Mechanisms of stabilization of earthworm casts and artificial casts." Biology and Fertility of Soils **9**(2): 163-167.
Marinissen, J. C. Y. et Hillenaar, S. I. (1997). "Earthworm-induced distribution of organic matter in macro-aggregates from differently managed arable fields." Soil Biology & Biochemistry **29**(3-4): 391-395.
Marinissen, J. C. Y., Nijhuis, E. et van Breemen, N. (1996). "Clay dispersability in moist earthworm casts of different soils." Applied Soil Ecology **4**(1): 83-92.
Marinissen, J. C. Y. et Van den Bosch, F. (1992). "Colonization of new habitats by earthworms." Oecologia **91**: 371-376.
McCoy, E. L., Boast, C. W., Stehouver, R. C. et Kladivko, E. J. (1994). Macropore hydraulics: taking a sledgehammer to classical theory. Soil processes and water quality. R. Lal and A. Stewart. Lewis, Boca Raton, Fla**:** 303-348.
Meijer, J. (1974). "A comparative study of the immigration of carabids (Coleoptera, Carabidae) into a new polder." Oecologia **16**(3): 185-208.
Meijer, J. (1980). "The development of some elements of the arthropod fauna of a new polder." Oecologia **45**(2): 220-235.
Migliorini, M., Pigino, G., Bianchi, N., Bernini, F. et Leonzio, C. (2004). "The effects of heavy metal contamination on the soil arthropod community of a shooting range." Environmental Pollution **129**: 331-340.
Milleret, R., Le Bayon, R. C., Lamy, F., Gobat, J. M. et Boivin, P. (2009). "Impact of roots, mycorrhizas and earthworms on soil physical properties as assessed by shrinkage analysis." Journal of Hydrology **373**(3-4): 499-507.
Monserie, M. F., Watteau, F., Villemin, G., Ouvrard, S. et Morel, J. L. (2009). "Technosol genesis: identification of organo-mineral associations in a young Technosol derived from coking plant waste materials." Journal of Soils and Sediments: 1-10.
Moody, S. A., Briones, M. J. I., Piearce, T. G. et Dighton, J. (1995). "Selective consumption of decomposing wheat straw by earthworms." Soil Biology & Biochemistry **27**(9): 1209-1213.
Morel, J. L. et Heinrich, A. B. (2008). "SUITMA-soils in urban, industrial, traffic, mining and military areas - An interdisciplinary working group of the 'International Union of Soil Science' (IUSS) dedicated to soils strongly modified by human activities." Journal of Soils and Sediments: 1-2.
Naeem, S., Loreau, M. et Inchausti, P., Eds. (2002). Biodiversity and ecosystem functioning the emergence of a synthetic ecological framework

