



HAL
open science

Construction de Technosols fonctionnels et fertiles à partir de matériaux, déchets et sous-produits urbains pour un usage en micro-maraîchage bio-intensif

Pénélope Cheval

► To cite this version:

Pénélope Cheval. Construction de Technosols fonctionnels et fertiles à partir de matériaux, déchets et sous-produits urbains pour un usage en micro-maraîchage bio-intensif. *Ecologie, Environnement*. Université de Lille, 2023. Français. NNT : 2023ULILR007 . tel-04245016

HAL Id: tel-04245016

<https://theses.hal.science/tel-04245016>

Submitted on 16 Oct 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

THÈSE DE DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE LILLE

réalisée au sein de
Junia ISA

École doctorale n°104 : Sciences de la Matière, du Rayonnement
et de l'Environnement – **ED SMRE**

Laboratoire de Génie Civil et Géo-Environnement – LGCgE ULR4515

Construction de Technosols fonctionnels et fertiles à partir de matériaux, déchets et sous-produits urbains pour un usage en micro-maraîchage bio-intensif

Thèse soutenue publiquement le **14/03/2023**, par

Pénélope CHEVAL

En vue de l'obtention du grade de
DOCTEUR de L'UNIVERSITE DE LILLE

Discipline : Géosciences, Paléontologie, Écologie, Océanologie

Spécialité : Biologie de l'environnement, des organismes, des populations, écologie

Devant le jury composé de :

SERE Geoffroy, Professeur

Université de Lorraine/INRAE – Laboratoire Sols et Environnement UMR 1120

VIDAL-BEAUDET Laure, Professeur

Institut Agro Rennes-Angers, Agrocampus Ouest, Campus d'Angers

DUMAT Camille, Professeur

Université de Toulouse – Laboratoire DYNAFOR

COLINET Gilles, Professeur

Université de Liège, Gembloux Agro Bio-Tech

PELFRENE Aurélie, Maître de Conférences HDR

Junia ISA – Laboratoire LGCgE

VANDOORNE Bertrand, Docteur

COSUCRA, Groupe Warcoing SA

COUTELLE Loïc, Directeur de projet 2EI

Rapporteur, Président

Rapporteur

Examinatrice

Examineur

Directrice de thèse

Co-encadrant de thèse

Membre invité

À mon Père, ce Capitaine hors pair qui m'a appris à tenir le cap en toutes circonstances

« Va prendre tes leçons dans la nature, c'est là qu'est notre futur »

Léonard de Vinci

REMERCIEMENTS

La thèse est un parcours de plusieurs années, à la fois enrichissant et stimulant au plan intellectuel et scientifique, mais aussi fait de rencontres et de soutiens bien différents, indispensables lors d'étapes parfois délicates à franchir.

Je tiens à exprimer ma sincère gratitude à Loïc Couttelle, Directeur de projet chez Veolia, qui a permis la réalisation de cette thèse dans des conditions harmonieuses. Je le remercie pour la confiance qu'il m'a accordée dans la conception de ce projet ainsi que pour les échanges passionnants sur le micro-maraîchage bio-intensif qui m'ont procuré des pistes de recherche originales.

Je souhaite également témoigner ma profonde reconnaissance à ma Directrice de thèse, Aurélie Pelfrêne, pour ses encouragements, son soutien et son aide au cours de chacune des étapes du travail. Sa détermination et son enthousiasme à s'impliquer dans une thématique nouvelle m'ont été très précieux dans l'aboutissement de cette thèse.

Mes remerciements vont également à mon co-encadrant de thèse, Bertrand Vandoorne ; présent dès l'origine du projet, il a été un soutien indispensable à sa mise en œuvre. Son expertise en physiologie végétale et sa bienveillance m'ont été essentielles.

Je remercie Camille Dumat, Professeur à l'Université de Toulouse et Gilles Colinet, Professeur à l'Université de Liège, qui ont accepté de participer à ce jury, ainsi que Laure Vidal-Beaudet, Professeur à l'Institut Agro Rennes-Angers et Geoffroy Séré, Professeur à l'Université de Lorraine, d'être les rapporteurs de ce manuscrit. Je suis honorée de leur présenter ce travail.

Sophie Boulanger-Joimel, Maître de Conférences à l'AgroParisTech, Philippe Branchu, Ingénieur de Recherche au Cerema, Gilles Colinet, Professeur à l'Université de Liège ont soutenu la progression de cette recherche au cours des comités de suivi de thèse et je les en remercie.

Je tiens à présenter tous mes remerciements à Francis Douay qui m'a apporté ses compétences en sciences du sol et en génie pédologique et m'a guidée dans le montage initial du projet.

Mes remerciements vont aussi à Christophe Fachon, Directeur Général Délégué Junia, pour m'avoir fait confiance et mise en relation avec Loïc Couttelle. Cette rencontre est à l'origine de cette thèse.

Les Fonds Fédératifs Recherche de la Fondation de la Catho de Lille ont constitué un apport indispensable à l'achèvement de ce travail.

Pour l'approfondissement de certaines analyses à l'Université de Lille et leur concours, je remercie Céline Pernin, Franck Bourdelle et Emily Lloret.

Tout le réseau partenaire de Veolia a constitué un socle essentiel à la réalisation de ce travail. Que soient plus particulièrement remerciés Georges Baumann et Patrick Dessauvages (RMN-PFN Eiffage), Benjamin Lonquety et Alexandra Singer (Carrières de Stinkal – Eiffage), Maelenn Poitrenaud (SEDE Environnement), Cécile Azemar, Inès Lazreg et Jean-Luc Martres (REP – Veolia).

Sur le terrain, l'équipe de la ferme urbaine pilote de Veolia, Camille, Elise, Océane et plus spécialement François, ont tout mis en œuvre avec gentillesse pour que l'expérimentation se réalise dans de bonnes conditions.

Durant mes études à l'ISA, et par la suite au cours de ma thèse, de nombreuses personnes ont été d'une grande aide à des moments particuliers ; je pense notamment à David Guillemant, Caroline Choma, Elise Hertault et Jérôme Follet ainsi qu'à mes complices Pascal, François, Julie, Serkan et Mateo.

Plusieurs chercheurs de l'équipe LGCgE Junia, Géraldine Bidar, Brice Louvel, Karin Sahmer, Christophe Waterlot, Sébastien Détriché, Julie Dransart et Christelle Pruvot m'ont offert leur appui scientifique lors d'analyses et de l'interprétation de leurs résultats ; je tiens à les en remercier.

Je remercie également Geoffrey et Mathilde que j'ai eu le plaisir d'encadrer au cours de leurs stages. Votre aide m'a été précieuse et je vous en suis très reconnaissante.

Pour leur appui dans la mise en place du dispositif expérimental, je remercie Arnaud, David et Julien. Pour le suivi des expérimentations, les récoltes et le sauvetage de ma serre pendant la tempête Eunice, je remercie plus particulièrement Julien qui a montré sa capacité à supporter des températures de 53°C et des vents de 120 km/h !

L'expérience n'aurait été la même sans la présence de mes collègues et amis Xuan, Théo, Ashley, Félix, Madeleine, Brice, Aurélien et Julien. Les souvenirs mémorables et anecdotes en votre compagnie mériteraient un mémoire à part entière. Sachez que j'ai été enchantée de vous rencontrer et de tisser de si belles amitiés avec vous tous.

J'adresse également mes remerciements à mes amis Marie-Laure et Didier qui m'ont ouvert les portes de leur exploitation agricole lors de ma formation d'ingénieur à l'ISA et de nouveau lors de l'écriture d'une partie de cette thèse, 10 ans plus tard. J'ai beaucoup appris à vos côtés et vous avez suscité chez moi une vraie sensibilité envers le monde agricole. Je tiens

également à remercier ma meilleure amie, Cécile, pour sa gentillesse, sa présence amicale et nos nombreuses discussions au sujet de mes recherches et de l'environnement au sens large.

Je remercie ma famille, plus particulièrement mes parents Oliviane et Philippe, mon frère et mes sœurs, Léopold, Perrine et Camille ainsi que mes neveux, Oscar, Marceau et Auguste, qui ont été de véritables cobayes pour la mise au point de mes tests d'évitement et de survie. Cette expérimentation m'a montré que vous ne réagissiez pas très bien à un milieu sans le paramètre « Penpen » mais que vous parveniez tout de même à y survivre. D'ailleurs, si l'expérience était à refaire, je pense qu'à la place d'inoculer des vers de terre dans les Technosols de cette thèse, je conseillerais d'y introduire une harde de Cheval. Vous avez montré une force et une détermination incroyable pour améliorer le fruit de ces recherches. J'ai aussi une pensée pour mon chien Tawi, qui aura pris le double de son âge au cours de cette thèse, mais qui m'aura apporté toute la douceur dont j'avais besoin pour l'accomplir sereinement.

Enfin, à Aurélien, qui a soutenu mon enthousiasme, m'a encouragée face à mes questionnements et a tant partagé avec moi, je tiens à exprimer toute ma gratitude et mon affection à travers ces quelques mots.

TABLE DES MATIERES

Introduction générale	1
Chapitre 1 : Les sols anthropisés : enjeux, définition et indicateurs de qualité	5
1.1. Les sols au cœur de nombreux enjeux environnementaux et sociétaux	5
1.1.1. Les services écosystémiques et leurs enjeux	6
1.1.2. La qualité des sols.....	8
1.2. La problématique des sols en ville.....	11
1.2.1. Les enjeux de la connaissance et de la gestion des sols urbains	11
1.2.2. Les sols urbains et leurs particularités pédologiques	13
1.3. L'évaluation de la qualité des sols	28
1.3.1. Les outils d'évaluation de la qualité existants et utilisés	28
1.4. Bilan et objectifs de la thèse	32
Chapitre 2 : Élaboration et caractérisation des Technosols construits étudiés	35
2.1. Identification et caractérisation des besoins en cultures maraîchères	36
2.1.1. Exigences des cultures maraîchères	36
2.1.2. Caractéristiques de sols régionaux réputés pour leur fertilité	39
2.2. Identification des gisements de matériaux d'intérêt	43
2.2.1. Présélection des matériaux parents	43
2.2.2. Inventaire et sélection des matériaux parents	43
2.2.3. Caractérisation des matériaux présélectionnés	47
2.2.4. Sélection des matériaux parents et élaboration des formulations des Technosols	52
2.2.5. Mode et conditions d'élaboration des Technosols construits	56
2.3. Intégration des aspects technico-économiques.....	57
2.4. Description de la démarche expérimentale.....	59
2.4.1. Expérimentation en mésocosmes sous serre	59
2.4.2. Tests de germination, de croissance et de biomasse	91
2.5. Bilan	93
Chapitre 3 : Potentialités agronomiques des Technosols construits	95
3.1. Méthodologie	97
3.1.1. Dispositifs expérimentaux en mésocosmes et microcosmes	97
3.1.2. Échantillonnage et déterminations analytiques appliquées aux différentes matrices étudiées	100
3.1.3. Analyses statistiques	102
3.2. Évolution du potentiel agronomique des modalités des technosols au regard de leurs caractéristiques physiques, chimiques et biologiques	103
3.2.1. Couches organo-minérales	103
3.2.2. Couches minérales	123
3.2.3. Profils des Technosols construits après 1 an.....	125
3.2.4. Potentiel de <i>Lumbricus terrestris</i> dans l'amélioration de la stabilité structurale des Technosols construits au sein des microcosmes	131
3.3. Évaluation du potentiel agronomique des modalités au regard des cultures maraîchères	133
3.3.1. Potentiel agronomique des Technosols pour les cultures maraîchères de printemps	134
3.3.2. Potentiel agronomique des Technosols pour les cultures maraîchères d'hiver	146

3.4. Bilan	164
Chapitre 4 : Évaluation de la fonction d’habitat des Technosols construits et analyse de leurs chaînes trophiques	169
4.1. organismes de la faune du sol sélectionnés pour évaluer la fonction d’habitat	170
4.2. Méthodologie	176
4.2.1. Tests d’évitement	176
4.2.2. Tests de survie	183
4.2.3. Colonisation spontanée des Technosols construits	186
4.2.4. Tests statistiques	190
4.3. Évaluation de la fonction d’habitat des Technosols construits	192
4.3.1. Évaluation de la capacité des organismes d’intérêt à se disperser	192
4.3.2. Évaluation de la survie, du maintien et de la reproduction des organismes d’intérêt étudiés dans les Technosols construits	196
4.3.3. Discussion des paramètres physico-chimiques des Technosols construits ayant influencé la dispersion et la capacité des organismes d’intérêt à assurer leur fitness.....	199
4.4. Évaluation de la qualité des Technosols construits pour un usage en maraîchage au regard de communautés de la faune issues d’une colonisation spontanée	210
4.4.1. Caractérisation de la macrofaune	211
4.4.2. Caractérisation de la mésofaune.....	212
4.5. Bilan	219
Chapitre 5 : Conclusion et Discussion	227
Références bibliographiques	241
Annexe 1 : Besoins nutritifs et pH optimal du sol pour les cultures maraîchères (Duzan, 2010)	271
Annexe 2 : Synthèse des informations relatives au compagnonnage et aux mauvaises associations culturales	273
Annexe 3 : Protocoles analytiques utilisés sur les matrices étudiées	275
Annexe 4 : Valeurs des paramètres physiques, chimiques et biologiques des couches de surface des modalités à t₀, t₁, t₂ et t₃	289
Annexe 5 : Détails des notes des indicateurs « cations échangeables », « productivité (biomasses) », « activités biologiques » et « fonction d’habitat » des sols d’essai	291

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Schéma représentant les liens entre les propriétés, les fonctions et les services écosystémiques des sols (d'après Adhikari & Hartemink, 2016)	8
Figure 2 : Liste des matériaux cités dans la littérature française et utilisés pour formuler les différentes couches de Technosols construits.....	21
Figure 3 : Structure du travail de recherche.....	33
Figure 4 : Logigramme présentant la démarche adoptée pour aboutir à l'élaboration des Technosols	36
Figure 5 : Organisation et composition des couches constitutives des deux Technosols construits. TB, avec bentonite, T, sans bentonite, la part des matériaux organiques parents est exprimée en pourcentage de poids frais.	56
Figure 6 : (A, B) Serre professionnelle cultivée par le groupe Veolia ; (C) Ensemble des douze containers de la serre expérimentale ; (D, E) Système de drainage et de récupération des eaux de percolation des mésocosmes ; (F, G, H) Élaboration des formulations par mélange des matériaux parents ; (I) Système d'irrigation des mésocosmes.	59
Figure 7 : Disposition des mésocosmes dans la serre expérimentale.....	60
Figure 8 : Schéma de la démarche expérimentale relative à la conception des Technosols, mettant en avant les étapes t_0 à t_1	63
Figure 9 : Cinétique d'évolution du taux de couverture des mésocosmes par la phacélie sur 42 jours. TB, Technosol avec bentonite ; T, Technosol sans bentonite	76
Figure 10 : Distribution statistique à t_1 du taux de couverture des phacélies sur le témoin (sol maraîcher cultivé par Veolia), T et TB ($n = 6$; moyennes \pm ET)	77
Figure 11 : Distributions statistiques (A) de la hauteur des parties aériennes de phacélie récoltées sur le témoin, TB et T ($n = 180$) et (B) des biomasses (PS) de phacélie récoltées au sein du témoin, TB et T ($n = 6$)	77
Figure 12 : Teneurs en (A) éléments majeurs et (B) oligo-éléments des plantes de phacélie à t_1 en fonction du sol témoin et des Technosols ($n = 6$; moyennes \pm ET).....	80
Figure 13 : Photographies des tests de germination, de croissance et de biomasse réalisés sur le ray-grass et le cresson dans les trois sols d'essai (T, TB et le témoin)	92
Figure 14 : Démarche expérimentale entre t_0 et t_3 en mésocosmes pour évaluer les potentialités agronomiques des deux Technosols avec ou sans l'inoculation de vers de terre, et en microcosmes pour évaluer l'influence des vers de terre sur l'agrégation	96
Figure 15 : Schéma représentant les différentes modalités expérimentales en mésocosmes	97
Figure 16 : Agencement des mésocosmes dans la serre expérimentale après inoculation des modalités	98

Figure 17 : Schéma du plan cultural en mésocosmes	99
Figure 18 : Paramètres physico-chimiques mesurés dans les couches supérieures des modalités expérimentales aux différents pas de temps (moyenne \pm ET ; n = 3).....	104
Figure 19 : Paramètres biologiques des couches supérieures des modalités aux différents pas de temps. TB, avec bentonite ; TBV, avec bentonite et vers (<i>L. terrestris</i>) ; T, sans bentonite ; TV, sans bentonite et avec vers (<i>L. terrestris</i>) (moyenne \pm ET ; n = 3).....	119
Figure 20 : Photographies des profils des Technosols construits au terme de l'expérimentation <i>ex situ</i> d'une durée d'un an. T, sans bentonite, TV, sans bentonite avec vers (<i>L. terrestris</i>), TB, avec bentonite, TBV, avec bentonite et vers (<i>L. terrestris</i>).....	129
Figure 21 : Photographies des observations réalisées lors de la description des profils des Technosols construits à l'issue de l'expérimentation <i>ex situ</i> (t ₃). (A, B et C) galeries verticales de <i>L. terrestris</i> , (D) présence de MO peu décomposée à la limite entre les horizons A et B, (E) hétérogénéité d'un horizon B dû à la présence distincte de l'agglomération de particules de sablon, (F) structures d'un horizon A, (G) racines observées dans la partie la plus profonde d'un horizon B, (H) structure polyédrique subanguleuse hétérogène, (I) stabilisation d'une structure sous l'effet de la colonisation racinaire	130
Figure 22 : Photographies des biomasses maraîchères de printemps et d'hiver cultivées et récoltées parmi les Technosols construits (A) persil, (B) ensemble des cultures d'hiver, (C) mesclun, (D) céleri-rave, (E) tomates, (F) plant de tomates	134
Figure 23 : Teneurs (PS) en éléments majeurs des cultures de printemps (moyenne \pm ET ; n = 3). T, sans bentonite, TV, sans bentonite avec vers (<i>L. terrestris</i>), TB, avec bentonite, TBV, avec bentonite avec vers (<i>L. terrestris</i>).....	138
Figure 24 : Teneurs (PS) en oligo – éléments des cultures de printemps (moyenne \pm ET ; n = 3). T, sans bentonite, TV, sans bentonite avec vers (<i>L. terrestris</i>), TB, avec bentonite, TBV, avec bentonite avec vers (<i>L. terrestris</i>).....	140
Figure 25 : Analyse en composantes principales des 8 modalités testées (T, TV, TB et TBV à (A) t ₁ et (B) t ₂) sur la base de 16 de leurs paramètres physico-chimiques (pH, CE, CaCO ₃ total et actif, MO, N total, C/N, CEC et P ₂ O ₅ assimilable, K ₂ O, MgO, Na ₂ O, CaO, respirométrie, ergostérols et FDA) et des biomasses des cultures de printemps à l'issue de la première mise en culture des modalités des Technosols construits. (A) À t ₁ , axe 1 = 36 %, axe 2 = 22 % ; à t ₂ , axe 1 = 45 %, axe 2 = 19 %....	143
Figure 26 : Teneurs (PS) en éléments majeurs des cultures d'hiver (moyenne \pm ET ; n = 3). T, sans bentonite, TV, sans bentonite avec vers (<i>L. terrestris</i>), TB, avec bentonite, TBV, avec bentonite avec vers (<i>L. terrestris</i>), Témoin, sol maraîcher témoin.....	149
Figure 27 : Teneurs (PS) en oligo – éléments des cultures d'hiver (moyenne \pm ET ; n = 3). T, sans bentonite, TV, sans bentonite avec vers (<i>L. terrestris</i>), TB, avec bentonite, TBV, avec bentonite avec vers (<i>L. terrestris</i>), Témoin, sol maraîcher témoin.....	153

Figure 28 : Analyse en composantes principales des 9 modalités testées (T, TV, TB et TBV à (A) t1 et (B) t2) et du sol témoin sur la base de 16 de leurs paramètres physico-chimiques (pH, CE, CaCO ₃ total et actif, MO, N total, C/N, CEC et P ₂ O ₅ assimilable, K ₂ O, MgO, Na ₂ O, CaO, respirométrie, ergostérols et FDA) et des biomasses des cultures d'hiver à l'issue de la deuxième mise en culture des modalités des Technosols construits. (A) À t1, axe 1 = 55 %, axe 2 = 18 % ; à t2, axe 1 = 45 %, axe 2 = 19 %.	156
Figure 29 : Les groupes fonctionnels de la faune du sol et leurs rôles	170
Figure 30 : Méthodologie mise en place pour répondre aux questionnements scientifiques concernant l'étude de la fonction d'habitat des Technosols construits	174
Figure 31 : Schéma des protocoles expérimentaux réalisés sur (A) <i>L. terrestris</i> et <i>E. foetida</i> (ingénieurs de l'écosystème), (B) <i>P. scaber</i> (décomposeur macro-fragmenteur) et (C) <i>F. candida</i> (décomposeur micro-fragmenteur)	178
Figure 32 : Photographies des tests d'évitement réalisés sur les vers	179
Figure 33 : Photographies du dispositif expérimental mis en place pour la réalisation des tests d'évitement sur <i>P. scaber</i>	180
Figure 34 : Photographies des différentes étapes respectées pour la réalisation des tests d'évitement sur <i>F. candida</i> . (A) Élevage synchrone pour l'obtention d'organismes de même maturité, (B) mise en place du dispositif expérimental, (C) dénombrement des organismes à l'issue des 48 heures d'essai, (D) aperçu des organismes en surface d'un sol d'essai après sa submersion dans l'eau	182
Figure 35 : Représentation schématique des différentes étapes des tests de survie, de biomasse et de reproduction menés sur <i>E. foetida</i>	184
Figure 36 : Représentation schématique des différentes étapes des tests de survie réalisés sur <i>P. scaber</i>	185
Figure 37 : Photographie de deux microcosmes utilisés pour l'expérimentation en serre	186
Figure 38 : Dispositif mis en place pour le prélèvement de la macrofaune au sein des mésocosmes	187
Figure 39 : Photographie du dispositif permettant l'extraction de la mésofaune	189
Figure 40 : Courbes de survie des cloportes à t ₀ et à t ₃ selon la modalité testée	199
Figure 41 : Analyses en composantes principales des 7 modalités testées (T et TB à t ₀ ; T, TV, TB et TBV à t ₃) et du sol témoin sur la base de 9 de leurs paramètres physico-chimiques (pH, CE, CaCO ₃ total et actif, MO, N total, C/N, CEC et P ₂ O ₅ assimilable) et des réponses des organismes d'intérêt aux tests visant à évaluer la fonction d'habitat des sols d'essai. Axe 1 = 53 %, axe 2 = 22 %	200
Figure 42 : Abondance relative des taxons de la macrofaune observés parmi les 4 modalités (T, TV, TB et TBV) à t ₃	211

Figure 43 : Illustrations des collemboles observés dans les modalités (Hopkin, 2007) et photographies associées (issues des observations au laboratoire).....	214
Figure 44 : Abondance moyenne des espèces de collemboles identifiées dans les modalités (n = 3). T, sans bentonite, TV, sans bentonite avec vers (<i>L. terrestris</i>), TB, avec bentonite, TBV, avec bentonite avec vers (<i>L. terrestris</i>).....	215
Figure 45 : Détails anatomiques des collemboles observés au stéréo-microscope de recherche à épifluorescence (NIKON SMZ18) (A1, A2) furca, (B1, B2) Ocelles	215
Figure 46 : Synthèse des tests visant à évaluer la fonction d'habitat des modalités	221
Figure 47 : Synthèse des comportements d'évitement des organismes d'intérêt face aux modalités d'essai	222
Figure 48 : Synthèse des résultats relatifs aux tests de survie des organismes de la pédofaune étudiés	223
Figure 49 : Ensemble des paramètres physico-chimiques, biologiques et sociétaux sélectionnés pour la création de l'indice de fertilité des modalités	229
Figure 50 : Représentation en radars de la fertilité des Technosols construits selon les modalités T, TV, TB et TBV.	232
Figure 51 : Détails des notes attribuées aux indicateurs "cations échangeables", "productivité (biomasses)", "activités biologiques" et fonction d'habitat des sols d'essai...	292

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Liste des services écosystémiques rendus par les Technosols (Séré, 2018)	29
Tableau 2 : Classement des cultures maraîchères en fonction de leur profondeur d'enracinement (Verhallen & Roddy, 2002)	37
Tableau 3 : Classement des cultures maraîchères en fonction de leurs besoins en éléments nutritifs (d'après Bouvier & Jammes, 2012 ; Duzan, 2010)	39
Tableau 4 : Synthèse des sols locaux retenus pour leurs capacités productives et présentation de leur localisation et des appuis bibliographiques utilisés.....	40
Tableau 5 : Paramètres agronomiques des horizons labourés des sols du Marais audomarois (Servant, 1971), des sols régionaux développés sur lœss (Steckerman <i>et al.</i> , 2002), du sol de la ferme cultivée par Veolia (d'après Bourguignon, 2018) et valeurs optimales de ces paramètres pour un usage en maraîchage	41
Tableau 6 : Avantages et inconvénients des matières minérales identifiées pour élaborer un horizon de croissance	45
Tableau 7 : Avantages et inconvénients des matières organiques identifiées pour élaborer un horizon de croissance	46
Tableau 8 : Normes utilisées pour les déterminations analytiques des propriétés des matériaux présélectionnés.....	48
Tableau 9 : Paramètres physico-chimiques des matériaux minéraux d'intérêt (granulométrie sans décarbonatation).	50
Tableau 10 : Estimation des paramètres physico-chimiques des matériaux organiques d'intérêt.....	51
Tableau 11 : Paramètres physico-chimiques et composition des matériaux organiques d'intérêt.....	51
Tableau 12 : Contribution des matériaux minéraux parents dans la granulométrie estimée de la formulation minérale avec bentonite	54
Tableau 13 : Contribution des matériaux minéraux parents dans la granulométrie estimée de la formulation minérale sans bentonite.....	54
Tableau 14 : Contribution en PS des matériaux organiques parents dans les teneurs estimées en matière organique et éléments nutritifs dans les formulations organo-minérales avec et sans bentonite	56
Tableau 15 : Estimation des coûts d'achat des matériaux parents pour la construction du Technosol avec bentonite (en € HT par hectare).....	57
Tableau 16 : Estimation des coûts d'achat des matériaux parents pour la construction du Technosol sans bentonite (en € HT par hectare)	58

Tableau 17 : Normes détaillant les protocoles pour l'analyse des différents indicateurs renseignant sur la fertilité des Technosols construits	64
Tableau 18 : Répartition des différentes fractions granulométriques des couches organo-minérales de surface des deux Technosols construits à leur mise en place (t_0).....	66
Tableau 19 : Valeurs des paramètres physiques, chimiques et biologiques associés à la fertilité des couches organo-minérales des deux Technosols à leur mise en place (t_0).....	68
Tableau 20 : Valeurs des paramètres physiques, chimiques et biologiques associés à la fertilité des couches minérales des deux Technosols à leur mise en place (t_0).....	75
Tableau 21 : Valeurs des indicateurs d'efficacité de l'activité photosynthétique de la phacélie en fonction de la modalité testée.....	78
Tableau 22 : Valeurs des paramètres physiques, chimiques et biologiques associés à la fertilité du sol témoin et des couches organo-minérales de deux Technosols à leur mise en place (t_0) et 42 jours après l'implantation d'un couvert végétal (t_1)	90
Tableau 23 : Biomasse fraîche des cultures utilisées pour les tests de germination en fonction du Technosol cultivé et du sol témoin.....	92
Tableau 24 : Synthèse des valeurs des paramètres agronomiques de TB et T à t_1 , et premières interprétations et points de vigilance.....	94
Tableau 25 : Classe de stabilité des agrégats de sols en fonction du MWD	102
Tableau 26 : Valeurs des paramètres chimiques associés à la fertilité des couches minérales des modalités à leur mise en place (t_0) et après 1 an (t_3) (moyenne \pm ET ; n = 3)	123
Tableau 27 : Synthèse de l'observation des profils des modalités expérimentales. .	126
Tableau 28 : Diamètre moyen pondéré (MWD) des modalités soumises à deux traitements, par humectation rapide en immersion dans l'eau et par humectation lente par capillarité (moyenne \pm ET, n = 3).....	131
Tableau 29 : Biomasses fraîches (g) des légumes de printemps cultivés sur les 4 modalités expérimentales (moyenne \pm ET ; n = 3).....	134
Tableau 30 : Valeurs des indicateurs d'efficacité photosynthétique et de composition physico-chimique des cultures maraîchères de printemps (moyenne \pm ET ; pour Fv/Fm : n = 15 ; pour les autres indicateurs : n = 60).....	135
Tableau 31 : Teneurs en éléments majeurs (exprimées en g kg ⁻¹ de poids frais PF) des cultures de printemps produites dans T, TV, TB et TBV en comparaison des teneurs mesurés dans les légumes du programme EAT 2 (Anses, 2011)	140
Tableau 32 : Teneurs en oligo-éléments (exprimées en mg kg ⁻¹ de poids frais PF) des cultures de printemps produites dans T, TV, TB et TBV en comparaison des teneurs mesurées dans les légumes analysés dans le cadre du programme EAT 2 (Anses, 2011)	141
Tableau 33 : Biomasses fraîches (g) des légumes d'hiver cultivés sur les 4 modalités expérimentales (moyenne \pm ET ; n = 3).....	146

Tableau 34 : Valeurs des indicateurs d'efficacité photosynthétique et de composition physico-chimique des cultures maraîchères de printemps (moyenne \pm ET ; pour Fv/Fm : n = 15 ; pour les autres indicateurs : n = 60).....	147
Tableau 35 : Teneurs en éléments majeurs (exprimées en g kg ⁻¹ de poids frais PF) des cultures d'hiver produites dans T, TV, TB, TBV et le témoin en comparaison des teneurs dans les légumes analysés dans le cadre du programme EAT 2 (Anses, 2011).....	152
Tableau 36 : Teneurs en oligo-éléments (exprimées en mg kg ⁻¹ de poids frais PF) des cultures d'hiver produites dans T, TV, TB, TBV et le témoin et des légumes analysés dans le cadre du programme EAT 2 (Anses, 2011).....	155
Tableau 37 : Bilan des caractéristiques des modalités avec et sans bentonite et des principaux antagonismes observés sur la culture de légumes	161
Tableau 38 : Validation des hypothèses posées sur les teneurs en N et/ou P des cultures à partir de l'outil Dualex.....	162
Tableau 39 : Évaluation des valeurs moyennes des paramètres chimiques des modalités expérimentales à t ₃ , au regard des objectifs guides et du sol maraîcher témoin.	165
Tableau 40 : Évaluation des valeurs moyennes des paramètres physiques, chimiques et biologiques des modalités expérimentales à t ₃ , au regard des objectifs guides et du sol maraîcher témoin.....	165
Tableau 41 : Indices éco-morphologiques (scores EMI) des groupes de microarthropodes édaphiques (Parisi <i>et al.</i> , 2005).....	188
Tableau 42 : Proportion d'organismes présents dans les sols d'essai à leur confrontation au sol ISO lors des tests d'évitement réalisés à t ₀ et taux d'évitement des sols d'essai associés.....	192
Tableau 43 : Proportion d'organismes présents dans les sols d'essai à leur confrontation au sol ISO lors des tests d'évitement réalisés à t ₃ et taux d'évitement des sols d'essai associés.....	194
Tableau 44 : Paramètres suivis dans l'analyse de la survie, de la biomasse et de la reproduction de <i>Eisenia foetida</i> dans les différentes modalités d'essai à t ₀	196
Tableau 45 : Temps moyen de survie des cloportes dans les Technosols à t ₀ et dans le sol témoin.....	197
Tableau 46 : Taux de mortalité et capacité reproductrice des vers de l'espèce <i>Lumbricus terrestris</i> dans les Technosols construits selon leur disposition en mésocosmes ou microcosmes	197
Tableau 47 : Paramètres suivis dans l'analyse de la survie, de la biomasse et de la reproduction de <i>Eisenia foetida</i> dans les différentes modalités d'essai à t ₃	198
Tableau 48 : Abondance des différents types de nématodes dans les modalités du dispositif expérimental (T, TV, TB et TBV) et dans le sol maraîcher témoin (moyenne \pm ET)	216

Tableau 49 : Valeurs des différents paramètres nématofauniques des modalités du dispositif expérimental (T, TV TB et TBV) et du témoin (moyenne \pm ET)	216
Tableau 50 : Notes attribuées aux valeurs des indicateurs physiques, chimiques et biologiques	231
Tableau 51 : Synthèse de la comparaison des modalités en termes de fertilité	237

PREAMBULE

Ces travaux de thèse ont été effectués au sein du Laboratoire Génie Civil et géo-Environnement (LGCgE) à Junia ISA et ont été menés grâce à une collaboration établie entre l'entreprise Veolia et Junia. L'intégralité de la thèse a été financée par Veolia.

Le groupe Veolia compte près de 220 000 salariés et travaille à la conception et au déploiement d'outils et de solutions pour la gestion de l'eau, des déchets et de l'énergie. Outre son accompagnement dans la gestion de ces éléments, Veolia travaille sur les défis que rencontreront les villes de demain et se projette notamment sur la question de l'alimentation. L'ambition du groupe est d'accompagner les décideurs publics dans la construction de systèmes de production agricole en ville. L'entreprise aspire plus particulièrement à proposer des modèles de production hautement efficaces et qui répondent à un double enjeu de production de grande qualité et de bénéfices sociaux et environnementaux¹. Convaincues des bienfaits et de la pertinence du modèle de micro-maraîchage bio-intensif en milieu urbain, les équipes de Veolia travaillent sur l'élaboration, la mise en place et le déploiement de micro-fermes urbaines. Ces travaux de thèse s'inscrivent dans cette démarche et visent à valoriser les différentes ressources (i.e. matériaux, déchets et sous-produits) de l'entreprise à travers leur réemploi pour la conception de Technosols à vocation maraîchère pour le développement de micro-fermes urbaines sur des surfaces jusqu'alors inappropriées.

Les expérimentations ont été menées au sein du site expérimental de Veolia situé au Marché d'intérêt National de Lomme (59), à proximité de Lille où se situe la ferme urbaine pilote de l'entreprise. Ce site expérimental a été mis en place par Veolia en 2018 en vue de consolider un corpus de connaissances visant à créer divers outils nécessaires au déploiement de modèles de fermes urbaines.

¹ <https://www.planet.veolia.com/fr/loic-couttelle-directeur-de-projet-chez-2ei-filiale-de-veolia>

INTRODUCTION GENERALE

Le sol est une ressource essentielle pour les multiples fonctions et services écosystémiques qu'il assure (Baveye *et al.*, 2016). Pourtant, les sols sont menacés par la croissance démographique mondiale qui se conjugue avec un perpétuel remaniement des territoires. En 2050, la terre devrait compter 9,7 milliards d'habitants, dont 70 % en milieu urbain (Nations Unies, 2022). Pour répondre aux enjeux sociétaux qu'implique cette évolution et permettre l'accueil de nouveaux citoyens en ville, entre 20 000 et 30 000 hectares de terres arables sont artificialisés chaque année en France. La réorganisation continue des sols, et plus particulièrement des sols urbains (définis comme les sols localisés dans les aires urbaines (Blanchart, 2018)) pour répondre aux besoins anthropiques leur confère un caractère polycyclique. Leur artificialisation conduit dans la plupart des cas à la perte d'une partie ou de la totalité de leurs services écosystémiques et à un surplus de déchets et de sous-produits non utilisés (Estrada-Herrera *et al.*, 2017). La perte de ces fonctionnalités a abouti à l'adoption de plusieurs mesures de préservation et de restauration des sols. Ainsi, au cours des 15 dernières années, une nouvelle approche a émergé et s'appuie sur le génie pédologique pour développer des sols susceptibles de fournir différents services écosystémiques : les Technosols (Grard *et al.*, 2015 ; Pruvost *et al.*, 2020 ; Rokia *et al.*, 2014 ; Séré *et al.*, 2008). La plupart des études qui ont été menées à ce jour se sont concentrées sur la création de Technosols pour soutenir la production de biomasses non alimentaires (e.g. aménagement de squares et de parcs, de routes, de supports aux arbres d'alignement ou encore restauration de sites dégradés). Pour s'assurer de l'innocuité de ces sols, certaines études ont également intégré l'évaluation des risques environnementaux (e.g. transfert de composés aux effets négatifs pour l'environnement) et sanitaires (e.g. atteinte à la santé humaine) liés à leur usage (Damas & Coulon, 2016 ; Grard, 2017 ; Séré, 2007 ; Vidal-Beaudet, 2018). Le terme "Technosols" a été introduit dans la deuxième édition du WRB en 2006, comme le proposait Lehmann (2006). Cette classe regroupe les sols qui présentent une quantité significative d'artefacts (plus de 20 % en volume ou en poids moyen dans les 100 premiers centimètres du sol), la présence d'une membrane continue (telle qu'une géomembrane) ou de matériaux techniques durs. Bien que les Technosols construits ne figurent pas aujourd'hui dans la WRB, Séré *et al.* (2010) proposent d'utiliser cette dénomination dans la classification des sols anthropisés, à l'instar du référentiel des sols français (2008), qui sous-catégorise les anthroposols pour y inclure les anthroposols construits. Ainsi, les Technosols construits résultent de la formulation délibérée de différents artefacts. Dans de nombreux cas, cette approche s'associe à une volonté des porteurs de projet de s'inscrire dans une démarche d'économie circulaire et d'intégrer la nécessité de n'utiliser que des matériaux non valorisés (tels que des déchets ou des sous-produits) dans la construction de ces sols (Fabbri *et al.*,

2021). Elle représente par ailleurs une véritable alternative aux prélèvements de terre végétale qui représente la matière la plus couramment employée jusqu'alors par les maîtres d'ouvrage et les parties prenantes des aménagements du territoire. Pour évaluer la qualité et la fertilité des Technosols construits lors de leur mise en place et au cours du temps, la plupart des études s'appuient sur des indicateurs physiques, chimiques et biologiques couramment utilisés en pédologie ou en agronomie. Dans certains cas, les études incluent également le suivi des niveaux de divers contaminants (e.g. la libération de métaux lourds ou de polluants organiques au sein des matériaux utilisés pour créer les Technosols) dans les Technosols construits, en particulier lorsqu'ils résultent de l'association de matériaux parents contaminés ou lorsqu'ils ont été appliqués sur des sols dégradés (Asensio *et al.*, 2013 ; Huot *et al.*, 2013 ; Napoletano *et al.*, 2021).

L'étude des services écosystémiques fournis par les Technosols construits a montré qu'ils représentaient une opportunité pour restaurer des sols dégradés par les activités anthropiques. Ces sols subissent, de plus, des processus pédogénétiques similaires à ceux des sols naturels. Ces processus diffèrent cependant par la rapidité de leur réalisation (Huot *et al.*, 2015 ; Séré *et al.*, 2010). Certaines études ont également montré que, grâce à leur évolution rapide, ces systèmes étaient en mesure de remplir les objectifs pour lesquels ils avaient été élaborés et de fournir les fonctions et services écosystémiques attendus par les acteurs concernés (Grard *et al.*, 2017 ; Séré, 2018). Alors que les recherches sur les Technosols construits et leur évolution ne cessent de croître, peu d'études ont porté sur la conception de ces systèmes pour la production alimentaire. Les projets qui ont abordé cette question se sont généralement concentrés sur la conception de Technosols à partir de sous-produits et de déchets essentiellement organiques, disponibles localement et disposés en lasagnes (Grard *et al.*, 2015 ; Grard *et al.*, 2020). La mise en œuvre de ces Technosols construits sur les toits des bâtiments a, par ailleurs, nécessité l'utilisation de matériaux parents de faible densité. Dans une étude menée pendant cinq années consécutives, Grard *et al.* (2020) ont montré la capacité de Technosols construits placés en toiture à produire des aliments comestibles au moyen de leur stock de nutriments stables et disponibles pour les cultures.