Nahmani, J. (2003). Impact des métaux sur la structure et le rôle fonctionnel des communautés de macroinvertébrés et de microorganismes de sols du Nord-Pas-De-Calais : une approche multiscalaire. Paris, Université Pierre et Marie Curie.
Nahmani, J. et Lavelle, P. (2001). "Effects of heavy metal pollution on soil macrofauna in grassland of Nothern France." European Journal of Soil Biology **38**: 297-300.
Nahmani, J., Lavelle, P., Lapied, E. et Folkert, v. O. (2002). "Effects of heavy metal soil pollution on earthworm communities in the north of France." Pedobiologia **47**: 663-669.
Nieminen, J. K. et Setälä, H. (2001). "Influence of carbon and nutrient additions on a decomposer food chain and the growth of pine seedlings in microcosms." Applied Soil Ecology **17**(3): 189-197.
Nieuwenhuize, J., Maas, Y. E. M. et Middelburg, J. J. (1994). "Rapid analysis of organic carbon and nitrogen in particulate materials." Marine Chemistry **45**(3): 217-224.
OECD, Ed. (1984). Earthworm, acute toxicity tests. Paris.
Petersen, H. (1975). "Estimation of dry weight, fresh weight, and calorific content of various collembolan species." Pedobiologia **15**: 222–243.
Petersen, H. (1982). "Structure and size of soil animal populations." Oikos **39**: 306-357.
Petersen, H. (1994). "A review of collembolan ecology in ecosystem context." Acta Zoologica Fennica **195**: 111-118.
Petersen, H. et Luxton, M. (1982). "A comparative analysis of soil fauna populations and their role in decomposition processes." Oikos **39**(3): 287-388.
Piearce, G. T. et George, C. B. (1998). "Responses of invertebrates to paper sludge application to soil." Applied Soil Ecology **9**: 393-397.
Piearce, T. G., Budd, T., Hayhoe, J. M., Sleep, D. et Clasper, P. J. (2003). Earthworms of a land restoration site treated with paper mill sludge. The 7th international symposium on earthworm ecology Cardiff, Wales, Pedobiologia. **47:** 792-795.
Pieper, S. et Weigmann, G. (2008). "Interactions between isopods and collembolans modulate the mobilization and transport of nutrients from urban soils." Applied Soil Ecology **39**: 109-126.
Postma-Blaauwa, M. B., Bloem, J., Faber, J. H., van Groenigen, J. W., de Goede, R. G. M. et Brussaard, L. (2006). "Earthworm species composition affects the soil bacterial community and net nitrogen mineralization." Applied Soil Ecology **29**: 1–15.
Potapow, M. (2001). Synopses on Paleoarctic collembola. Isotomidae. Görlitz.
Pulleman, M. M., Six, J., Uyl, A., Marinissen, J. C. Y. et Jongmans, A. G. (2005). "Earthworms and management affect organic matter incorporation and microaggregate formation in agricultural soils." Applied Soil Ecology **29**(1): 1-15.
Rossiter, D. G. (2007). "Calssification of urban and insutrial soils in the world reference base for soils ressources." Journal of Soils and Sediments.
Rusek, J. (1998). "Biodiversity of Collembola and their functional role in the ecosystem." Biodiversity and Conservation **7**(9): 1207-1219.
Salmon, S. et Ponge, J. F. (2001). "Earthworm excreta attract soil springtails : laboratory experiments on Heteromurus Nitidus (Collembola : Entomobryidae)." Soil Biology & Biochemistry **33**: 1959-1969.
Santruckova, H., Heinemeyer, O. et Kaiser, E. A. (1993). "The influence of soil compaction on microbial biomass and organic carbon turnover in micro- and macroaggregates." Geoderma **56**: 587-598.
Scheu, S. (1991). "Mucus excretion and carbon turnover of endogeic earthworms." Biology and Fertility of Soils **12**: 217-220.

Scheu, S. (2003). "Effects of earthworms on plant growth: Patterns and perspectives." Pedobiologia **47**(5-6): 846-856.
Scholle, G., Wolters, U. et Jörgensen, R. G. (1992). "Effects of mesofauna exclusion on the microbial biomass in two moder profiles." Biology and Fertility of Soils **12**: 253-260.
Scholtus, N., Leclerc, E., De Donato, P., Morel, J. L. et Simonnot, M. O. (2009). "Eluto-frontal chromatography to simulate chemical weathering of COx by low-molecular-weight organic compounds and early pedogenesis processes." European Journal of Soil Science **60**: 71-83.
Schönholzer, F., Kohli, L., Hahn, D., Daniel, O., Goez, C. et Zeyer, J. (1998). "Effects of decomposition of leaves on bacterial biomass and on palatability to *Lumbricus terrestris*." Soil Biology & Biochemistry **30**(13): 1805-1813.
Schrader, S. (1994). " Influence of earthworms on the pH conditions of their environment by cutaneous mucus secretion." Zoologischer Anzeiger **233**: 211-219.
Schrader, S., Joschko, M., Kula, H. et Larink, O. (1995). Earthworm effects on soil structure with emphasis on soil stability and soil water movement. Soil structure - its development and function. K. H. Hartge, Stewart, B.A., Lewis, Boca Raton**:** 109-133.
Schrader, S., Rogasik, H., Onasch, I. et Jégou, D. (2007). "Assessment of soil structural differentiation around earthworm burrows by means of X-ray computed tomography and scanning electron microscopy." Geoderma **137**(3-4): 378-387.
Schrader, S. et Zhang, H. (1996). "Earthworm casting : stabilization or destabilization of soil structure?" Soil Biology & Biochemistry **29**: 469-475.
Schulze, E. D. et Mooney, H. A. (1994). Biodiversity and Ecosystem Function. Berlin.
Schwenke, G. D. (2000). "Soil stripping and replacement for the rehabilitation of bauxite-mined land at Weipa. II. Soil organic matter dynamics in mine soil chronosequences." Australian Journal of Soil Research **38**(2): 371-393.
Scullion, J. (1992). "Re-establishing life in restored topsoils." Land Degradation & Development **3**(3): 161-168.
Scullion, J. et Malik, A. (2000). "Earthworm activity affecting organic matter, aggregation and microbial activity in soils restored after opencast mining for coal " Soil Biology & Biochemistry **32**(1): 119-126.
Scullion, J. et Ramshaw, G. A. (1988). "Factors affecting surface casting behaviour in several species of earthworm." Biology and Fertility of Soils **7**(1): 39-45.
SER (2004). The SER International Primer on Ecological Restoration. Society for Ecological Restoration International**:** 13.
Séré, G. (2007). Fonctionnement et évolution pédogénétique de Technosols issus d'un procédé de construction de sol. Institut national polytechnique de Lorraine. Vandoeuvre-lès-Nancy, Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie et des Industries Alimentaires Ecole Doctorale Ressources, Procédés, Produits et Environnement Laboratoire Sols et Environnement INPL(ENSAIA)/INRA UMR 1120.
Séré, G., Schwartz, C., Ouvrard, S., Renat, J. C., Watteau, F., Villemin, G. et Morel, J. L. (2010). "Early pedogenic evolution of constructed Technosols." Journal of Soils and Sediments **10**(7): 1246-1254.
Séré, G., Schwartz, C., Ouvrard, S., Sauvage, C., Renat, J.-C. et Morel, J.-L. (2008). "Soil construction : a step for ecological reclamation of derelict lands." Journal of Soils and Sediments **8**(2): 130-136.