Ce travail de thèse s'inscrit dans la continuité de ces études et a été réalisé avec le soutien et en collaboration avec Veolia qui dispose d'un important gisement de matériaux, de déchets et de sous-produits aujourd'hui peu valorisés. Il vise à concevoir et évaluer des Technosols fonctionnels à partir de ces matériaux pour une utilisation en micro-maraîchage bio-intensif en milieu urbain. L'élaboration de Technosols pour le développement de cette filière horticole représente un enjeu d'intérêt puisqu'elle permet de valoriser des parcelles urbaines de petites surfaces (généralement inférieures à un hectare et pour partie issues du mitage urbain) à travers la production d'une grande diversité de denrées alimentaires en

milieu urbain. Les questions de recherche sont les suivantes : (i) les Technosols élaborés sont-ils capables de produire de la biomasse à vocation alimentaire répondant aux attentes en termes de biomasses produites et de risques sanitaires ? (ii) la fonctionnalité de ces sols artificiels est-elle durable dans la mesure où : (a) ils sont sujets à une pédogénèse précoce susceptible d'engendrer une perte de fertilité au cours du temps, (b) ils pourraient être colonisés par des organismes capables de contribuer aux cycles biochimiques des nutriments. L'originalité de la démarche réside dans la volonté de s'inspirer de l'organisation d'un système de sol naturel reconnu pour ses bonnes potentialités agronomiques et de reproduire ses caractéristiques à l'aide de matériaux technogènes. Plus spécifiquement, la fonctionnalité des Technosols a été évaluée à différentes échelles spatiales (mésocosmes, microcosmes, conditions contrôlées en laboratoire) et temporelles au regard de leur aptitude à (i) assurer la production de cultures maraîchères et (ii) supporter divers organismes de la faune du sol bénéfiques à leur fonctionnement.

Ce mémoire est composé de cinq chapitres :

- Dans le premier chapitre, un état de l'art présente les enjeux de la préservation et de la restauration des sols, de leurs fonctions et de leurs services écosystémiques, la définition de leur qualité pour permettre de définir différentes stratégies de remédiation, la problématique des sols en ville et les enjeux de la connaissance et de la gestion des sols urbains, les particularités pédologiques des sols urbains et plus particulièrement des Technosols construits et les outils d'évaluation de la qualité des sols. S'ensuivent un bilan et la présentation des objectifs de la thèse ;
- Le second chapitre porte sur l'élaboration de deux Technosols construits à des fins maraîchères et sur l'étude des premiers processus pédogénétiques en lien avec la mise en place d'un couvert végétal ;
- Le troisième chapitre est consacré à l'évaluation des potentialités agronomiques des Technosols construits à travers l'analyse temporelle de leurs paramètres physiques, chimiques et biologiques et leur mise en culture maraîchère ;
- Le quatrième chapitre porte sur l'évaluation de la fonction d'habitat des Technosols construits et l'analyse de leurs chaînes trophiques ;
- Enfin, le cinquième et dernier chapitre est consacré à une discussion générale des résultats et à la proposition d'un indicateur de la qualité des Technosols construits pour un usage en maraîchage avant de dresser plusieurs perspectives de recherche.

CHAPITRE 1 : LES SOLS ANTHROPISES : ENJEUX, DEFINITION ET INDICATEURS DE QUALITE

1.1. LES SOLS AU CŒUR DE NOMBREUX ENJEUX ENVIRONNEMENTAUX ET SOCIETAUX

Les problématiques sociétales et environnementales sont mises en exergue dans de nombreux rapports internationaux et font l'objet de débats scientifiques, politiques ou encore économiques. La préservation des ressources figure parmi les objectifs phares les plus fréquemment mentionnés par l'ensemble de ces disciplines. Récemment, la publication du sixième et dernier rapport du groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC 2022) a permis d'alimenter les discussions en témoignant du rôle prépondérant des activités humaines dans le changement climatique et en alertant sur la nécessité d'une action immédiate pour en limiter les conséquences. Les principaux enjeux environnementaux se dégageant de cette analyse portent sur la protection des écosystèmes à travers la préservation de leurs ressources telles que l'air, l'eau ou encore le sol. Outre cette synthèse générale, le GIEC a publié une série de rapports thématiques spécifiques au cours de son évaluation et a proposé un document analytique consacré au changement climatique et à l'utilisation des terres. Les conclusions de ce rapport montrent que les sols subissent de nombreuses pressions anthropiques (e.g. changement d'usage, de structure, surexploitation, pollution, ...) qui sont à l'origine de leur dégradation. Face à ces observations et sur la base des préconisations scientifiques issues de ce rapport, différents objectifs ont été fixés à l'échelle du globe lors des négociations internationales sur le climat. Notamment lors de la COP21, les états membres se sont pour la première fois accordés à limiter l'augmentation de la température à 2°C, voire à tendre vers 1,5°C par rapport à l'ère préindustrielle. Cet accord a eu pour effet l'adoption des dix-sept objectifs de développement durable au sein desquels subsiste la préservation des écosystèmes, plus particulièrement à travers l'objectif d'amélioration de la qualité des terres et des sols. D'importantes mesures ont également été mises en place à de plus petites échelles, comme en Europe à travers la résolution du Parlement Européen sur la protection des sols. Leurs objectifs sont de répertorier l'ensemble des sites pollués des territoires, de définir des zones prioritaires de protection, d'adopter des stratégies de remédiation pour les sols dégradés ou pollués et d'informer les nouveaux acquéreurs de terrains des activités présentes ou passées opérées sur le site ; pour la France, ces mesures ont consisté en l'instauration du programme « zéro artificialisation nette » visant à limiter la consommation de nouveaux espaces naturels par le biais des modes d'urbanisation et à compenser l'artificialisation de ces espaces lorsqu'aucune alternative n'est envisageable. Les mesures adoptées pour préserver les sols s'avèrent nécessaires à bien des niveaux, particulièrement pour maintenir les fonctions qu'ils assurent et les services écosystémiques qu'ils fournissent, lesquels confèrent divers bénéfices et avantages aux hommes.

1.1.1. Les services écosystémiques et leurs enjeux

En 1990, pour la première fois, des liens sont établis entre les sols et les services écosystémiques qui leur sont associés (Adhikari & Hartemink, 2016). Ceux-ci dépendent des propriétés qu'acquière les sols au cours de leur pédogénèse et sont spécifiques à chaque sol. L'énumération des fonctions et services écosystémiques qui peuvent être attribués à un sol n'est pas une tâche aisée puisqu'elle nécessite la traduction de son organisation en un nombre limité de fonctions (de Groot *et al.*, 2002).

Les fonctions des sols sont définies comme « ce que fait le sol » (Seybold *et al.*, 1998). Elles peuvent correspondre aux différents processus qui résultent des interactions entre les composantes physiques, chimiques et biologiques du sol (Kibblewhite *et al.*, 2008). Elles sont classiquement regroupées en quatre entités : la régulation, l'habitat, la production et l'information (Dazzi & Lo Papa, 2021).

- Les fonctions de régulation correspondent à la faculté des sols à assurer des processus écologiques nécessaires à la mise en place et au maintien des communautés biologiques, à travers la régulation des cycles bio-géochimiques. Elles rassemblent couramment l'aptitude des sols à assurer le cycle de l'eau, celui des nutriments, la filtration et le pouvoir tampon des composés acides, organiques et inorganiques ou encore le stockage de carbone dans les sols ;
- Les fonctions d'habitat représentent la capacité des sols à offrir un environnement susceptible d'assurer la survie, le maintien et la reproduction des communautés végétales et animales et à préserver ainsi la diversité biologique et génétique du milieu ;
- Les fonctions de production sont attribuées à la faculté des sols à supporter ainsi qu'à produire de la biomasse ;
- Les fonctions d'information correspondent à la capacité des sols à maintenir une forme de bien-être humain (e.g. développement cognitif, fonction récréative).

Plus précisément, et conformément à la norme ISO 11074 (1997), les fonctions assurées par les sols sont : (i) le contrôle des cycles des éléments et de l'énergie (en tant que compartiment des écosystèmes), (ii) le support des plantes, des animaux et des populations humaines, (iii) la base des constructions et des bâtiments, (iv) la production agricole, (v) la rétention de l'eau et des dépôts, (vi) la formation d'une réserve génétique, (vii) la conservation en tant que mémoire de l'histoire et de la nature, (viii) la protection en tant qu'archive archéologique et paléoécologique. Certains auteurs s'accordent pour ajouter les aspects sociologiques et économiques et, par conséquent, incluent la valeur financière des sols à la

liste (Walter *et al.*, 2015). McBratney *et al.* (2017) précisent d'ailleurs que la seule entité sol de l'écosystème contribuerait à fournir des biens et des services avoisinant la valeur de 12 000 milliards de dollars chaque année, ce qui équivaut à l'ensemble de l'économie américaine (Dazzi & Lo Papa, 2021).

Outre ces fonctions, les sols fournissent des services écosystémiques. Ceux-ci diffèrent des fonctions au regard des avantages qu'ils confèrent aux êtres humains (Calvaruso *et al.*, 2021). Ils sont plus particulièrement définis comme des biens et services apportant des bénéfices et avantages aux populations humaines. Selon l'« évaluation des écosystèmes pour le millénaire », il existe, à l'instar des fonctions, quatre catégories de services écosystémiques : les services de soutien, d'approvisionnement, de régulation et culturels (Reid *et al.*, 2005).

- Les services de soutien correspondent aux services nécessaires à la production des autres services, tels que le recyclage de la matière organique ou le cycle des différents nutriments ;
- Les services d'approvisionnement sont liés à la fourniture d'eau et de biomasse végétale (à des fins alimentaires ou non) ;
- Les services de régulation concernent le climat, les flux ou la qualité du milieu environnant ;
- Les services culturels sont spécifiques aux bénéfices spirituels ou récréatifs fournis par les écosystèmes.

Bien que l'établissement d'une liste exhaustive des services écosystémiques rendus par les sols ne soit pas facilement réalisable, 23 services ont été identifiés par la classification internationale commune des biens et services écosystémiques (Drobnik *et al.*, 2018 ; Haines-Young & Potschin, 2013). Sont mentionnés notamment la régulation du microclimat local par les écosystèmes, le stockage de CO₂, la disponibilité naturelle d'eau potable et utilisable provenant des eaux souterraines et de surface, ou encore la disponibilité de paysages naturels et culturels de valeur pour une utilisation commerciale dans le tourisme.

Les services écosystémiques rendus par les sols sont étroitement liés aux fonctions qu'ils exercent qui, comme évoqué précédemment, dépendent elles-mêmes des caractéristiques des sols. Plusieurs auteurs se sont intéressés à la manière dont chaque facteur est interdépendant des autres et ont proposé une forme de hiérarchisation des processus (figure 1 ; Adhikari & Hartemink, 2016 ; Greiner *et al.*, 2017). Ces auteurs s'accordent à montrer que les sols, qui se sont formés et ont évolué via leur pédogenèse, présentent des caractéristiques qui leur sont propres dont découlent des fonctions à l'origine d'un pool de services écosystémiques bénéfiques à l'homme.

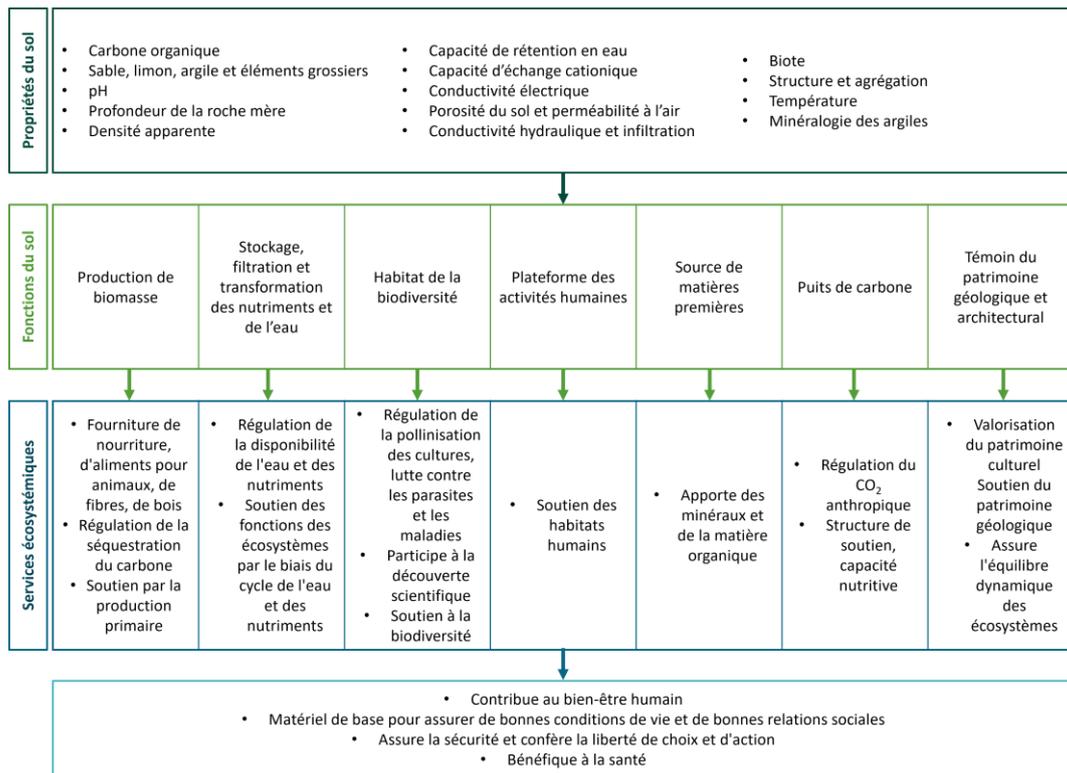


Figure 1 : Schéma représentant les liens entre les propriétés, les fonctions et les services écosystémiques des sols (d'après Adhikari & Hartemink, 2016)

1.1.2. La qualité des sols

Des propriétés, des fonctions et des services écosystémiques assurés par les sols, résulte la notion de qualité des sols. Cette dernière est définie comme « la capacité d'un type de sol spécifique à fonctionner dans les limites d'un écosystème naturel ou géré » (Karlen *et al.*, 1997). La définition de Doran et Parkin (1994) complète cette approche en proposant de formuler la qualité d'un sol comme « sa capacité à fonctionner dans les limites de l'écosystème pour soutenir la productivité biologique, maintenir la qualité de l'environnement et promouvoir la santé des plantes et des animaux ». Toutes les définitions formulées au cours du temps partagent l'idée selon laquelle la qualité du sol représente sa capacité à fonctionner efficacement aujourd'hui et à l'avenir (Doran & Parkin, 1994).

La caractérisation de la qualité des sols a été initiée par l'observation de changements (favorables ou défavorables) des propriétés et des fonctionnalités des sols (Taylor *et al.*, 2010). La détermination de la qualité des sols a pour objectif d'optimiser les pratiques de gestion, ceci afin de préserver la ressource sol. Très souvent, la qualité du sol est étudiée dans le cadre des systèmes agricoles pour en mesurer la productivité. En effet, les premiers travaux ont porté sur ces sols spécifiques puisque l'opinion commune au sujet du rôle des sols les limitait alors à leur simple soutien de production (Mausel, 1971).

La dégradation des sols, combinée aux changements climatiques et à la croissance démographique, représente un risque majeur pour la sécurité alimentaire mondiale et la qualité de l'environnement (Allen *et al.*, 2011). L'altération progressive des sols inhibe leurs fonctions et supprime leur capacité à fournir tout ou partie de leurs services écosystémiques (Estrada-Herrera *et al.*, 2017). Cette dégradation des sols est attribuée à de multiples facteurs dont les principaux sont la mauvaise gestion des sols et des nutriments, le surpâturage et l'élimination excessive des résidus de culture. Ils trouvent leur origine au début des années 1950 qui marquent un tournant dans les pratiques agricoles engendrant, dès lors, des modifications des caractéristiques des sols. Pour améliorer les rendements, différentes actions avaient été préconisées à cette époque, telles que la pratique des labours profonds pour décompacter et aérer le sol ou encore l'utilisation d'intrants pour couvrir les besoins des cultures. Les conséquences de l'adoption de ces nouvelles pratiques n'ont pas tardé à se manifester puisqu'en 1994, un bilan à l'échelle mondiale de la capacité de production des terres agricoles faisait déjà état de 40 % de surfaces dégradées par les actions humaines (Oldeman, 1994). Plus récemment, le programme des Nations Unies pour l'environnement a fait état de 70 % des surfaces continentales altérées par les opérations humaines dans son deuxième rapport sur les sols datant du mois d'avril 2022. En s'appuyant sur les données disponibles entre 2000 et 2015, les auteurs ont montré que 30 millions de km² (soit l'équivalent de la surface de l'Afrique) ont été dégradés ou sujets à la désertification. Il ressort ainsi que les pratiques mises en œuvre sont à l'origine de l'érosion des sols, leur compaction, leur perte de biodiversité, leur salinisation ou encore leur désertification. Selon les prévisions, si les pratiques restaient inchangées, 90 % des écosystèmes actuels subiraient des altérations et les changements qui en découlent. Bien qu'une partie des activités humaines ait un effet négatif sur le sol en l'altérant, soulignons toutefois que d'autres actions visent à améliorer son fonctionnement. Le respect d'une agriculture raisonnée par le biais, par exemple, de la réduction du travail du sol, la mise en place de cultures intermédiaires ou encore la plantation de haies a pour objectif d'améliorer progressivement les caractéristiques des sols dégradés.

Quelles que soient les pratiques en place, il est apparu essentiel de caractériser la qualité des sols pour en évaluer le degré de dégradation, la fonctionnalité et proposer des pratiques de gestion adaptées pour les préserver. Parmi les méthodes utilisées pour déterminer la qualité des sols, il est à citer les méthodes dites « réductionnistes » s'apparentant aux évaluations qualitatives conventionnelles d'autres champs d'application et se référant à un ensemble d'indicateurs physiques, chimiques et biologiques du sol, indépendants les uns des autres. Ces méthodes sont en opposition avec les méthodes « intégrées » se différenciant des premières par leur prise en compte globale de l'entité sol. Les méthodes intégrées supposent que l'état du sol ne correspond pas à la somme des

contributions d'un ensemble de composants spécifiques, mais plutôt aux interactions de différents processus et propriétés à l'origine de caractéristiques sous-jacentes (Kibblewhite *et al.*, 2008). Certains auteurs vont même jusqu'à évoquer la santé des sols plus que leur qualité, puisqu'elle traduit selon eux davantage l'image d'un système vivant et qui évolue sous les contraintes de son environnement (Doran & Zeiss, 2000 ; Wood & Litterick, 2017). Si les deux termes sont employés comme des synonymes dans les différents travaux de recherche, le terme qualité est plus largement utilisé pour décrire l'aptitude du sol à un usage spécifique, tandis que la santé qualifie plus largement sa capacité à fonctionner comme un système vivant et dynamique dont les fonctions sont médiées par une diversité d'organismes vivants qui nécessitent une gestion et une conservation (Doran & Zeiss, 2000).

D'une manière générale, un sol « sain » possède suffisamment de nutriments minéraux, une profondeur d'enracinement adéquate, des micro-organismes favorisant la croissance, une pression moindre des ravageurs et des adventices, ainsi qu'une résistance et une résilience à la dégradation des terres (Magdoff, 2001 ; Maharjan *et al.*, 2020). Kibblewhite *et al.* (2008) définissent un sol agricole sain comme un sol « capable de soutenir la production d'aliments et de fibres, à un niveau et avec une qualité suffisants pour répondre aux besoins humains, tout en continuant à fournir d'autres services écosystémiques essentiels au maintien de la qualité de vie des humains et à la conservation de la biodiversité ». Seybold *et al.* (1999) distinguent les concepts de résistance et de résilience des sols qu'ils associent directement à leur santé. Pour ces auteurs, la résistance correspond à la faculté du sol à se maintenir en son état face à un élément perturbateur, tandis que sa résilience traduit plutôt sa capacité à revenir à son état d'équilibre à la suite d'une perturbation.

Pour compléter les précédents concepts et apprécier la qualité des sols, la notion de « Soil Health Gap », qui pourrait se traduire comme le déficit de santé des sols, a été introduite récemment (Maharjan *et al.*, 2020). Ce terme est défini comme « la différence entre la santé du sol dans un sol natif non perturbé et la santé actuelle du sol dans une terre cultivée d'un agroécosystème donné ». Le déficit de santé des sols peut être déterminé sur la base d'une ou de plusieurs propriétés générales ou spécifiques du sol (telles que la teneur en carbone, la taille et la stabilité des agrégats, la porosité, l'infiltration, etc). En pratique, les auteurs proposent de se référer à l'équation suivante : état initial de référence de la santé du sol – état dégradé de la santé du sol = déficit de santé du sol d'étude. La détermination des états initiaux et finaux est établie en tenant compte de plusieurs des propriétés qu'il est d'usage d'employer pour évaluer la santé des sols.

1.2. LA PROBLEMATIQUE DES SOLS EN VILLE

1.2.1. Les enjeux de la connaissance et de la gestion des sols urbains

Les sols urbains figurent parmi les catégories qui subissent le plus de perturbations principalement induites par des pressions anthropiques (Pouyat *et al.*, 2015). Ces sols sont sujets à de nombreuses modifications fonction du développement et de l'évolution des villes. À titre d'exemple, la superficie occupée par les zones urbaines a augmenté de 78 % depuis les années 1950 et ne cesse de croître (Levin *et al.*, 2017). Ce phénomène d'expansion urbaine est intrinsèque à la croissance démographique mondiale qui va poursuivre sa tendance selon les estimations les plus récentes des Nations Unies (29 juin 2022). Ces dernières prévoient notamment qu'en 2050, 9,7 milliards d'individus occuperont la Terre et que 70 % d'entre eux résideront en milieu urbain. Pour satisfaire la demande croissante d'implantation de nouvelles populations en milieu urbain, les politiques d'aménagement du territoire s'appuyaient jusqu'alors majoritairement sur le déploiement des villes en prenant appui ou en artificialisant directement les terres rurales attenantes aux cités. Néanmoins, avec les avancées des connaissances sur les sols, leurs caractéristiques et services écosystémiques, il s'avère nécessaire pour les différents acteurs concernés d'évoluer vers de nouvelles pratiques plus respectueuses de cette ressource indispensable au maintien du bien-être des populations. En conséquence, les enjeux de la gestion du territoire sont multiples et s'articulent autour de la volonté première de bâtir des villes durables. Cet objectif global suppose de tenir compte de la nécessité d'augmenter la capacité d'accueil du territoire urbain pour accueillir de nouveaux habitants tout en s'assurant de conserver les sols fertiles qui lui sont limitrophes. Les décideurs politiques s'appuient ainsi sur les travaux engagés par les communautés scientifiques et techniques qui travaillent, d'une part, à identifier et caractériser les sols du milieu urbain ainsi que leurs propriétés et services écosystémiques et, d'autre part, à concevoir des stratégies et technologies inédites susceptibles d'offrir de nouveaux usages aux sols urbains délaissés jusqu'alors (e.g. sols de friches industrielles).

Outre les aspects scientifiques et techniques spécifiques aux sols urbains, les enjeux sont également économiques et sociétaux. D'une manière générale, la dégradation des sols est très onéreuse et peut affecter directement ou indirectement la santé des populations. La seule érosion des sols par l'action de l'eau représente un coût annuel de 8 milliards de dollars pour le PIB mondial et provoque une réduction globale de la production alimentaire de 33,7 millions de tonnes qui s'accompagne d'une hausse des prix des produits de 0,4 à 3,5 % et menace de surcroît la sécurité alimentaire (Sartori *et al.*, 2019). La dégradation des sols affecte aussi leur capacité à assurer certains services indispensables aux sociétés humaines telles que la filtration des eaux, la gestion des flux ou encore le support de biodiversité. Conscients des

bénéfices des sols, les citoyens manifestent d'ailleurs leur volonté de profiter davantage d'espaces verts récréatifs ou productifs pour retrouver, entre autres, une forme de connexion à la production alimentaire qu'ils jugent trop éloignée du milieu urbain tel qu'il est conçu aujourd'hui. Pour assurer un développement durable des territoires, les acteurs de sa gestion requièrent des données et préconisations solides sur lesquelles s'appuyer. En France, une première approche a consisté en l'adoption de la loi ALUR (2014) dont l'objectif est de consolider les connaissances et informations sur la pollution des sols par la création de secteurs d'information sur les sols, d'effectuer une analyse des sols (pour la mise en place d'une gestion appropriée à leur degré de pollution) et d'imposer leur remise en état si l'exploitation les avait toutefois dégradés. La gestion des sols urbains n'en est encore qu'à ses prémices mais répond à de nombreux enjeux évidents et nécessaires au maintien de la qualité de vie des citoyens actuels et futurs.

Dans le cadre de l'aménagement et du développement durable du territoire urbain, le micro-maraîchage bio-intensif s'avère une véritable opportunité de répondre à la demande des populations urbaines de reconnexion de la production alimentaire en ville tout en valorisant de petites surfaces délaissées (pour partie issues du mitage urbain). Ce modèle horticole conjugue la micro-agriculture à l'agriculture bio-intensive et vise à maximiser les rendements de productions maraîchères diversifiées sur de petites surfaces (généralement inférieures à un hectare) avec le souci d'entretenir, de préserver, voire d'améliorer la biodiversité et la fertilité des sols cultivés à l'aide d'apports d'amendements organiques. Promu outre-Atlantique depuis plus d'une trentaine d'années par Eliot Coleman et Jean-Martin Fortier, ce système cultural s'inspire des pratiques des maraîchers de la ceinture parisienne du XIX^{ème} siècle auxquelles il associe les principes fondateurs de l'éco culture. Il repose, entre autres, sur l'utilisation de méthodes de production intensives telles que la couverture intégrale du sol, les associations culturales, le choix variétal, la création ou la préservation de synergies positives entre les différents constituants de l'écosystème, une planification minutieuse, une alternance rapide des cultures ou encore l'entretien de la vie du sol. À travers leur slogan « Small is beautiful » emprunté à l'économiste Ernst Schumacher, les promoteurs de cette agriculture prônent les vertus de ce système « petit mais vertueux » qui leur confère d'importants revenus (jusqu'à 120 000 € par hectare) sur de petites surfaces tout en leur permettant des investissements minimes ainsi que de faibles besoins en termes de superficie, machine, énergies fossiles, etc (Coleman *et al.*, 1995 ; Fortier, 2012).

1.2.2. Les sols urbains et leurs particularités pédologiques

1.2.2.1. Éléments de définition et caractéristiques générales

Parmi les différents types de sols, les sols anthropisés exposent un état et un fonctionnement (et intrinsèquement une santé) plus fluctuants au cours du temps (Igalavithana *et al.*, 2017). Ces sols présentent la particularité d'avoir des propriétés et une pédogénèse dominées par leur origine anthropique. Ils peuvent présenter des caractéristiques particulières comme d'importantes quantités de matériaux artificiels (ou artefacts (IUSS 2006)), un scellement anthropique en surface ou une compaction des matériaux en profondeur (IUSS, Working Group WRB, 2006). Tout sol dont le fonctionnement n'est plus régi par des processus naturels est considéré comme un sol anthropisé (Howard, 2021). Les modifications d'usage de ces sols dépendent en grande partie des besoins humains, c'est pourquoi il existe de nombreux sols anthropisés modifiés à des degrés très différents par les activités humaines. Ces sols se retrouvent en grande partie en milieu urbain où ils se distinguent souvent des sols des autres milieux par la nature de leurs constituants issus d'apports, de mélanges de sols, de matériaux exogènes, de déchets divers et de matériaux de dragage. De plus, ils sont sujets à la compaction, au nivellement, à l'imperméabilisation et à l'excavation/exportation (Levin *et al.*, 2017).

Les sols urbains concentrent l'ensemble des sols situés en milieu urbain, qu'ils soient naturels ou d'origine anthropique. Cette désignation s'appuie sur la localisation des sols et rassemble donc une grande diversité de sols aux caractéristiques variées qui peuvent être anthropisés à des degrés très divers, voire non anthropisés. Liu *et al.* (2014) ont proposé une zonation/délimitation depuis les zones urbaines aux limites administratives des villes. Pour les auteurs, les territoires urbains ne se résument pas à la seule ville mais comprennent également les zones métropolitaines et périurbaines sous l'influence de l'agglomération. Dès lors, les sols urbains ne sont pas exclusivement concentrés dans les zones urbaines mais sont également présents dans d'autres milieux tels que les zones périurbaines et composent une véritable mosaïque témoin des multiples usages qui leur sont attribués. Une fraction importante des sols urbains sont en effet soumis à des altérations physiques (élévation ou nivellement de terrain par l'ajout ou le retrait de matériaux de remblai, creusement de tranchées, remodelage) et chimiques (activités industrielles, résidentielles, routières, dépôts atmosphériques) (Riddle *et al.*, 2022), qui les transforment en routes, espaces végétalisés, cultivés, forêts ou encore friches industrielles.

Parmi les sols urbains anthropisés, trois processus de formation ont été identifiés ; ils correspondent à la métapédogénèse, la technopédogénèse et l'ekranopédogénèse (Howard, 2021). La métapédogénèse s'est opérée sur l'ensemble des sols naturels dont les profils ont

évolué vers une nouvelle classe de sol à la suite d'un apport de matière organique par l'homme. L'enrichissement des sols en matière organique peut d'ailleurs générer un déséquilibre thermodynamique entre les différents matériaux qui composent le sol (e.g. artefacts), à l'origine d'une importante accélération de leurs processus de formation (quelques décennies). La technopédogénèse concerne les sols dont la pédogénèse a été influencée par l'incorporation d'une part importante d'artefacts d'origine humaine. L'ekrapédogénèse s'est, quant à elle, réalisée sur les sols naturels ayant été scellés ou imperméabilisés par l'installation d'un revêtement ou d'un matériau imperméable. Généralement, les sols urbains correspondent à des sols composés d'un mélange de matériaux naturels et allochtones de différentes natures (Libessart *et al.*, 2022), et qui peuvent présenter une couche de surface supérieure à 50 cm et fortement transformée par les activités humaines telles que le mélange, l'importation et l'exportation de matériaux plus ou moins contaminés. Il peut s'agir de sols de parcs, d'espaces verts ou de jardins urbains à vocation ornementale ou alimentaire dont la gestion diffère de celle des sols agricoles, ou encore de sols issus de construction en milieu urbain, lesquels sont souvent scellés (Cheverry & Gascuel, 2009 ; Levin *et al.*, 2017 ; Morel *et al.*, 2005). Les sols urbains les plus répandus sont les sols résidentiels (Technosols Urbic selon la WRB 2014 établie par l'IUSS working group) et étanches (Ekranic). Sont observés dans de moindres proportions, les sols de jardins urbains (Anthrosols Hortic), de cimetière (Nekric), industriels (Technosols Industruic) et miniers (Spolic) (Howard, 2021).

En termes d'évolution des sols urbains, il est observé une imperméabilisation, voire un scellement croissants. Il a été estimé que l'expansion urbaine se traduisait par l'imperméabilisation de 17 hectares de sol chaque minute dans le monde (Murata & Kawai, 2018). En moyenne, un territoire urbain standard compte 60 à 70 % de sols dégradés ou scellés. Ces changements s'expliquent en partie par la croissance démographique combinée à l'étalement urbain pour répondre à la demande de nombreux citoyens de s'installer en ville. Cet étalement urbain se traduit par la perte de terres agricoles et par l'artificialisation des sols (Antoni, 2011). Schématiquement, cette dernière augmente depuis la périphérie pour atteindre un maximum au cœur de la ville où les sols sont le plus souvent reconstitués, isolés du sous-sol, voire construits (Antoni, 2011 ; Béchet *et al.*, 2017).

Au bilan, le territoire urbain comprend une grande diversité de sols, d'occupations variées (cf. éléments précités : routes, etc.). Ces types d'occupation évoluent au fil du temps pour répondre à de nouveaux besoins. Ces évolutions leur confèrent alors un caractère polycyclique. Chaque ville possède des caractéristiques pédologiques spécifiques dépendantes du sol naturel sous-jacent sur lequel elle a été bâtie, de l'histoire de son développement et de l'ensemble des pratiques intrinsèques à son évolution

(Riddle *et al.*, 2022). Si les sols urbains présentent une grande diversité de caractéristiques, une tendance se dessine néanmoins avec, pour la plupart, des propriétés communes. En effet, ils sont les réceptacles de déchets industriels et de sous-produits issus des activités humaines (e.g. chauffage urbain, circulation automobile, déchets d'incinération, maraîchage) parfois susceptibles de contenir des polluants organiques et/ou inorganiques à l'origine de leur contamination (Lehmann & Stahr, 2007 ; Levin *et al.*, 2017). Ils présentent une proportion variable d'éléments grossiers (> 2 mm) d'origine naturelle mais aussi anthropogène (e.g. brique, béton, verre, asphalte). En 2017 aux États-Unis, les chercheurs du service de conservation des ressources naturelles (NRCS) ont analysé différents artefacts qu'ils ont regroupés à travers deux catégories : les artefacts dont la taille était supérieure à 2 mm qu'ils ont regroupés parmi le groupe des particules artificielles et ceux dont la taille était inférieure ou égale à 2 mm qu'ils ont catégorisé comme artefacts particuliers. Les particules artificielles proviennent de l'accumulation en surface de déchets de diverses origines, tandis que les artefacts particuliers émanent de dépôts aériens (e.g. cendres volantes), de l'abrasion et du broyage de matériaux anthropogènes par des équipements mécanisés. Quelle que soit leur taille, les artefacts de ces sols sont en général très résistants à la dégradation dans le temps. Les sols urbains se caractérisent aussi par des valeurs de densité apparente extrêmes (soit très faibles (< 0,5) soit très élevées (> 1,60), dépendantes de la nature du matériau parental), un pH basique souvent lié à l'incorporation de produits alcalinisants dans les sols ou à la présence de matériaux carbonatés (béton, mortier et chaux), une forte teneur en matière organique, un rapport C/N relativement élevé (Morel *et al.*, 2005) et une température plus importante que celle des sols ruraux qui leur sont attenants (Turkoglu, 2010).

1.2.2.2. Les Technosols

Pour compléter la nomenclature des sols sous l'influence des activités anthropiques, le terme Technosol a été introduit dans la deuxième édition de la Base de Référence Mondiale des sols (WRB – World Reference Base) en 2006 (Lehmann, 2006). Cette classe regroupe les sols dont les propriétés et la pédogénèse sont dominées par l'origine technique (c'est-à-dire anthropique) de leurs constituants. Les Technosols se différencient par une teneur d'artefacts supérieure à 20 % (produits dont l'origine est anthropique, tels que des fragments de verre, de ferraille, des matériaux de construction et des scories) dans les 100 premiers centimètres (FAO, 2014 ; Rossiter, 2007), la présence en profondeur d'une géomembrane ou encore d'un scellement lié à la présence d'un matériau technique dur (d'origine anthropique) à différentes profondeurs.

Cette catégorie de sols permet d'inclure à la classification toutes les surfaces supports de produits résiduels des activités humaines telles que les décharges, les zones de stockage de

déchets ou de sous-produits ou encore les terrils miniers (Séré, 2007). De ce fait, les Technosols peuvent aussi bien être observés dans les zones urbaines que dans les environnements témoins d'activités industrielles actuelles ou passées. Ils sont présents dans toutes les régions du monde où l'activité humaine a conduit à la formation ou à la construction de sols artificiels, à l'imperméabilisation de sols naturels ou à l'extraction de matériaux normalement non affectés par les processus de surface (FAO, 2014).

Si le terme Technosol a été défini dans la WRB2006, il a été mentionné pour la première fois en 1996 dans un article allemand qui visait à accélérer le développement de la végétation sur des résidus miniers au moyen d'un "substrat traité thermiquement" (Jochimsen, 1996). Son utilisation s'est généralisée une fois la définition ajoutée à la WRB, avec une croissance exponentielle des recherches scientifiques sur ce sujet.

Les Technosols sont présents dans le monde entier, mais leur étude se concentre principalement en Russie, en Amérique (USA et Brésil) et en Europe, plus particulièrement en France, en Espagne, en Pologne, en Allemagne et en Italie. Ils constituent un groupe d'intérêt puisqu'ils permettent d'appréhender le fonctionnement et l'évolution des sols soumis à divers degrés à des pressions anthropiques. L'étude des Technosols se focalise principalement sur d'anciens sites miniers ou d'anciennes industries (friches industrielles). Elle vise dans la plupart des cas à observer leur pédogénèse, leur fonctionnement en fonction des facteurs anthropiques qui ont altéré le sol initial (Huot *et al.*, 2013, 2014 ; Monsérié *et al.*, 2009 ; Scalenghe & Ferraris, 2009) ou encore à étudier l'évolution de leur qualité lorsqu'ils font l'objet d'une remédiation (Ahirwal *et al.*, 2018 ; Ahirwal & Maiti, 2018).

Pour répondre à des objectifs spécifiques (introduction de fonctions ou services écosystémiques particuliers), certains Technosols sont construits par l'homme en faisant appel au génie pédologique. Ils résultent alors d'une formulation délibérée de différents matériaux et artefacts (Séré *et al.*, 2010). Les études portant sur les Technosols construits et les façons de les construire sont relativement récentes. Leur construction implique des matériaux divers tels que des déchets et sous-produits urbains non valorisés, avec pour finalité d'améliorer la fonctionnalité de sols dégradés par les activités humaines, ceci sans prélever de nouvelles ressources naturelles. Bien que l'appellation de Technosol construit n'apparaisse pas dans la WRB2016, Séré *et al.* (2010) proposent d'intégrer cette sous-catégorie dans celle des sols anthropisés, à l'instar du référentiel des sols français (AFES 2009). En effet, ce référentiel sous-catégorise les Anthrosoles pour y inclure les Anthrosoles construits.

Dans la mesure où les sols sont connus pour fournir certains services écosystémiques essentiels au bien-être des populations urbaines (Morel *et al.*, 2015), il existe une demande croissante pour l'implantation d'espaces verts dans les villes. Par ailleurs, les aménageurs

urbains ont aussi pour objectif de limiter l'exposition des populations aux polluants. C'est pourquoi durant ces dernières années, la piste de la restauration des sites dégradés ou délaissés dans les zones urbaines et périurbaines a été privilégiée. Ceci s'est fait en ajoutant de la matière organique (Grosbellet, 2008) en vue de favoriser l'installation d'un couvert végétal et de gérer ces sols dégradés (Kumpiene *et al.*, 2008) au moyen d'un phytomanagement (Janus, 2017). Cette technique tend, lors de la création d'espaces verts, à remplacer les méthodes d'aménagement qui reposent exclusivement sur l'ajout de terre végétale² ou sur l'utilisation d'un mélange de terre et de pierres partiellement prélevées sur des zones agricoles. Soulignons qu'en France, la construction d'espaces verts nécessite chaque année 3,1 millions de tonnes de sols prélevés dans les milieux ruraux et communément appelés « terres arables ».

À ce jour, les pratiques évoluent et de nouvelles approches, basées sur une logique d'économie circulaire et de recyclage des déchets, émergent (Fosse, 2019). Plutôt que de prélever des ressources finies (sols) dans les zones agricoles et de déverser des déchets dans les campagnes, l'ambition est de répondre à la demande d'implantation en ville d'espaces verts, à vocation alimentaire ou non, en combinant des déchets et sous-produits pour construire de nouveaux supports de production. La construction de Technosols à partir de déchets directement disponibles en milieu urbain pourrait constituer une solution prometteuse. Cet objectif prend tout son sens puisqu'il a été observé que sur 344 millions de tonnes de déchets produits en France en 2012, seulement 64 % avaient été valorisés (Cannavo *et al.*, 2019). Parmi les déchets non valorisés, certains pourraient présenter un intérêt pour la création de Technosols.

1.2.2.2.1. Le cas des Technosols construits

- Élaboration

La construction de Technosols, telle que définie par Séré *et al.* (2008), est un processus qui consiste à s'inspirer de l'organisation et du fonctionnement des sols naturels pour créer des sols artificiels fonctionnels. La démarche a pour ambition de créer un sol présentant des caractéristiques en adéquation avec l'usage prévu. Il est donc nécessaire : (i) d'adapter les propriétés du sol construit, (ii) d'ajuster les niveaux de fonctions aux usages du sol, et (iii) de définir des valeurs optimales pour les propriétés du sol.

Le respect des principes de l'économie circulaire peut permettre de satisfaire aux contraintes économiques inhérentes à la construction des Technosols. La démarche consiste

² L'Afnor définit la « terre végétale » comme une terre issue d'horizons de surface humifères ou d'horizons profonds pouvant être mélangée avec des matières organiques d'origine végétale, des amendements organiques et/ou des matières minérales

alors à : (i) identifier préalablement les gisements de déchets et sous-produits susceptibles d'être utilisés pour construire un Technosol, (ii) sélectionner les plus pertinents au regard notamment de leur toxicité, de leur état, de leur fertilité, de leur disponibilité (en quantité et à proximité), (iii) formuler des combinaisons au moyen des matériaux retenus en vue d'obtenir des supports en adéquation avec les usages prévus.