Shipitalo, M. J. et Protz, R. (1988). "Factors influencing the dispersibility of clay in worm casts." Soil Science Society of America Journal **52**: 764-769.
Shipitalo, M. J. et Protz, R. (1989). "Chemistry and micromorphology of aggregation in earthworm casts." Geoderma **45**: 357-374.
Six, J., Bossuyt, H., Degryze, S. et Denef, K. (2004). "A history research on the link between (micro)aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics." Soil & Tillage Research **79**: 7-31.
Smyth, C. R. et Dearden, P. (1998). "Performance standards and monitoring requirements of surface coal mine reclamation success in mountainous jurisdictions of western North America: a review." Journal of Environmental Management **53**(3): 209-229.
Snyder, B., A. et Hendrix, P., F. (2008). "Current and Potential Roles of Soil Macroinvertebrates (Earthworms, Millipedes, and Isopods) in Ecological Restoration." Restoration Ecology.
Snyder, B. A., Boots, B. et Hendrix, P. F. (2009). "Competition between invasive earthworms (Amynthas corticis, Megascolecidae) and native North American millipedes (Pseudopolydesmus erasus, Polydesmidae): Effects on carbon cycling and soil structure." Soil Biology & Biochemistry **41**(7): 1442-1449.
Spurgeon, D. J., Hopkin, S. P. et Jones, D. T. (1994). "Effects of Cadmium, copper, lead and zinc on grothw, reproduction and survival of the earthworms Eisenia fœtida (Savigny) : assessing the environmental impact of point-source metal contamination in terrestrial ecosystems." Environmental Pollution **84**(123-130).
Stein, A., M. Bekker, R., Blom, J. H. C. et Rogaar, H. (1992). "Spatial variability of earthworm populations in a permanent polder grassland." Biology and Fertility of Soils **14**(4): 260-266.
Swift, M. J. et Boddy, L. (1984). Animal-microbial interactions in wood decomposition. Invertebrate-microbial interactions. R. A. D. M. Anderson J.M., Walton D.W.H. Cambridge, Cambridge University Press**:** 89-131.
Swift, M. J., Heal, O. W. et Anderson, J. M. (1979). "Decomposition in Terrestrial Ecosystems." Blackwell Scientific Publications, Oxford.
Swift, M. J., Izac, A.-M. N. et van Noordwijk, M. (2004). "Biodiversity and ecosystem services in agricultural landscapes-are we asking the good questions?" Agriculture, Ecosystems & Environment.
Szlávecz, K. et Pobozsny, M. (1995). "Coprophagy in isopods and diplopods: a case for indirect interaction." Acta Zoologica Fennica **196**: 124-128.
Thibaud, J.-M., Schulz, H.-J. et Da gama assalino, M. M. (2004). Synopses on Palaearctic Collembola. Hypogastruridae. Görlitz.
Tisdall, J. M. et Oades, J. M. (1982). "Organic matter and water-stable aggregates in soil." Journal of Soil Science **62**: 141-163.
Tiunov, A. V. et Scheu, S. (1999). "Microbial respiration, biomass, biovolume and nutrient status in burrow walls of Lumbricus terrestris L. (Lumbricidae)." Soil Biology & Biochemistry **31**: 2039-2048.
Tomati, U., Grappelli, A. et Galli, E. (1988). "The hormone-like effect of earthworm casts on plant growth." Biology and Fertility of Soils **5**(4): 288-294.
Topoliantz, S., Ponge, J.-F. et Viaux, P. (2000). "Earthworm and enchytraeid activity under different arable farming systems, as exemplified by biogenic structures." Plant and Soil **225**(1): 39-51.