Des outils d'aide à la décision existent pour prédire les propriétés des formulations à partir des caractéristiques des matériaux utilisables et de leur proportion dans le mélange. Par exemple, Rokia *et al.* (2014) ont développé un de ces outils en s'appuyant sur plusieurs modèles mathématiques prédictifs. Cet outil facilite la modélisation des propriétés agronomiques des Technosols construits avec 2 ou 3 matériaux et prend en compte 6 paramètres agronomiques (teneurs en carbone total et phosphore assimilable, capacité d'échange cationique, pH_{eau} , capacité de rétention en eau à la capacité au champ à -10 kPa et densité apparente).

Parmi les travaux qui ont porté sur l'élaboration de Technosols et sur la formulation de leurs matériaux parents, trois méthodes peuvent être distinguées. La première méthode est empirique et repose sur l'expertise de spécialistes pour définir les associations de matériaux qui, mélangés et superposés, doivent permettre de répondre aux besoins de l'usage futur. La deuxième consiste en une optimisation des propriétés et définit, pour chaque horizon, une gamme de valeur cible à atteindre pour une sélection de paramètres pertinents. Dans le cadre de cette méthode, il s'agit de constituer les associations de matériaux qui permettent de tendre le plus possible vers les objectifs cibles. La dernière méthode s'appuie sur l'identification d'un sol de référence au regard de l'usage futur du sol puis à en déterminer les propriétés de sorte à s'en approcher le plus possible.

Quelle que soit la méthode employée, toutes reposent sur la définition de profils en fonction des usages attendus. Ces profils sont caractérisés par un nombre d'horizons, une typologie de fonctions (e.g. horizon de croissance, de développement, horizon technique ou encore horizon squelette) et une organisation au sein du profil (Damas & Coulon, 2016). Ainsi, pour optimiser le fonctionnement des Technosols dédiés à la création d'espaces verts, il peut être recommandé de différencier un ou plusieurs types de couches selon leurs fonctions attendues. Il s'agit de bas en haut : (i) d'une couche squelette qui correspond à un mélange terre-pierre de nature différente (en utilisant par exemple des matériaux de démolition), représentant une majeure partie de l'épaisseur du Technosol et dont le rôle est d'assurer la portance et de garantir l'infiltration des eaux pluviales ; (ii) d'une couche intermédiaire, qualifiée de technique, qui peut être une association d'éléments grossiers et de matières organiques, et qui contribue à la portance et à l'apport de nutriments pour les plantes ;

(iii) d'une couche de croissance dont le rôle est d'apporter aux plantes l'eau et les nutriments (Damas & Coulon, 2016 ; Grard, 2017 ; Pruvost, 2018). Cette superposition des trois couches est d'ailleurs très proche de celle décrite par l'élève d'Aristote Teofrasto en 2400 avant J.-C., qui nommait le sol « Edaphos » pour le distinguer de la terre en tant que corps cosmique. Pour cet auteur, le sol était constitué de trois couches : (i) la première, superficielle, était très riche en matière organique, (ii) le sous-sol décrit comme une couche dense capable de fournir des nutriments aux herbes et aux arbustes et (iii) le substrat dont le rôle était de fournir un jus nutritif aux racines des arbres (in Saltini, 1989). Si dans certaines situations, la création de Technosols peut nécessiter la superposition de trois couches en fonction de l'utilisation prévue, il est possible d'atteindre les objectifs avec la création d'une unique couche (voire de deux couches), de sorte que l'empilement de trois couches ne doit pas être considéré comme un objectif en soi.

Bien que les objectifs finaux ne soient pas les mêmes (e.g. aménagement d'espaces verts urbains, de routes, plantation d'arbres en ville, restauration de sols ou de sites pollués ou production alimentaire urbaine), les études de construction de Technosols suivent cette logique de superposition de couches en utilisant divers matériaux pour assurer différentes fonctions dans leurs protocoles expérimentaux (Damas & Coulon, 2016 ; Grard, 2017 ; Pruvost, 2018 ; Rokia, 2014 ; Séré, 2007). Outre la réflexion associée à l'assemblage des matériaux parents, les méthodologies mises en œuvre tiennent compte de la nécessité de disposer d'un substrat qui, suivant les usages, devra présenter : (i) une fertilité chimique en adéquation avec les besoins des biomasses installées, (ii) une épaisseur adaptée à l'enracinement des plantes, (iii) une capacité de portance adaptée (piétinement, stationnement, circulation), (iv) une perméabilité suffisante pour permettre l'infiltration des eaux pluviales et limiter le ruissellement tout en bénéficiant d'une capacité de rétention en eau suffisamment importante pour assurer les besoins des végétaux et limiter éventuellement l'irrigation, mais aussi (v) des concentrations en polluants inférieures aux seuils réglementaires lorsque ceux-ci existent (tels que pour les amendements organiques). Le cas échéant, ces concentrations doivent être suffisamment faibles pour pallier tout danger, notamment la diffusion des contaminants à d'autres compartiments environnementaux (Deeb *et al.*, 2020). La figure 2 renseigne sur la nature des matériaux et leur combinaison mises en œuvre pour élaborer les couches de Technosols de différents travaux réalisés en France.

Au regard de la figure 2, le nombre de matériaux mis en œuvre pour l'élaboration des Technosols est relativement limité. Six familles de matériaux peuvent être distinguées :

- Les matériaux minéraux ou inertes issus du BTP (ballast, terres excavées, déchets du bâtiment, béton, briques et tuiles concassées) ;

- Les matériaux résiduels, écarts de procédés de fabrication ou de production (résidus de champignonnière, sous-produits papetiers, tuiles et briques concassées) ;

- Les matériaux issus du traitement d'eaux urbaines ou industrielles (boues de papeterie, de station d'épuration, compost de boues de station d'épuration, et co-compost de boues de station d'épuration et de broyat de palettes) ;

- Les matériaux résultant du traitement de sols contaminés (terres industrielles excavées et traitées) ;

- Les matériaux organiques issus de l'entretien d'espaces tels que les espaces verts, les zones récréatives, les jardins privés, les serres, les terrains de sport (bois broyé, compost de déchets verts, déchets de balayage de rue et déchets verts).

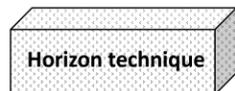
Les différences constatées entre les formulations des Technosols construits résident dans la nature des matériaux et leurs parts dans les formulations ainsi que dans l'agencement de ces dernières. À chacune de ces formulations correspond une couche dans un Technosol donné. La démarche que les auteurs ont adoptée pour l'élaboration des couches de Technosols construits repose sur l'assemblage (c'est-à-dire la mise en contact par juxtaposition) de matériaux parents susceptibles de remplir une ou plusieurs fonctions telles que l'approvisionnement, la régulation ou les services culturels. Les formulations initiales des matériaux sont ainsi déterminées en fonction de leurs caractéristiques spécifiques et ceci dans le but de répondre au mieux aux attentes.

- Impacts sur la Pédogénèse

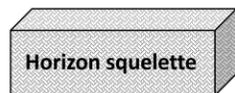
L'introduction de matériaux anthropogènes dans l'élaboration des formulations confère aux Technosols construits des propriétés physico-chimiques semblables telles que des teneurs élevées en carbonates, une saturation en Ca^{2+} , un pH alcalin, une forte porosité (Séré *et al.*, 2010). Les horizons de surface présentent des teneurs en carbone organique élevées du fait d'une utilisation massive de matériaux organiques (Bini & Gaballo, 2006). De plus, il est observé d'importants contrastes entre les différentes couches constitutives des Technosols. Ils concernent leur composition mais aussi d'autres caractéristiques telles que leur texture et leur densité apparente.



Séré, 2007	Rokia, 2014		Burrow, 2015	Pruvost, 2018
CDV	Binaire : - TE + CBSE, DV, DBR, BSE, DB, BA, BR, BC - BR, CBSE ou SPP - BA + CBSE ou SPP	Ternaire : - TE + (BC + DV), (BC + BSE), (DB + CBSE), (BA + DBR), (BA + BSE), (BA + SPP) ou (BA + DBR) - BA + DBR + DV	- L - L + CDV	- TE - TE + BC - TE + BC + CDV
			Grard, 2017	SITERRE, 2010 – 2016
			- BB + CDV (en couches), - BB + RC + CDV (en couches) - Mix de BB + CDV	- TE + CBSE - BR + CBSE - BA + DBR + CBSE



Séré, 2007	SITERRE, 2010 – 2016
SPP + TIT	BA + BP



Grard, 2017	SITERRE, 2010 – 2016
TBC	TE + BA + BSE TE + BC + DV

- BA Ballast
- BB Bois broyé
- BC Béton concassé
- BP Boues de papeterie
- BR Briques
- BSE Boues de station d'épuration
- CBP Compost de boues et broyat de palettes
- CBSE Compost de boues et de station d'épuration
- CDV Compost de déchets verts
- DB Déchets du bâtiment (démolition)
- DBR Déchets de balayage de rue
- DV Déchets verts
- L Limon
- RC Résidus de champignonnière
- SPP Sous-produits papetiers
- TBC Tuiles et briques concassées
- TE Terres excavées (acides ou basiques)
- TIT Terre industrielle traitée

Figure 2 : Liste des matériaux cités dans la littérature française et utilisés pour formuler les différentes couches de Technosols construits

Les Technosols construits, comme les sols naturels, sont soumis aux facteurs bioclimatiques, de station³ et anthropiques ; ils évoluent au cours du temps sous l'effet de différents processus pédogénétiques. Huot *et al.* (2015) rapportent que l'évolution pédogénétique des Technosols est comparable à celle des sols naturels, mais qu'elle en diffère en termes d'intensité. Des constats similaires ont été observés par Rokia *et al.* (2014), Rossiter (2007) et Séré *et al.* (2010). Alors que les sols naturels résultent d'une évolution pendant plusieurs décennies, siècles voire millénaires, les Technosols construits acquièrent leurs propriétés en une dizaine d'années maximum. À ce titre, ils suivent différentes phases d'évolution et au cours du temps, l'influence des matériaux technogènes sur la pédogénèse tend à diminuer. Cette évolution pourrait conduire à ne plus considérer ces sols comme des Technosols puisqu'ayant évolué vers un autre groupe de sols au regard des processus dominants (Huot *et al.*, 2015).

Comme pour les sols naturels, les caractéristiques des matériaux parentaux des Technosols jouent un rôle déterminant sur certaines de leurs propriétés telles que leur texture, leur structure et leur drainage. Leur influence dans la pédogénèse des Technosols construits a été mise en évidence plus particulièrement au cours des stades les plus précoces des processus (Huot *et al.*, 2015). La minéralogie des constituants au sein des couches évolue au cours du temps sous l'effet des processus d'altération (Fabbri *et al.*, 2021). Les produits de cette altération peuvent même être à l'origine de la formation de nouveaux minéraux (Olson, 2004). Comme le soulignent Huot *et al.* (2015), les spécificités des matériaux parents technogènes pourraient influencer la survenue de processus pédogénétiques particuliers.

Dans leur étude sur les premières phases d'évolution pédogénétique des Technosols construits, Séré *et al.* (2010) montrent que le premier groupe de processus qui se met en place est l'altération bio-géochimique des matériaux parents technogènes sous l'influence des conditions climatiques. Cette altération est suivie de près par les processus liés aux activités biologiques (exploration racinaire des végétaux et activités faunistiques). Selon ces auteurs, les matériaux parents, et d'une façon plus large les matériaux parentaux issus de leurs mélanges, sont soumis à des modifications physiques telles que (i) le tassement, (ii) le drainage de l'eau constitutive, (iii) l'altération intense des minéraux mineurs solubles, (iv) des réactions biophysiques qui aboutissent à la formation d'agrégats. Ces différents processus aboutissent à des changements significatifs, par exemple de la macrostructure, de la rétention en eau ou des propriétés micro-structurelles. Il en résulte une différenciation d'horizons au sein des couches constitutives des Technosols. Ce phénomène dépend en partie de la nature des

³ Les facteurs de station interviennent localement et dans la continuité des premiers processus initiés par la pédogénèse climatique. Ils rassemblent toutes les conditions d'un milieu spécifique telles que le matériau parental, la géomorphologie, le relief ou encore la végétation.

matériaux constitutifs des Technosols, mais aussi, des facteurs chimiques, environnementaux et biologiques.

Rapidement après la mise en place des Technosols, il est observé un tassement des matériaux sous l'effet de l'eau (Jangorzo *et al.*, 2013 ; Watteau *et al.*, 2019). Ceci induit une diminution de l'espace poral et de la capacité de rétention en eau des matériaux. Ce tassement peut cependant être limité par l'ajout dans la couche squelette de matériaux peu sensibles à l'altération tels que du béton concassé ou des fragments de brique ou de tuile, conférant ainsi aux Technosols construits une meilleure porosité et une amélioration de la circulation des flux (eau, air, chaleur). Le tassement peut aussi être limité par le travail du sol (Badalíková, 2010) ou sous l'effet des matières organiques qui ont une capacité à agréger les constituants entre eux (Chenu *et al.*, 2000). L'infiltration des eaux pluviales peut aussi induire un entraînement des particules fines superficielles et leur accumulation vers 2 à 5 cm de profondeur (Séré *et al.*, 2008). Il en résulte une diminution progressive des fractions granulométriques les plus fines ($< 2 \mu\text{m}$) à la surface des Technosols au profit d'une augmentation des fractions plus grossières (50 – 2000 μm). Selon Cortet *et al.* (2013), ce phénomène engendre un transfert vertical des argiles au sein des profils de sol.

Comme les sols naturels, les Technosols construits sont soumis aux processus d'altération et de lixiviation des constituants solubles sous l'effet de l'infiltration de l'eau. L'action de l'eau est décrite comme l'un des facteurs clés dans la pédogénèse des Technosols (Jangorzo *et al.*, 2018). La décarbonatation est l'un des premiers processus d'altération chimique qui se met en place (Huot *et al.*, 2015). Ces auteurs mentionnent des transformations minérales telles que la formation d'oxydes de fer, de sulfates ou de minéraux argileux à partir de l'altération des phases primaires (sulfures, carbonates, minéraux argileux hérités). Ces transformations pourraient constituer des indicateurs de la pédogénèse des Technosols. L'altération des minéraux est suivie par une lixiviation des composés solubles ; l'accumulation éventuelle de carbonate de calcium par précipitation dans les couches plus profondes peut donner naissance à des horizons carbonatés (Séré *et al.*, 2010).

Deeb *et al.* (2016) ont montré que les Technosols construits sont sensibles au phénomène de gonflement et de retrait, ce qui leur confère une capacité à l'agrégation de leurs constituants. Ce comportement peut être similaire à celui de sols naturels, même dans le cas de matériaux avec de faibles teneurs en argile. La formation et la stabilité des agrégats est aussi dépendante de la nature de la matière organique présente dans les Technosols construits (Vidal-Beaudet *et al.*, 2018). Ainsi, les matières organiques immatures telles que les déchets verts présentent un potentiel d'activités microbiennes élevé par rapport aux matières

organiques matures (composts). Celles-ci sont à l'origine de cinétiques de stabilisation des agrégats plus importantes notamment en augmentant leur hydrophobie (Annabi *et al.*, 2007).

Lors de la construction des Technosols, l'intégration d'une importante quantité de matières organiques, de différentes natures et à différents stades de dégradation, favorise sa minéralisation à un stade précoce de la pédogénèse. Il en résulte des Technosols présentant une bonne fertilité, probablement due à l'inoculation de micro-organismes et au développement rapide de leur activité (Vidal-Beaudet *et al.*, 2018). D'une manière générale, la matière organique est en effet connue pour améliorer les propriétés physiques, chimiques et biologiques des sols en tant qu'hôte des communautés végétales, animales et fongiques. Elle favorise le développement d'une biomasse microbienne et la mise en place ultérieure du cycle du carbone et des éléments nutritifs (Larney & Angers, 2012).

Deeb *et al.* (2016) ont montré une corrélation positive entre la quantité de compost de déchets verts et la quantité de micro- et macropores. Ces auteurs ont notamment justifié cette corrélation par l'observation d'une augmentation systématique de la porosité dans les Technosols construits comme dans les sols naturels amendés en matière organique. L'organisation de l'espace poral est d'ailleurs étroitement corrélée à la nature et à la quantité de matière organique du Technosol construit (Grosbellet, 2008). Cette augmentation progressive des macro- et microporosités et, plus globalement, la modification de l'architecture porale sont expliquées par les activités biologiques et plus particulièrement par la colonisation racinaire. À ceci, il convient aussi d'ajouter les effets des activités faunistiques telles que celles induites notamment par les vers de terre qui modifient leur environnement en augmentant la surface porale, favorisant ainsi la circulation des flux et l'agrégation des constituants des Technosols (Deeb *et al.*, 2016). En parallèle, l'augmentation de la porosité améliore la capacité de rétention des eaux d'infiltration au sein des Technosols construits, ce qui en fait de bons supports pour la production de biomasses (Yilmaz *et al.*, 2019).

Bien que l'apport de matière organique soit préconisé pour la conception des Technosols construits en constituant notamment une réserve nutritive au cours du temps pour les végétaux (Vidal-Beaudet *et al.*, 2018), plusieurs auteurs alertent toutefois sur la nécessité d'en raisonner leur proportion dans les formulations. En effet, ces matières proviennent en partie de produits résiduaux organiques urbains. Ils peuvent renfermer une part non négligeable de contaminants et impacter ainsi défavorablement le fonctionnement des sols, voire la qualité des biomasses produites (Houot *et al.*, 2009).

Sur le plan agronomique, les auteurs des articles scientifiques relatifs aux Technosols construits n'ont pas relevé de carence ou d'excès notable en éléments majeurs et en oligo-éléments. Leur couche supérieure est caractérisée à son origine par un rapport C/N plutôt

faible et des teneurs importantes en carbone organique, azote et phosphore, lesquelles tendent à diminuer au cours du temps (Cortet *et al.*, 2013 ; Grard *et al.*, 2017 ; Séré, 2018). Ces diminutions peuvent mettre en cause la fonctionnalité des Technosols et plus particulièrement leur capacité à être des supports de biomasses sur le long terme, sans l'intervention de l'homme (par le biais de pratiques culturales appropriées telles que des apports ponctuels de matières organiques) (Séré, 2018).

L'accumulation de carbone dans le profil des Technosols est généralement rapide. Ceci a été observé durant les 15 à 20 premières années après l'installation d'une végétation spontanée sur des Technosols développés sur d'anciens sites métallurgiques (Huot *et al.*, 2013). Dans le cas de Technosols construits, ces stocks peuvent être plus élevés que ceux des sols de prairies naturelles (Dagois *et al.*, 2016). Ces auteurs ont mis en évidence l'absence d'évolution du stock de carbone dans des Technosols construits après 12 ans. Ils posent toutefois la question de la stabilité de ce stock sur le long terme. Pour Dagois *et al.* (2016), les Technosols construits sont capables de libérer des quantités importantes de phosphore et de répondre aux besoins des plantes.

La nature des Technosols construits influence tant la colonisation spontanée par des communautés de la faune du sol que l'implantation de la végétation. Certaines espèces végétales, peuvent améliorer la fertilité des Technosols construits par l'action de leurs racines (création de voies préférentielles pour la circulation des organismes) mais aussi la diversité faunistique (Vidal-Beaudet *et al.*, 2018 ; Watteau *et al.*, 2019).

Au bilan, bien qu'étant des sols jeunes, les Technosols construits présentent des caractéristiques qui attestent l'existence de processus pédogénétiques précoces. Malgré une composition bien différente de celle des sols naturels, ils présentent une évolution pédogénétique similaire à celle des sols naturels lorsqu'ils sont soumis à des facteurs environnementaux et biologiques comparables (Huot *et al.*, 2013). Optimisés au moyen de pratiques culturales adaptées (mise en place d'un couvert végétal, apport de matières organiques, rotations culturales), ces sols peuvent présenter une fertilité et un fonctionnement largement améliorés par rapport à leur état initial.