Urbanek, J. et Dolezal, F. (1992). "Review of some case studies on the abundance and on the hydraulic efficiency of earthworm channels in Czechoslovak soils, with reference to the subsurface pipe drainage." Soil Biology & Biochemistry **24**: 1563-1571.

Urbanska, K. M., Webb, N. R. et Edwards, P. J. (2004). Restoration Ecology and Sustainable Development. Cambridge.

Vandewalle, M., de Bello, F., Berg, M. P., Bolger, T., DolÃ©dec, S., Dubs, F., Feld, C. K., Harrington, R., Harrison, P. A., Lavorel, S., da Silva, P. M., Moretti, M., NiemelÃ¤, J., Santos, P., Sattler, T., Sousa, J. P., Sykes, M. T., Vanbergen, A. J. et Woodcock, B. A. (2010). "Functional traits as indicators of biodiversity response to land use changes across ecosystems and organisms." Biodiversity and Conservation **19**(10): 2921-2947.

Vetterlein, D. et Hüttl, R. (1999a). "Can applied organic matter fulfil similar functions as soil organic matter? Risk-benefit analysis for organic matter application as a potential strategy for rehabilitation of disturbed ecosystems." Plant and Soil **213**(1): 1-10.

Vetterlein, D. et Hüttl, R. F. (1999b). "Can applied organic matter fulfil similar functions as soil organic matter? Risk-benefit analysis for organic matter application as a potential strategy for rehabilitation of disturbed ecosystems." Plant and Soil **213**: 1-10.

Villemin, G. et Toutain, F. (1987). Méthode de fixation d'échantillons organo-minéraux de sols pour la microscopie électronique à transmission. Working Meeting of Soil Micromorphology. Proc. VII Int., Plaisir, Paris, Association Française pour l'Etude du Sol.

Vitousek, P. M., Mooney, H. A., Lubchenco, J. et Melillo, J. M. (1997). "Human domination of earth's ecosystems." Science **277**: 494-499.

Wali, M. K. (1999). "Ecological succession and the rehabilitation of distrubred terrestrial ecosystems." Plant and Soil **213**: 195-220.

Walker, B. H. (1992). "Biodiversity and ecological redundancy." Conservation Biology **6**: 18-23.

Watteau, F., Villemin, G., Burtin, G. et Jocteur-Monrozier, L. (2006). "Root impact on the stability and types of microaggregates in silty soil under maize." European Journal of Soil Science **57**(2): 247-257.

Whalen, J., Sampedro, L. et Waheed, T. (2004). "Quantifying surface and subsurface cast production by earthworms under controlled laboratory conditions." Biology and Fertility of Soils **39**(4): 287-291.

Wickenbrock, L. et Heisler, C. (1997). "Influence of earthworm activity on the abundance of collembola in soil." Soil Biology & Biochemistry **29**(314): 517-521.

Wilson, M. J. et Maliszewska-Kordybach, B. (2000). Soil Quality, Sustainable Agriculture and Environmental Security in Central and Eastern Europe. Dordrecht, Kluwer Academic Publishers.

Witten, I. H., Frank, E., Trigg, L., Hall, M., Holmes, G. et Cunningham, S. J., Eds. (1999). Weka: Practical Machine Learning Tools and Techniques with Java Implementations. New Zealand., Department of Computer Science, University of Waikato.

Zhang, H. et Schrader, S. (1993). "Earthworm effects on selected physical and chemical properties of soil aggregates." Biology and Fertility of Soils(15): 229-234.

Zimmer, M., Kautz, G. et Topp, W. (2003). "Leaf litter-colonizing microbiota: supplementary food source or indicator of food quality for Porcellio scaber (Isopoda: Oniscidea)?" European Journal of Soil Biology **39**(4): 209-216.
Zimmer, M., Kautz, G. et Topp, W. (2005). "Do woodlice and earthworms interact synergistically in leaf litter decomposition?" Functional Ecology **19**: 7-16.
Zimmer, M. et Topp, W. (1997). "Does leaf litter quality influence population parameters of the common woodlouse, Porcellio scaber (Crustacea: Isopoda)?" Biology and Fertility of Soils **24**(4): 435-441.
Zimmer, M. et Topp, W. (1999). "Relationships between woodlice (Isopoda: Oniscidea) and microbial density and activity in the field." Biology and Fertility of Soils **30**(1): 117-123.
Zimmer, M. et Topp, W. (2002a). "The role of coprophagy in nutrient release from feces of phytophagous insects." Soil Biology & Biochemistry **34**(8): 1093-1099.
Zimmer, M. et Topp, W. (2002b). "The role of coprophagy in nutrient release from feces of phytophagous insects." Soil Biology and Biochemistry **34**(8): 1093-1099.