1.2.2.3. Les services écosystémiques des sols urbains et l'évaluation de leur qualité

1.2.2.3.1. Services rendus par les sols en ville, problématiques et objectifs

Plusieurs travaux attestent que les sols urbains non scellés sont à l'origine de nombreux services écosystémiques analogues à ceux de sols non remaniés, lesquels sont souvent peu pris en compte lors d'aménagements urbains (Calzolari *et al.*, 2020; Effland & Pouyat, 1997). Si ces sols ont longtemps été écartés des études pédologiques, la communauté scientifique

les a récemment intégrés à ses analyses, avec un intérêt croissant depuis le début des années 2010 (O’Riordan *et al.*, 2021). Les services écosystémiques assurés par les sols urbains s’inscrivent dans les quatre catégories établies précédemment décrites (i.e. approvisionnement, support, régulation et services culturels et archéologiques). Parmi les services d’approvisionnement, les sols urbains permettent la production de bois, de fibres et d’aliments, particulièrement avec le développement de l’agriculture urbaine. Les services de support des sols urbains comprennent le cycle des nutriments, de l’eau, les activités biologiques ou encore le soutien physique aux infrastructures construites. Il a notamment été observé des quantités extrêmes en nutriments dans certains sols urbains, particulièrement élevées dans les zones où ont été aménagés des espaces verts récréatifs ou dans les zones délaissées telles que les friches ; et de basses quantités là où les pratiques d’aménagement ont consisté à apporter des terres d’autres milieux pour combler les excavations réalisées dans le cadre de l’installation de nouveaux bâtis (Herrmann *et al.*, 2017). Les parts conséquentes en nutriments s’expliquent en partie par la mise en place de pratiques visant à incorporer d’importantes parts de matières organiques. Du fait de la grande hétérogénéité des sols urbains, le cycle de l’eau est très disparate sur le territoire : les études montrent globalement une tendance à la rétention en eau dans les sols urbains contenant une importante part de matière organique et une tendance au ruissellement dans les zones où les sols urbains imperméabilisés dominent (O’Riordan *et al.*, 2021). Ces sols supportent une biodiversité variée, témoin d’une qualité comparable à celle de sols de forêt, notamment au regard des communautés de microarthropodes (exemple de l’étude réalisée par Joimel *et al.* (2017)). Ils soutiennent de plus de nombreuses essences végétales dont la présence peut influencer l’établissement de certaines communautés de la faune du sol. Il semble toutefois que les paramètres du sol aient une influence plus importante que les communautés végétales dans l’implantation de ces organismes au sein des sols urbains (Joimel *et al.* 2019). Parmi les services de régulation qu’offrent les sols urbains, il est à noter leur capacité à modérer les inondations, filtrer les nutriments, recycler une part de déchets et de toxines, stocker le carbone ou encore limiter les émissions de gaz à effet de serre. Outre ces trois premières catégories, les services écosystémiques des sols urbains peuvent aussi s’inscrire dans la catégorie des services culturels et archéologiques, notamment lorsque ces derniers sont les témoins d’informations historiques et sociétales. Ces sols peuvent également constituer une ressource indispensable pour accéder à la nature et aux espaces verts en milieu urbain. Riddle *et al.* (2022) précisent que certains sols urbains pourraient rendre plus de services écosystémiques que d’autres sols puisqu’en complément des services assurés par ces derniers, les sols urbains supportent bon nombre d’espaces dédiés aux activités humaines (squares et parcs, voies de circulation, infrastructures, arbres d’alignements, etc.). En complément, parmi l’ensemble des services précédemment listés, les auteurs ont montré que

ces sols étaient à l'origine de services essentiels au bien-être des populations urbaines et à la résilience urbaine tels que l'atténuation des inondations, la réduction de l'effet d'îlot de chaleur urbain, la captation de la pollution atmosphérique, le support d'infrastructures, de production de biomasses (alimentaires ou non) et d'espaces récréatifs comme les espaces verts réputés pour leurs rôles sur la santé mentale et physique. Bien qu'ils soient bénéfiques au bien-être des citoyens, ces sols sont pourtant assujettis au scellement qui accompagne l'artificialisation croissante. Dès lors, leur capacité à assurer certains services s'amenuise et ces sols n'offrent plus que des fonctions limitées telles que le seul soutien aux activités humaines.

Comme pour les sols urbains, les recherches spécifiques aux Technosols construits sont récentes mais tendent à s'intensifier car de nombreuses questions se posent. Certains auteurs se sont ainsi penchés sur leurs fonctions et les services écosystémiques qu'ils rendent. Une part des travaux porte sur la conception de Technosols avec pour finalité d'assurer des services spécifiques. À titre d'exemple, ces services peuvent viser une remédiation des sols dégradés ou l'implantation d'espaces verts en ville.

Quel qu'en soit le but, la méthodologie adoptée par les acteurs concernés s'appuie sur une caractérisation des matériaux disponibles afin d'en évaluer le potentiel à rendre le ou les services écosystémiques visés (Ivashchenko *et al.*, 2019). L'agencement des matériaux parents en différentes proportions conditionne en partie les propriétés attenantes des Technosols construits et est ainsi directement corrélé aux fonctions et services écosystémiques qu'ils assureront par la suite. Plus précisément, les Technosols construits sont en capacité de répondre à une multitude de fonctions : (i) production de biomasses, alimentaires ou non (Grard *et al.*, 2017 ; Pruvost *et al.*, 2020 ; Ruiz *et al.*, 2020 ; Séré *et al.*, 2008) ; (ii) stockage et fourniture des nutriments, stockage et filtration de l'eau (Grard *et al.*, 2017 ; Ivashchenko *et al.*, 2019 ; Séré, 2018) ; (iii) rôle d'habitat pour la biodiversité (Burrow, 2015 ; Cortet *et al.*, 2013 ; Hedde *et al.*, 2019 ; Joimel *et al.*, 2022 ; Pey, 2010 ; Pruvost *et al.*, 2020 ; Vergnes *et al.*, 2017) ; (iv) plateforme des activités humaines ; (v) source de matières premières ; et (vi) puits de carbone (Ivashchenko *et al.*, 2019 ; Séré, 2018).

Le panel des services écosystémiques rendus par les Technosols construits est également très large. Notons néanmoins le service qui se démarque des autres par son caractère commun à l'ensemble des Technosols construits et qui a trait au recyclage et à la valorisation de déchets. Les études scientifiques de construction de Technosols présentées précédemment ambitionnent de réutiliser des matériaux non valorisés et disponibles localement, ceci afin de limiter les prélèvements de terres dans des territoires ruraux toujours plus éloignés du milieu urbain du fait de l'urbanisation persistante.

En outre, les Technosols construits assurent, comme les sols naturels, de nombreux services écosystémiques qu'il convient de catégoriser parmi les services de régulation, d'approvisionnement et culturels. Parmi les services de régulation, les Technosols construits sont réputés pour assurer la régulation de la qualité de l'air, du climat, la purification de l'eau ainsi que la régulation des aléas naturels, notamment à travers leur capacité à diminuer les îlots de chaleurs urbains ou à atténuer le ruissellement des eaux pluviales (Grard, 2017). En ce qui concerne les services d'approvisionnement, les Technosols sont en mesure de fournir des aliments tels que des céréales, des légumes ou des fruits. Ils sont également capables de supporter certaines formes d'élevage et sont ainsi susceptibles d'assurer un approvisionnement en viande. Ils peuvent aussi être le support de biomasses valorisables (matériaux, énergie) ou ornementales (pelouses, fleurs). Enfin, d'un point de vue culturel, les Technosols construits permettent de maintenir une part de « nature » en ville et sont, par exemple, le support d'activités sportives et de loisirs en extérieur (Damas & Coulon, 2016).

Dans la synthèse de ses travaux sur les Technosols, Séré (2018) établit un état des lieux de l'ensemble des services écosystémiques identifiés rendus par ces sols (tableau 1).

Compte tenu du caractère récent et de l'évolution rapide des Technosols, il est à noter que les fonctions et services écosystémiques initiaux pourraient changer selon l'évolution des sols et des besoins exprimés.

1.3. L'ÉVALUATION DE LA QUALITÉ DES SOLS

1.3.1. Les outils d'évaluation de la qualité existants et utilisés

À ce jour, il n'existe pas de consensus sur les indicateurs les plus pertinents pour juger de la qualité d'un sol. Néanmoins, celle-ci étant étroitement liée à la dynamique des propriétés physiques, chimiques et biologiques des sols, l'évaluation de la qualité d'un sol nécessite de sélectionner des indicateurs dans chacune de ces trois catégories de propriétés. Les indicateurs de la qualité des sols sont des outils de mesure qui reflètent la fonctionnalité des sols et permettent de déterminer si leur qualité se détériore, reste constante ou s'améliore au cours du temps (Estrada-Herrera *et al.*, 2017). Les indicateurs sont sélectionnés selon des critères spécifiques et doivent : (i) présenter une bonne corrélation avec les processus naturels de l'écosystème ; (ii) intégrer les propriétés et processus physiques, chimiques et biologiques du sol, et servir de données de base nécessaires à l'estimation des propriétés ou des fonctions du sol, ces dernières étant plus complexes à mesurer directement que les propriétés ; (iii) être relativement faciles à utiliser sur le terrain, de sorte que chacun (spécialistes et producteurs) puisse les mobiliser pour évaluer l'état de santé du sol ; (iv) être sensibles aux variations de la gestion du climat ; et (v) être les composants de la base de données pédologiques existante, dans la mesure du possible (Chaudhari *et al.*, 2020 ; Doran & Jones, 1996 ;

Doran & Parkin, 1997 ; Singer & Ewing, 2000). Ce dernier critère a pour finalité d'harmoniser les données en vue de disposer de références et de communiquer sur celles-ci.

Tableau 1 : Liste des services écosystémiques rendus par les Technosols (Séré, 2018)

Classes	Services	Catégories de services
Régulation	Régulation de la qualité de l'air	O ₃ , O ₂
		Particules fines (poussières)
		Pluies acides
	Régulation du climat	Climat local
		Climat global
		Climat d'intérieur
	Traitement des déchets	Stockage
		Recyclage
	Purification de l'eau	Dégradation des polluants
	Régulation des aléas naturels	Tempêtes
		Inondations
		Séismes, mouvements de terrains
		Erosion
Parasites et maladies		
Approvisionnement	Aliments	Céréales et légumes
		Fruits
		Viande
		Champignons
	Energie	Solaire
		Eolien
		Biomasse
		Géothermie (puits provençaux/canadiens)
	Support d'habitat pour la faune	Habitat pour la biodiversité
		Réservoir de ressources génétiques
	Support physique d'infra / superstructures	Voirie lourde
		Voirie légère
		Voirie ferrée
		Réseaux VRD
		Espaces publics (places, parcs, ...)
		Bâtiments sans fondation
	Bâtiments « légers » avec fondation	
	Bâtiments « lourds » avec fondations	
	Support d'activités humaines	Activités très sensibles (e.g. école, centre de soins)
Activités sensibles (e.g. résidentiel, agriculture)		
Activités peu sensibles (e.g. commerce, industrie)		
Ressources ornementales	Pelouses	
	Arbustes	
	Arbres	
	Fleurs	
Culturel	Conservation du patrimoine / histoire	Patrimoine / histoire / archéologie / pédagogie / symbolique / mémoire
		Activités sportives et de loisirs en extérieur
	Attrait de l'environnement	Paysage / contemporain / esthétique / aménités liées à la présence de la nature
		Tourisme
		Spirituel / culturel

1.3.1.1. Les indicateurs agronomiques

Les indicateurs agronomiques les plus couramment utilisés sur les sols agricoles sont de nature physico-chimique et comprennent le pouvoir tampon du sol, la disponibilité des nutriments pour les végétaux et les micro-organismes, la porosité totale et la macroporosité, la densité apparente, le pH, la conductivité électrique, les teneurs en carbone organique total et labile, la capacité d'échange cationique, les teneurs en azote total et minéralisé, en phosphore total, la capacité d'adsorption du phosphate et la disponibilité des micro-nutriments. Ces indicateurs donnent certes un premier aperçu de l'état de santé des sols mais sont critiqués en raison de leur faible niveau de sensibilité aux variations environnementales et ne constituent de ce fait qu'une méthode limitée pour évaluer leur degré de dégradation (Gil-Sotres *et al.*, 2005).

1.3.1.2. Les indicateurs biologiques

En tant que système vivant, le sol se distingue de la roche altérée (régolithe) essentiellement par sa biologie. Les sols naturels et agricoles abritent une diversité d'organismes qui contribuent ensemble à fournir une diversité de biens et de services (Kibblewhite *et al.*, 2008 ; Peres *et al.*, 2009). L'ensemble de ces organismes se répartit suivant différents niveaux en fonction de leur rôle au sein du système sol (Pulleman *et al.*, 2012). Trois catégories d'indicateurs fonctionnels sont différenciées, qui appartiennent aux décomposeurs, aux bio-contrôleurs ou aux ingénieurs de l'écosystème (Turbé *et al.*, 2010).

Les décomposeurs regroupent les organismes garants de la libération des nutriments (dès lors assimilables par les végétaux, les animaux ou les humains) par la décomposition de la matière organique. Les vers de terre épigés ou encore les isopodes tels que les cloportes appartiennent à ce groupe. Parmi les décomposeurs, les organismes détritivores ingèrent les litières qu'ils transforment en boulettes fécales qui se décomposent rapidement (Godet *et al.*, 2009). L'action des détritivores permet ainsi de multiplier par quatre la surface des éléments organiques nutritifs disponibles pour les micro-organismes (Hassall & Sutton, 1978 ; Souty-Grosset *et al.*, 2005).

Les bio-contrôleurs rassemblent les organismes responsables de la régulation des communautés végétales et animales par leur action de prédation à leur égard. Ils regroupent par exemple les nématodes, certains collemboles ou encore les acariens.

Les ingénieurs de l'écosystème correspondent à l'ensemble des organismes susceptibles de modifier le sol par leur action. Cette dernière catégorie est plus largement connue puisqu'elle renferme des individus observables à l'œil nu. On y retrouve notamment certains vers de terre, les termites ou encore les fourmis. Les ingénieurs de l'écosystème ont un rôle très important pour le reste des organismes de la faune du sol puisqu'ils permettent de créer

de nouveaux habitats à travers les modifications qu'ils opèrent. En creusant des galeries, les vers de terre favorisent par exemple la circulation des fluides, la formation d'agrégats et enrichissent le sol en nutriments par la production de turricules qui les concentrent (Fonte *et al.*, 2007). Ces modifications sont alors profitables à l'implantation de nouvelles communautés d'organismes.

Les classes d'organismes interagissent entre elles à différents niveaux hiérarchiques. Leurs interactions dépendent en partie des paramètres abiotiques de leur environnement hôte. Les niveaux supérieurs de cette organisation sont d'ailleurs les premiers à faciliter ou à contraindre l'activité des niveaux inférieurs.

Les individus de grande taille semblent être les plus sensibles aux variations de leur environnement (Doran & Zeiss, 2000). Il a été montré que la disparition des ingénieurs de l'écosystème, qui appartiennent majoritairement à la macrofaune, pouvait déséquilibrer l'organisation des individus des niveaux sous-jacents (Pulleman *et al.*, 2012).

Compte tenu de leur sensibilité accrue aux perturbations de leur environnement, les bioindicateurs sont préférés pour l'évaluation de la santé des sols (Igalavithana *et al.*, 2017). La prise en compte des paramètres biologiques du sol en complément des indicateurs physiques et chimiques permet ainsi de passer de l'analyse de la qualité à celle de la santé du sol. Les bioindicateurs permettent d'intégrer la notion de fertilité durable d'un système vivant en opposition à la fertilité à court terme du sol fondée sur des indicateurs abiotiques (Igalavithana *et al.*, 2017). En ce sens, l'étude de la chaîne trophique d'un sol est un moyen d'appréhender son fonctionnement global (Kibblewhite *et al.*, 2008). Les paramètres relatifs aux organismes et à la biotique du sol (abondance, diversité, structure du réseau alimentaire ou encore stabilité des communautés) répondent à la plupart des critères de sélection des indicateurs puisqu'ils sont sensibles aux pratiques de gestion des terres et au contexte pédoclimatique. De plus, ils sont bien corrélés aux fonctions bénéfiques du sol et de l'écosystème (e.g. stockage de l'eau, décomposition et cycle des nutriments, détoxification des substances toxiques et suppression des organismes nocifs pathogènes). Ces paramètres illustrent la chaîne de causes et d'effets qui relie les décisions de gestion des terres à la productivité finale et à la santé des plantes et des animaux et sont finalement compréhensibles, utiles et pour la plupart peu onéreux à contrôler pour les gestionnaires des terres (Doran & Zeiss, 2000).

Si ces indicateurs ont initialement été sélectionnés pour analyser les potentialités agronomiques des sols agricoles, ils sont également utilisés pour l'évaluation de la qualité de sols d'autres natures tels que les sols urbains ou encore les Technosols (Joimel *et al.*, 2016).

1.4. BILAN ET OBJECTIFS DE LA THESE

L'analyse bibliographique met en évidence le potentiel des Technosols construits pour répondre aux objectifs de résilience des écosystèmes urbains et périurbains et souligne leur intérêt pour une production maraîchère.

La thèse s'inscrit dans la continuité des recherches menées plus particulièrement en France sur la conception et l'évaluation du fonctionnement des Technosols construits. Il s'agit de concevoir et d'évaluer des Technosols fonctionnels et fertiles à partir de matériaux, de déchets et de sous-produits urbains pour un usage en micro-maraîchage bio-intensif. Le travail porte sur quatre objectifs : (i) l'élaboration des Technosols construits, (ii) l'évaluation de leur fertilité, (iii) l'observation de leur acceptabilité au regard d'organismes de la faune susceptibles d'en améliorer la fertilité et (iv) la détermination du rôle du génie écologique dans l'amélioration de leur fertilité. Au travers de ces objectifs, il vise à répondre aux interrogations suivantes :

- les Technosols élaborés sont-ils capables de produire de la biomasse à vocation alimentaire répondant aux attentes en termes de biomasses produites et de risques sanitaires ?
- la fonctionnalité de ces sols artificiels est-elle durable dans la mesure où : (a) ils sont sujets à une pédogénèse précoce susceptible d'engendrer une perte de fertilité au cours du temps, (b) ils pourraient être colonisés par des organismes capables de contribuer aux cycles biochimiques des nutriments.

Différentes hypothèses sont émises en fonction des objectifs et questions de recherche. Pour l'**objectif d'élaboration des Technosols construits**, il est supposé qu'il est possible de construire un Technosol, avec des matériaux disponibles localement dans le contexte de la thèse, dont les propriétés se rapprochent de valeurs optimales préalablement définies. Pour l'**objectif d'évaluation de la fertilité des Technosols construits**, il est envisagé que ce Technosol construit assure un niveau de fonction comparable à un sol maraîcher (cultivé en micro-maraîchage bio-intensif) avec (a) une pédogénèse précoce faisant évoluer ses propriétés au cours du temps, et (b) une fonction de production de biomasse qui répond aux attentes de cultures professionnelles en micro-maraîchage bio-intensif, d'un point de vue quantitatif et qualitatif. Pour l'**objectif d'observation de l'acceptabilité des Technosols construits** au regard de différents organismes de la faune susceptibles d'en améliorer la fertilité, il est supposé que (a) les Technosols construits assurent une fonction d'habitat comparable à celle d'un sol maraîcher naturel cultivé en micro-maraîchage bio-intensif, et (b) les Technosols construits seraient colonisés spontanément par des organismes vivants. Pour l'**objectif de compréhension du rôle du génie écologique** dans l'amélioration de la fertilité

des Technosols construits, il est présumé une augmentation du niveau de fonctions rendues par une inoculation volontaire des Technosols construits.

La démarche porte sur l'identification et la sélection de différents matériaux puis à leur mise en mélange, dans différentes proportions et selon leurs caractéristiques, en se référant à des sols reconnus pour leur forte potentialité en culture maraîchère. La capacité des Technosols élaborés comme support de production a fait l'objet d'un suivi temporel à travers la détermination de divers indicateurs physiques, chimiques et biologiques. L'approche a été complétée par l'introduction d'un organisme modèle (*Lumbricus terrestris*) réputé pour son action bénéfique sur la fertilité des Technosols construits. Outre les paramètres agronomiques et la production végétale, ont été suivis des organismes de la faune du sol représentatifs de différentes catégories écologiques et connus pour leurs rôles de bioindicateur de la qualité des sols. La figure 3 résume la démarche réalisée au laboratoire et en serre. Chaque chapitre a été organisé de manière à présenter la méthodologie adoptée, suivie d'une analyse approfondie des résultats et de leurs discussion et interprétation.

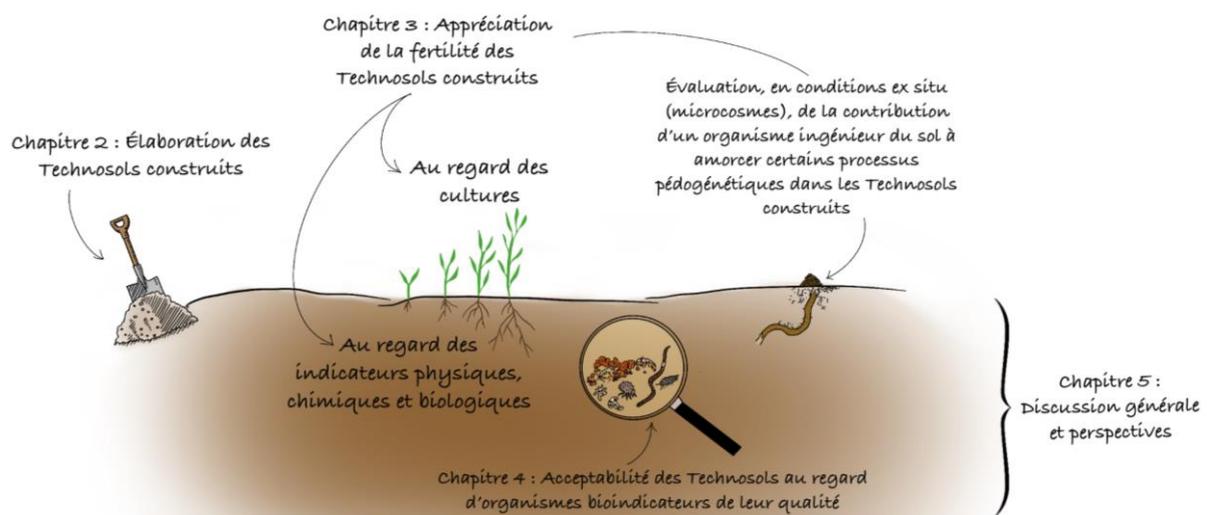


Figure 3 : Structure du travail de recherche

CHAPITRE 2 : ÉLABORATION ET CARACTERISATION DES TECHNOSOLS CONSTRUITS ETUDIES

L'analyse bibliographique a montré que les Technosols construits correspondent le plus souvent à une superposition de couches élaborées à partir de matériaux, mélangés ou non, de diverses natures et dans lesquelles les matériaux organiques peuvent représenter une part importante. Ces couches sont définies pour assurer des fonctions spécifiques telles que la fourniture d'eau et d'éléments nutritifs, la portance et le drainage. Au regard des sols naturels, la pédogénèse des Technosols est connue pour être plus rapide tout en atténuant au cours du temps les effets induits par les artefacts qu'ils renferment (Huot *et al.*, 2015 ; Rokia *et al.*, 2014 ; Rossiter, 2007 ; Séré *et al.*, 2010 ; Watteau *et al.*, 2018).

À ce jour, de nombreuses questions demeurent sur les fonctions et services écosystémiques rendus à long terme par les Technosols construits. De plus, il a été souligné l'intérêt de ces sols pour une production de biomasses alimentaires ou non.

L'objectif de ce chapitre est de présenter la méthodologie d'élaboration des Technosols pour un usage en maraîchage bio-intensif et de vérifier l'hypothèse selon laquelle il est possible de construire un Technosol avec des matériaux disponibles localement, dont les propriétés se rapprochent de valeurs optimales préalablement définies. La démarche a regroupé les approches des trois méthodes d'élaboration des Technosols construits décrites dans la littérature (i.e. « empirique », « optimisation des propriétés » et « sol de référence »). Elle s'est appuyée sur les caractéristiques et connaissances de sols naturels régionaux réputés pour leurs fortes potentialités agronomiques. L'élaboration des Technosols a reposé sur l'assemblage de matériaux d'origines naturelle et anthropique largement disponibles auprès du réseau partenaire de ce projet de thèse. Est décrite ci-dessous la démarche mise en place pour construire et caractériser la potentialité agronomique de ces Technosols.

La conception des Technosols a nécessité : (i) de déterminer les plantes maraîchères d'intérêt et leurs exigences agronomiques ; (ii) d'identifier les paramètres renseignant sur la fertilité des sols et d'établir/synthétiser leurs gammes de valeurs en contexte de culture maraîchère, ceci en vue de disposer de références ; (iii) de définir – sur la base des matériaux mis à disposition par les différents partenaires de Veolia – les critères de sélection des matériaux susceptibles d'être mis en œuvre ; (iv) d'inventorier les matériaux répondant aux critères retenus ; (v) de caractériser ces matériaux pour vérifier leur intérêt ; (vi) de sélectionner les matériaux en adéquation avec les objectifs fixés ; (vii) d'élaborer une méthode pour constituer, à partir de ces matériaux parents, les Technosols à étudier.

Cette construction a reposé sur le mélange dans des proportions variables de matériaux parents en vue d’obtenir un support de cultures approprié. Le caractère opérationnel de la démarche proposée a nécessité d’intégrer des aspects technico-économiques. Après leur élaboration, les Technosols ont été mis en place et un couvert végétal a été semé afin d’initier de premiers processus pédogénétiques. La figure 4 présente l’articulation entre les différentes étapes de la méthodologie mise en œuvre.

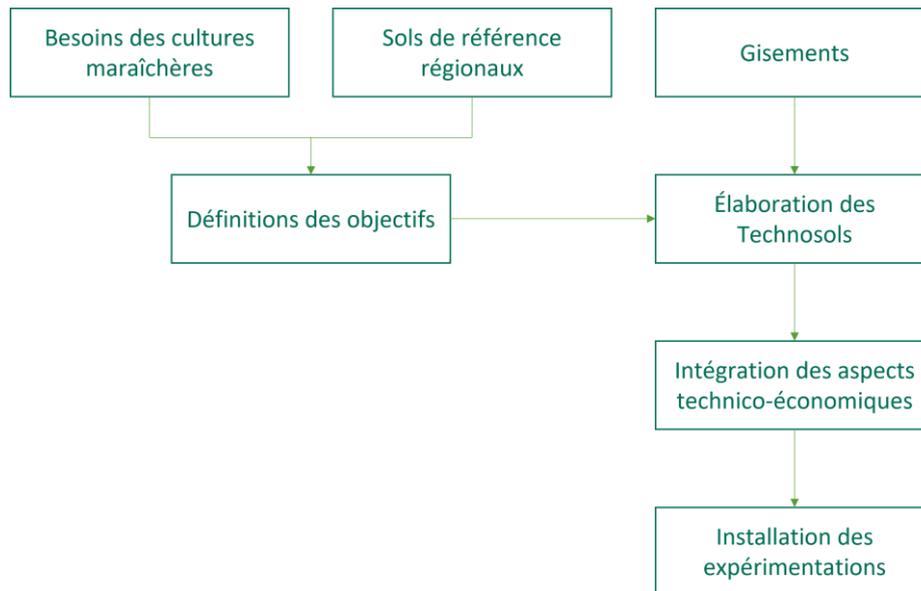


Figure 4 : Logigramme présentant la démarche adoptée pour aboutir à l’élaboration des Technosols

2.1. IDENTIFICATION ET CARACTERISATION DES BESOINS EN CULTURES MARAICHÈRES

2.1.1. Exigences des cultures maraîchères

La démarche a été initiée par la détermination des exigences agronomiques des principales cultures produites en micro-maraîchage bio-intensif et susceptibles d’être cultivées dans des fermes urbaines. Ce choix s’appuie principalement sur la volonté de Veolia de proposer des modèles de fermes urbaines fonctionnelles et rentables à déployer rapidement et aisément sur le territoire ; il repose également sur leurs récentes expertises qui témoignent de l’efficacité (tant productive qu’économique) de ce modèle de production. Parmi les exigences des végétaux d’intérêt cultivés en maraîchage bio-intensif, il est à noter celles en relation avec le potentiel de prospection par les racines (profondeur du sol, charge en éléments grossiers, présence d’obstacles physiques ou chimiques), sa texture, sa structure, sa capacité à retenir l’eau, à faciliter la circulation des fluides (eau, air) et à subvenir à la nutrition minérale des plantes. Des gammes de valeurs des paramètres agronomiques essentiels au développement des cultures ont ainsi été définies sur la base de divers documents techniques et guides agronomiques. Dans la mesure où ce travail vise à développer des fermes urbaines sur le territoire français métropolitain, l’analyse documentaire s’est

majoritairement appuyée sur des documents nationaux. Plus précisément, ont été examinés la profondeur d'enracinement des principales cultures (Verhallen & Roddy, 2002), la texture, la matière organique, les plages de pH optimales pour leur milieu de croissance ainsi que leurs besoins en éléments nutritifs (*Annexes de l'arrêté GREN, 2016 ; Bouvier & Jammes, 2012 ; Duzan, 2010*).

2.1.1.1. L'enracinement

Les productions potagères présentent le plus souvent un enracinement inférieur à 60 cm voire même un enracinement de moins de 30 cm (tableau 2). Si l'enracinement profond a pour objectif d'ancrer la plante mais aussi d'assurer ses besoins en eau, en maraîchage, ces derniers devraient être couverts par des pratiques culturales qui intègrent une irrigation régulière. Au regard des productions maraîchères projetées par Veolia (e.g. aubergine, carotte, céleri-rave, mâche, mesclun, navet, roquette, tomate), une profondeur de 60 cm constitue un compromis satisfaisant.

Tableau 2 : Classement des cultures maraîchères en fonction de leur profondeur d'enracinement (Verhallen & Roddy, 2002)

Enracinement superficiel (jusqu'à 30 cm)	Enracinement intermédiaire (entre 30 et 60 cm)	Enracinement profond (supérieur à 60 cm)
Céleri Laitue Oignon Pomme de terre Radis	Brocoli Carotte Chou Chou-fleur Concombre Haricot Melon Poivron Tomate	Asperge Citrouille Courge d'hiver Maïs sucré Melon d'eau Panais

2.1.1.2. La texture du sol

D'une façon générale, les sables et les limons grossiers favorisent la réalisation des itinéraires techniques culturaux en maraîchage. Les sols sableux, considérés comme des sols légers (en opposition aux sols lourds argileux et froids), sont en effet moins sujets au tassement ou à la compaction par les machines agricoles. Ils se réchauffent plus rapidement au printemps et présentent une perméabilité et une aération favorables à la culture de légumes. Leur porosité confère aussi une bonne capacité d'enracinement aux cultures (de Carné-Caravalet, 2021 ; Gobat *et al.*, 2013). Ces sols sont toutefois plus sensibles à l'érosion, ont une réserve hydrique amoindrie et présentent une capacité de fixation des cations limitée (Girard *et al.*, 2011). Notons que, dans un but d'optimisation, les Technosols construits doivent être irrigués et que les légumes ne doivent, de ce fait, pas souffrir d'un déficit hydrique.

2.1.1.3. Les matières organiques

Les matières organiques (MO) sont essentielles au développement des cultures maraîchères. Selon leurs composition et degré de maturité, les MO assurent effectivement

différents rôles. Les MO fraîches (e.g. résidus de culture, couverts végétaux) ont un rôle énergisant puisqu'elles permettent de stimuler l'activité biologique des organismes du sol, lesquels participent en partie à la minéralisation et à la solubilisation des nutriments nécessaires aux cultures. Il a été montré que les résidus cultureux favorisent le développement de populations fongiques et de protozoaires et accroissent le potentiel des communautés microbiennes à exploiter les différentes sources de carbone disponibles (Schutter *et al.*, 2001). Les MO plus matures (e.g. composts) sont plus pauvres en énergie, mais permettent d'améliorer la structure physique du sol ainsi que sa teneur globale en matière organique. L'humus, qui correspond à la couche naturelle organique située à la surface du sol, joue, quant à lui, un rôle dans la stabilisation de la structure du sol en favorisant la formation du complexe argilo-humique au moyen des charges négatives des micelles d'humus en association aux charges négatives des argiles minéralogiques notamment par l'intermédiaire des cations Ca^{2+} . Ces liaisons sont les plus stables du complexe argilo-humique et permettent aux agrégats formés de résister à la dégradation par l'action de l'eau, mais aussi à la minéralisation de l'humus. Ce complexe constitue notamment la réserve de nutriments disponibles pour satisfaire les besoins des cultures. Il peut être enrichi au cours des itinéraires cultureux grâce à la mise en place de pratiques inhérentes au micro-maraîchage bio-intensif qui visent en partie à restituer au sol les résidus cultureux et permettent de réapprovisionner cette réserve une fois les nutriments prélevés par les cultures (Coleman, 1995 ; Fortier & Waridel, 2016).

Pour améliorer la fertilité d'un sol, il peut ainsi être recommandé de procéder à l'apport d'amendements organiques. Ces derniers sont définis comme les matières composées principalement de combinaisons carbonées d'origines végétales ou animales et végétales en mélange et qui sont destinées à l'entretien ou à la reconstitution du stock de matière organique du sol (NF U 44-051). Par leurs différents degrés de maturité et leur variabilité de composition, les amendements organiques permettent d'équilibrer les apports en nutriments et de modérer le risque de carences liées à l'introduction d'une part trop importante en un nutriment spécifique au détriment d'autres (Rosen & Bierman, 2005).

Trois classes d'exigence ont été établies en fonction des besoins en éléments nutritifs des plantes maraîchères (tableau 3).

Tableau 3 : Classement des cultures maraîchères en fonction de leurs besoins en éléments nutritifs (d'après Bouvier & Jammes, 2012 ; Duzan, 2010)

	Espèces	N (kg ha ⁻¹)	P ₂ O ₅ (kg ha ⁻¹)	K ₂ O (kg ha ⁻¹)	MgO (kg ha ⁻¹)
Cultures exigeantes	Artichaut, aubergine, betterave rouge, blette, concombre, persil, tomate	150 à 400	80 à 200	200 à 600	30 à 80
Cultures aux besoins modérés	Épinard, melon, navet, poireau, pomme de terre	80 à 150	50 à 100	100 à 300	10 à 30
Cultures peu exigeantes	Ciboulette, mâche, radis, topinambour	30 à 80	20 à 80	50 à 150	10 à 20

N, azote total, P₂O₅, phosphore total, K₂O, potassium, MgO, Magnésium

2.1.1.4. Le pH du sol

La solubilité et la biodisponibilité des nutriments pour les cultures maraîchères sont influencées par le pH du sol (Liu & Hanlon, 2012). Celui-ci conditionne également l'activité microbienne qui peut indirectement avoir une incidence (positive ou négative) sur les nutriments disponibles pour les productions légumières.

Au regard de la littérature, les plages de pH optimales des sols maraîchers oscillent entre 5,6 et 7,5. Elles varient selon les espèces, avec toutefois, une majorité des cultures légumières qui s'accommode de pH légèrement acides à neutres (6,5 à 7,5) (Duzan, 2010 ; Annexe 1).

2.1.2. Caractéristiques de sols régionaux réputés pour leur fertilité

Pour compléter la première approche liée à la caractérisation des besoins des cultures et dans l'optique de tendre vers les caractéristiques d'un sol voué à la production maraîchère bio-intensive, la démarche a été poursuivie par l'identification de sols caractérisés par leurs bonnes potentialités agronomiques.

Les paramètres considérés pour renseigner sur le potentiel agronomique ont été la granulométrie, le pH, les teneurs en calcaire total, en matières organiques et en phosphore assimilable, le rapport C/N, la capacité d'échange cationique (CEC) et les teneurs en cations échangeables (Ca²⁺, K⁺, Mg²⁺, Na⁺). La granulométrie permet notamment de déduire certaines tendances physiques du sol telles que sa capacité à favoriser la circulation des fluides, la pénétration des racines ou encore sa facilité de travail. À titre d'exemple, un sol sableux aura tendance à présenter une faible CEC et sera très souvent apparenté à un substrat avec une faible réserve nutritive (de Paul Obade & Lal, 2016). En revanche, il présentera une facilité de travail et se réchauffera rapidement. Le rapport C/N renseigne sur la capacité d'un sol à dégrader les matières organiques. L'analyse du pH traduit indirectement la faculté du sol à fournir les éléments nutritifs aux végétaux qu'il supporte. En complément, la détermination

du phosphore assimilable et des cations échangeables informe sur la réserve en éléments nutritifs disponibles pour les végétaux (Baize, 2018).

Bien que d'autres paramètres, tels que la charge en éléments grossiers, l'épaisseur du sol, sa porosité ou les activités biologiques, jouent un rôle déterminant en maraîchage, ceux-ci sont rarement renseignés dans les bases de données ou les guides cultureux (Cardoso *et al.*, 2013 ; Stone *et al.*, 2016).

À la demande de Veolia, ont été privilégiés des sols régionaux pour tenir compte du contexte climatique à considérer lors de la mise en place et du déroulement des expérimentations. Ces sols de référence ont été identifiés, à dire d'experts, pour leur facilité de travail et leur utilisation en maraîchage ou en production de légumes de plein champ. La démarche a été complétée par une analyse de rapports d'études et d'articles scientifiques faisant état des paramètres physico-chimiques de ces sols. Ce travail bibliographique et d'échange avec des experts a permis la centralisation de données et paramètres caractéristiques des sols considérés. Ce socle de données a ainsi constitué l'objectif agronomique à atteindre ainsi qu'une base de données qui a permis de discuter les résultats obtenus.

Ont été retenus les sols du Marais audomarois et les sols lœssiques (BRUNISOLS limoneux profonds non hydromorphes), largement présents dans les départements du Nord et du Pas de Calais (tableau 4). Le sol de la ferme urbaine pilote de Veolia a également été considéré comme une référence dans le présent travail. La ferme se situe dans la commune de Lomme, à 6 km de la ville de Lille et pratique le micro-maraîchage bio-intensif depuis 2018. Cette prise en compte répondait au souhait de Veolia de disposer de Technosols construits présentant des potentialités agronomiques comparables à celles du sol de leur ferme. Ce sol a constitué, de ce fait, l'un des témoins dans le présent travail.

Tableau 4 : Synthèse des sols locaux retenus pour leurs capacités productives et présentation de leur localisation et des appuis bibliographiques utilisés

Sols	Localisation	Bibliographie associée
Sols du marais Audomarois	Pays de Saint Omer (62)	Fourrier <i>et al.</i> (2014) Fourrier <i>et al.</i> (2016) Servant (1971) Servant et Barthès (1973)
Sols issus de lœss	Départements du Nord et du Pas de Calais (59 – 62)	Steckerman <i>et al.</i> (2002)
Sol de la ferme expérimentale pilote cultivée par les équipes de Veolia	Marché de Gros (MIN/ZAMIN) de Lille – Lomme (59)	Bourguignon (2018)

2.1.2.1. Les sols du Marais audomarois

Le Marais audomarois s'étend entre Watten et Saint-Omer et correspond à une zone basse comblée d'alluvions fluviales. De texture à dominante limoneuse, les sols du marais présentent de nombreuses intercalations tourbeuses. Les sols développés sur ces alluvions sont carbonatés et présentent des horizons supérieurs fortement organiques

(Fourrier *et al.*, 2014, 2016). L'assainissement de cette zone humide par un réseau dense de canaux et de fossés a permis le développement d'un maraîchage intensif. Le Marais audomarois est aujourd'hui connu pour ses cultures de choux et choux-fleurs.

Pour s'affranchir des effets de l'anthropisation récente et des pratiques culturales intensives des sols du Marais audomarois, la présente démarche s'est référée aux travaux menés au début des années 1970 par l'INRA (Servant, 1971 ; Servant & Barthès, 1973). Les horizons organo-minéraux de surface de ces sols présentaient une texture limoneuse à limono-argileuse, des teneurs élevées en matière organique et un pH légèrement alcalin. De plus, ils présentaient des teneurs en calcaire total élevées (CaCO_3 ; tableau 5). Celles-ci ont notamment été expliquées par la présence de nombreux débris de coquilles de gastéropodes pour lesquels le CaCO_3 est agronomiquement peu actif. Ces résidus coquilliers ont par ailleurs été à l'origine d'une surestimation des teneurs en sables (granulométrie sans décarbonation). Enfin, les teneurs en phosphore assimilable (P_2O_5) étaient très élevées et oscillaient entre 0,4 et 1,5 g kg^{-1} .