INSTITUT NATIONAL
POLYTECHNIQUE
DE LORRAINE

AUTORISATION DE SOUTENANCE DE THESE
DU DOCTORAT DE L'INSTITUT NATIONAL
POLYTECHNIQUE DE LORRAINE

o0o

VU LES RAPPORTS ETABLIS PAR :
Monsieur Christian WALTER, Professeur, AGROCAMPUS, Rennes

Monsieur Jean-Michel GOBAT, Professeur, Université de Neuchâtel, Institut de Biologie, Neuchâtel, Suisse

Le Président de l'Institut National Polytechnique de Lorraine, autorise :

Monsieur PEY Benjamin

NANCY BRABOIS
2, AVENUE DE LA
FORET-DE-HAYE
BOITE POSTALE 3
F - 54501
VANDŒUVRE CEDEX

à soutenir devant un jury de l'INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE LORRAINE, une thèse intitulée :

"Contribution de la faune du sol au fonctionnement et à l'évolution des Technosols"

en vue de l'obtention du titre de :

DOCTEUR DE L'INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE LORRAINE

Spécialité : **« Sciences Agronomiques »**

Fait à Vandoeuvre, le 08 décembre 2010
Le Président de l'I.N.P.L.,
F. LAURENT



TEL. 33/03.83.59.59.59
FAX. 33/03.83.59.59.55

Résumé

Les Technosols ont des propriétés et une pédogenèse influencées par des matériaux technogéniques qui les constituent. Le modèle expérimental de Technosol construit a été choisi et résulte de l'utilisation délibérée de matériaux technogéniques au sein d'un profil. L'objectif scientifique est d'évaluer la contribution de la faune du sol aux processus impliqués dans le fonctionnement et l'évolution des Technosols. Des expérimentations en laboratoire (cosmes) et en conditions climatiques réelles (lysimètres, parcelles) ont été menées de l'échelle ultrastructurale à celle du pédon. Les résultats indiquent que (i) le Technosol construit est un support de vie de la faune, (ii) le modèle d'ingénieur de l'écosystème : *Lumbricus terrestris*, par la création de macroporosité et par ses structures biogéniques contribue à sa structuration, son agrégation et à la décomposition de sa matière organique, (iii) lorsque plusieurs groupes d'organismes assurant des fonctions différentes sont associés, des effets sont mesurés majoritairement sur la décomposition de la matière organique. La forte disponibilité des ressources du Technosol autorise la présence de la faune mais masquent en partie ses effets et inhibent les interactions faunistiques qui auront un effet sur les fonctions des sols. Un modèle d'évaluation de l'effet de *Lumbricus terrestris* sur la macroporosité est proposé. En termes de génie pédologique, un projet de modèle d'aide à la décision résulte des acquis scientifiques. L'inoculation de la faune contribuerait ainsi à initier des mécanismes d'évolution des sols et à les accélérer.

Mots-clés : Technosol, faune du sol, pédogénèse, fonctionnement du sol, *Lumbricus terrestris*, diversité fonctionnelle, bioturbation, génie pédologique.

Abstract

Technosols are soils whose properties and pedogenesis are influenced by technical materials which take part in their constitution. The experimental model used here is a constructed Technosol which is deliberately composed of technical materials in a soil profile. The scientific objective is to evaluate the contribution of soil fauna to processes implied in soil functioning and evolution. Experiments in laboratory (cosms) and in climatic conditions (lysimeters, field) are conducted from ultrastructural scale to soil profile scale. Results indicate that (i) constructed Technosol can support soil fauna, (ii) the model of ecosystem engineer: *Lumbricus terrestris*, by macroporosity and by stables biogenic structures, contribute to the structuration, the aggregation and the decomposition of organic matter of the Technosol, (iii) when several groups of organisms implied in differents soil functions are used, effects are observed on organic matter decomposition. The huge availability of resources in the Technosol allow the presence of soil fauna but its effects and reduce soil fauna interactions which can have effects on soil functioning. A model whose objective is to evaluate effect of *Lumbricus terrestris* on macroporosity is proposed. In terms of soil engineering, a project of decision support model results of scientific experiences. Soil fauna inoculation in soil engineering could contribute to initiate and accelerate mechanisms of Technosol evolution.

Keywords: Technosol, soil fauna, pedogenesis, soil functioning, *Lumbricus terrestris*, functional diversity, bioturbation, soil-engineering.