Tableau 5 : Paramètres agronomiques des horizons labourés des sols du Marais audomarois (Servant, 1971), des sols régionaux développés sur lœss (Steckerman *et al.*, 2002), du sol de la ferme cultivée par Veolia (d'après Bourguignon, 2018) et valeurs optimales de ces paramètres pour un usage en maraîchage

Paramètres	Sols du Marais Audomarois	Limons profonds issus de lœss	Sol de la ferme de Veolia	Valeurs optimales pour un usage en maraîchage
	Valeurs moyennes			
Argile (< 2 μm) (%)	26	19	23	25
Limons fins (2 - 20 μm) (%)	64	25	69	23
Limons grossiers (20 - 50 μm) (%)		46		42
Sables fins (50 - 200 μm) (%)	10	9	8	9
Sables grossiers (200 - 2000 μm) (%)		1		1
pH eau	8	7,6	7,4	6,5 – 7,5
CaCO_3 total (%)	22,5	0,5	nd	nd
MO (%)	5,1	2,3	7,9	5
C/N	nd	nd	11,7	9 – 12
P_2O_5 assimilable (g kg^{-1})	nd	0,28	0,15	> 0,15
CEC ($\text{cmol}^+ \text{kg}^{-1}$)	21,5	11,1	25,4	> 20
K_2O (g kg^{-1})	nd	nd	nd	> 0,16
MgO (g kg^{-1})	nd	nd	nd	0,22 – 0,52
CaO (g kg^{-1})	nd	nd	nd	2,5 – 4,38

MO : matière organique ; P_2O_5 : phosphore ; CEC : capacité d'échange cationique ; nd : non déterminé

2.1.2.2. Les limons profonds des plateaux lœssiques

Dans les départements du Nord et du Pas de Calais, les sols issus de lœss sont de texture limoneuse, limono-sableuse ou limono-argileuse et sont voués majoritairement aux grandes cultures. Toutefois la production légumière (e.g. endive, légumes à cosse, betterave

potagère, épinard, poireau) sur ces sols représente une part non négligeable⁴. Les données agronomiques retenues sont issues du Référentiel Pédo-Géochimique du Nord – Pas de Calais (Steckerman *et al.*, 2002). Ces sols présentent un taux de matière organique modéré avec une valeur moyenne de 2,3 % (les teneurs minimales souhaitables pour des sols à dominante limoneuse se situant entre 1,8 et 2 % de MO). Leur CEC est de 11,1 cmol+ kg⁻¹ et traduit une réserve moyenne en cations facilement disponible pour assurer la croissance des végétaux. Leur teneur moyenne en P₂O₅ est de 0,28 g kg⁻¹ et suffit à couvrir les besoins des cultures les plus exigeantes qui peuvent s'élever à 200 kg de P₂O₅ par hectare (tableau 3 ; Annexe 1).

2.1.2.3. La ferme urbaine de Lomme

Les principaux paramètres physico-chimiques de la ferme urbaine expérimentale pilote de Veolia ont été mesurés la première année après sa mise en place (2018). Ceux-ci ont fait l'objet d'analyses complémentaires au laboratoire pour tenir compte des évolutions de ce sol depuis la mise en place de pratiques inhérentes au micro-maraîchage bio-intensif. Les valeurs des paramètres sont synthétisées dans le tableau 5. Il s'agit d'un sol limono-argileux, à pH neutre. Il présente une teneur élevée en matière organique (7,9 %), avec une CEC de 25,4 cmol+ kg⁻¹ illustrant une bonne réserve nutritive pour le développement des végétaux et une teneur satisfaisante en P₂O₅ assimilable de 0,15 g kg⁻¹.

L'ensemble des données recueillies a permis de définir les valeurs ou les gammes de valeurs optimales des paramètres physico-chimiques des formulations organo-minérales à concevoir. Ces données ont ensuite été confrontées à celles renseignées par différents guides d'interprétation de l'état de fertilité des sols (Jobbé-Duval, 2017 ; Jutras, 2011) et ajustées, si nécessaire, à dire d'experts. La dernière colonne du tableau 5 présente les valeurs retenues pour l'élaboration des couches de croissance de surface des Technosols (formulations organo-minérales) à savoir, un pH compris entre 6,5 et 7,5 (jugé optimal pour la majorité des cultures maraîchères), un rapport C/N compris entre 9 et 12 (reflétant une bonne capacité de minéralisation de la matière organique) et une CEC supérieure à 20 cmol+ kg⁻¹ (indicateur d'une relative facilité du sol à retenir et échanger les cations). La part des matériaux parents à incorporer dans les formulations a donc été raisonnée, selon leurs propriétés, pour approcher ces valeurs ou s'inscrire dans les gammes de valeurs retenues.

La texture des Technosols construits à des fins maraîchères est peu renseignée dans la littérature. Ceci peut s'expliquer par le fait que cette caractéristique est intrinsèque aux matériaux parents assemblés. Comme la texture du sol joue un rôle primordial dans sa fonction de support de culture, ce critère a été privilégié dans la définition des formulations à

⁴ <https://draaf.hauts-de-france.agriculture.gouv.fr/DONNEES>

élaborer. De plus, s'est posée la question des argiles minéralogiques (en termes de nature et de part) à introduire dans les formulations de façon à favoriser, par des processus de gonflement et de retrait, la structuration des matériaux assemblés et aussi, à accroître la capacité d'absorption du complexe argilo-humique. À titre d'exemple, les minéraux argileux présents dans les lœss, qui constituent le matériau parental dominant des sols du Nord et du Pas de Calais, sont la smectite, la vermiculite, la kaolinite et une faible proportion d'illite et de chlorite (Muñoz-Castelblanco, 2011). Il a été décidé que les argiles minéralogiques devaient représenter 80 % (en masse) de la teneur en argile dans les formulations (Gobat *et al.*, 2013).

2.2. IDENTIFICATION DES GISEMENTS DE MATERIAUX D'INTERET

Si le premier volet du travail a consisté à caractériser les sols locaux aux forts potentiels agronomiques, la seconde partie a reposé sur l'identification de gisements de matériaux d'intérêt pour la constitution des Technosols. Sont décrites dans les prochains paragraphes les différentes phases de la démarche.

2.2.1. Présélection des matériaux parents

Cette étape a nécessité de : (i) définir les critères de sélection des matériaux parents ; (ii) d'évaluer leur gisement en utilisant les possibilités offertes par le réseau partenarial de Veolia et (iii) de caractériser les paramètres physico-chimiques des matériaux présélectionnés (cf. figure 4). La pertinence des matériaux ainsi identifiés a été analysée au regard de leurs caractéristiques, de leurs avantages et inconvénients, mais aussi du rôle qu'ils pourraient jouer dans les formulations résultant de mélanges des matériaux parents.

2.2.2. Inventaire et sélection des matériaux parents

Les critères retenus pour identifier les matériaux parents susceptibles de répondre aux objectifs ont été : (i) leurs disponibilités locale et nationale (auprès des fournisseurs du réseau partenarial de Veolia) ; (ii) la pérennité de leur approvisionnement en quantité et en qualité ; (iii) leurs teneurs en polluants organiques et inorganiques inférieures aux seuils définis par la réglementation en vigueur (normes NF U 44-051 et NF U 44-551) ; et (iv) des coûts d'achat acceptables.

Pour répondre à ce dernier critère, la démarche a privilégié l'utilisation de déchets et de sous-produits. Ce choix s'explique aussi par le souhait de s'inscrire, dans la mesure du possible, dans le cadre de l'économie circulaire. Les réflexions n'ont toutefois pas exclu la possibilité d'incorporer des matériaux issus de ressources naturelles selon leur intérêt pour les formulations élaborées. Ce choix repose sur un objectif de genericité pour l'élaboration des Technosols de manière à pouvoir les répliquer dans l'ensemble du territoire métropolitain.

Les paragraphes et tableaux 6 et 7 présentent les matériaux identifiés au regard des critères de sélection définis précédemment, leurs caractéristiques, avantages et inconvénients. Ont été discernées deux catégories de matériaux qui correspondent aux matériaux minéraux et organiques. Leur pertinence au regard des objectifs visés a été analysée. Ainsi, outre leurs caractéristiques physico-chimiques, il s'est avéré nécessaire de considérer leur degré éventuel de contamination, la pérennité de leur approvisionnement, mais également leur coût.

2.2.2.1. Matériaux minéraux

Les matériaux identifiés sont disponibles sous différentes natures et granulométries. Ils correspondent à des matériaux valorisés en BTP ou à des sous-produits d'un intérêt moindre pour cet usage. Les choix ont porté sur des matériaux issus de l'exploitation de carrières (matériaux de découverte, sablons, sables, bentonite, marnes et caillasses, calcaires jurassiques du Boulonnais, calcaires carbonifères de Tournai, calcaires lacustres éocènes), de terrils miniers, de la démolition de bâtiments ou de matériaux déclassés. Le tableau 6 liste ces matériaux et dresse un bilan de leurs caractéristiques. Il renseigne aussi sur leur intérêt au regard des objectifs visés. La terminologie utilisée est celle des fournisseurs et partenaires de Veolia.

Parmi l'ensemble des matériaux listés, ont d'ores et déjà été exclus des réflexions :

- La terre végétale ainsi que les limons argileux et sablonneux pour leur caractère naturel ou leurs faibles disponibilités quantitatives ;
- Le mélange béton-brique et les fines de dépoussiérage de ces matériaux pour leur hétérogénéité, leurs contaminations possibles en polluants métalliques et/ou organiques et une disponibilité limitée ;
- Les schistes rouges miniers pour l'absence de pérennité de l'approvisionnement ;
- Les marnes et caillasses pour les coûts de criblage en vue d'éliminer les pierres et blocs ;
- Le sablon drainant puisqu'il s'apparente au sablon compactable produit en plus grande quantité dans les carrières gérées par les partenaires de Veolia.

À l'issue de cette phase d'identification des gisements, ont donc été retenus le sablon compactable, les sables, le calcaire broyé, les sables calcaires, le filler, les briques concassées (ces dernières ont également été sélectionnées par Deeb *et al.*, 2019 ; Deeb *et al.*, 2020 ; Gard, 2017 ; Rokia *et al.*, 2014 ; Ulrich *et al.*, 2021 ; Vidal-Beaudet *et al.*, 2018 ; Yilmaz *et al.*, 2018) et la bentonite (également retenue et/ou étudiée par Asensio *et al.*, 2019 ; Barredo *et al.*, 2020 ; Epelde *et al.*, 2019 ; Fernández *et al.*, 2016 ; Luna-Ramos *et al.*, 2019 et Paradelo &

Barral, 2013). La bentonite se différencie des autres matériaux par sa richesse en smectites (de l'ordre de 75 % de son cortège argileux selon les informations renseignées par le fournisseur), son rôle potentiel dans l'agrégation et la structuration des formulations ainsi que sa contribution à la constitution du complexe argilo-humique pour les formulations comportant un apport de matières organiques. Les argiles granulométriques, apportées par les autres matériaux, représentent un intérêt moindre ; elles sont constituées principalement de quartz et de feldspaths.

Tableau 6 : Avantages et inconvénients des matières minérales identifiées pour élaborer un horizon de croissance

	Avantages	Inconvénients	Fournisseurs
Matériaux issus de l'exploitation de carrières			
Terre végétale	Horizons organo-minéraux des sols développés sur les matériaux de découverte de carrière	Sol naturel ne correspondant pas aux critères de sélection des matériaux parents	REP – Veolia (Bouqueval 95)
Limon argileux et limon sablonneux	Matériaux inertes issus de l'exploitation de carrières	Disponibilité en quantité limitée et pouvant faire l'objet de valorisations	REP – Veolia (Bouqueval 95)
Sablon compactable (0-1 mm)	Homogénéité et granulométrie constante ; peut contribuer à améliorer la porosité et la perméabilité	Matériau faisant l'objet de valorisation commerciale, ne s'inscrivant pas dans le cadre de l'économie circulaire	REP – Veolia (Bouqueval 95)
Sablon drainant (0-1 mm)	Homogénéité et granulométrie constante ; peut contribuer à améliorer la porosité et la perméabilité	Matériau ne s'inscrivant pas dans le cadre de l'économie circulaire	REP – Veolia (Bouqueval 95)
Sables (0-6,3 mm)	Contribution possible à l'amélioration de la porosité et de la perméabilité	Matériau ne s'inscrivant pas dans le cadre de l'économie circulaire	REP – Veolia (Bouqueval 95)
Bentonite	Très forte proportion de smectites ; contribution à la structuration des formulations et à la CEC	Matériau ne s'inscrivant pas dans le cadre de l'économie circulaire ; coût élevé	Lafaure (Mazeyrolles 24)
Marnes et caillasses	Forte charge en éléments grossiers, pierres et blocs ; contribution à l'amélioration de la portance, de la porosité et de la perméabilité	Présence de pierres et blocs incompatible avec un usage en maraîchage sans un épierrement préalable	REP – Veolia (Bouqueval 95)
Calcaire broyé (0-10 mm)	Homogénéité et granulométrie constante ; contribution à la portance, la porosité et la perméabilité	Matériau ne s'inscrivant pas dans le cadre de l'économie circulaire ; présence d'éléments grossiers ; coût élevé	RMN – PréferNord (Fretin 59)
Sables calcaires (0-2 mm)	Homogénéité et granulométrie constante ; contribution à la portance, la porosité et la perméabilité	Matériau ne s'inscrivant pas dans le cadre de l'économie circulaire ; présence d'éléments grossiers ; coût élevé	Carrières de Stinkal – Eiffage (Ferques 62)
Filler défillérisation ⁵ (0-1 mm)	Homogénéité et granulométrie constante ; disponibilité en quantité ; statut de déchet au sens de la réglementation	Matériau d'intérêt industriel croissant	Carrières de Stinkal – Eiffage (Ferques 62)
Matériaux issus de l'exploitation de schistes miniers			
Schistes rouges miniers (0-6 mm)	Contribution à l'amélioration de la portance, la porosité et la perméabilité ; disponible en différentes granulométries	Résistance à un écrasement modérée à moyen terme ; contamination possible ; disponibilité non pérenne et liée à l'exploitation des terrils	RMN – PréferNord (Fretin 59)

⁵Fraction fine obtenue par filtration lors du process de production de calcaire broyé

Tableau 6 : suite

	Avantages	Inconvénients	Fournisseurs
Matériaux issus de la démolition			
Mélange de fragments de béton et brique (0-6 mm)	Contribution à l'amélioration de la portance, la porosité et la perméabilité ; une microporosité favorable aux micro-organismes ; riche en CaCO ₃ ; disponible en différentes granulométries selon le broyage	Hétérogénéité ; contamination possible en cas de recyclage de déchets de démolition ; disponibilité limitée	RMN – PréferNord (Fretin 59)
Fines de dépoussiérage de béton et briques	Granulométrie fine favorable à l'altération du matériau	Hétérogénéité ; contamination possible ; disponibilité limitée	RMN – PréferNord (Fretin 59)
Matériau issu de briques déclassées			
Briques concassées (0-3 mm)	Contribution à l'amélioration de la portance, la porosité et la perméabilité ; une microporosité favorable aux micro-organismes ; riche en CaCO ₃	Disponibilité limitée ; coûts variables selon la granulométrie du matériau et les fournisseurs (briqueteries, producteurs de briques broyées)	Supersol (Andilly 95)

2.2.2.2. Matériaux organiques

Parmi les matières organiques, les produits inventoriés étaient des composts de déchets verts, du fumier de cheval, du fumier de volaille et des drêches de brasserie. Le compost de déchets verts était issu d'une plateforme de compostage gérée par SEDE Environnement, filiale de Veolia ; il est commercialisé sous l'appellation Tradivert. Le fumier de cheval provenait de centres équestres locaux, les fientes de volailles de chez Samagro, producteur d'engrais organiques en Belgique (et commercialisées par SEDE Environnement sous l'appellation Tradifientes). Les drêches de brasserie étaient issues de collectes auprès de brasseries du Nord qui cherchent à valoriser les sous-produits de leur activité.

Le tableau 7 présente les principales caractéristiques des matériaux organiques et renseigne sur leur intérêt ou non au regard des objectifs visés dans le présent travail.

Tableau 7 : Avantages et inconvénients des matières organiques identifiées pour élaborer un horizon de croissance

	Avantages	Inconvénients	Fournisseurs
Compost de déchets verts de 10 à 12 semaines (Tradivert)	Produit relativement homogène ; apport de carbone et d'éléments nutritifs ; favorise l'activité biologique à moyen et long termes ; produit normé et facilement disponible	Effets qui diffèrent selon les biomasses utilisées et la maturité du compost	SEDE Environnement (Graincourt Les Havrincourt 62)
Compost de déchets verts ayant reçu des boues de STEP de 10 à 12 semaines	Produit intéressant par son apport en éléments nutritifs sous différentes formes ; riche en carbone et favorise l'activité biologique à moyen et long terme ; produit normé et facilement disponible	Effets qui diffèrent selon les biomasses utilisées et la maturité du compost ; contamination potentielle en éléments traces	SEDE Environnement (Graincourt Les Havrincourt 62)
Drêches de brasserie fraîches de 1 à 5 jours	Disponibles en quantité dans le Nord de la France ; forte teneur en matières organiques (de l'ordre de 90 % de la matière totale) ; faible coût	Qualité du produit se détériorant rapidement (fermentation)	Brasseries locales (59)
Fumier de cheval frais de 1 à 2 semaines	Disponibles en quantité sur l'ensemble du territoire ; produit présentant une forte teneur en matières organiques ; faible coût	Hétérogénéité du produit pouvant compliquer la mise en mélange des matériaux	Centres équestres locaux (59)
Fientes de volailles séchées de 3 jours	Disponibles en quantité sur l'ensemble du territoire ; fortes teneurs en P ₂ O ₅ , K ₂ O et CaO	Produit nauséabond pouvant engendrer des nuisances pour le voisinage	Samagro (Leisele Belgique-8691)

À l'issue de cette analyse, le compost de déchets verts ayant reçu des boues de station d'épuration a été écarté du fait d'un potentiel enrichissement en éléments indésirables (notamment en éléments traces). Ce compost a été écarté des décisions en raison de son origine, bien que tout à fait conforme à la réglementation en vigueur. Les drêches ont également été écartées du fait de leur altération rapide et de leur disponibilité variable à l'échelle nationale. Ont été retenus :

- le compost de déchets verts (Tradivert) (également retenu par Burrow *et al.*, 2018 ; Coull *et al.*, 2021 ; Deeb *et al.*, 2016 ; Deeb *et al.*, 2017 ; Grard, 2017 ; Pruvost *et al.*, 2020 ; Rokia *et al.*, 2014 ; Séré *et al.*, 2010 et Vidal-Beaudet *et al.*, 2018) ;
- les fientes de volailles (Tradifientes) (aussi étudiées dans les Technosols de Buondonno *et al.*, 2013 ; Macía *et al.*, 2014 ; Ruiz *et al.*, 2020). Leurs compositions sont relativement homogènes et répondent aux réglementations en vigueur puisque ces matériaux organiques sont normés et commercialisés. Au regard du compost de déchets verts, les fientes de volailles présentent un intérêt pour leurs teneurs élevées en P₂O₅, K₂O et CaO ;
- un fumier de cheval composté. Cet amendement organique ne figure pas parmi les matériaux parents les plus couramment utilisés pour l'élaboration de Technosols construits. Il est donc assez novateur d'en évaluer le potentiel. L'intérêt du fumier de cheval réside dans sa forte teneur en matières organiques. Sa composition dépend de la nature de la litière (paille ou copeaux) et se pose même la question de la présence d'éléments ou molécules indésirables. Pouech *et al.* (2009) ont montré, sur un échantillon national, que les fumiers équins respectaient la norme NF U44-051 ; les teneurs en éléments traces métalliques (chrome, cuivre, nickel, zinc, cadmium, plomb, mercure, sélénium, arsenic) sont nettement inférieures aux valeurs seuils. Il en est de même avec les critères microbiologiques (absence de salmonelles et d'œufs d'helminthe viables). De plus, les produits antiparasitaires administrés aux chevaux n'altèrent pas les composts élaborés à partir du fumier de ces derniers puisque leur application ne présente pas d'effet significatif sur les sols (Begue *et al.*, 2021). Au regard du fumier de cheval frais, le compostage présente aussi l'avantage d'homogénéiser le produit à mettre en œuvre.

2.2.3. Caractérisation des matériaux présélectionnés

L'innocuité des matériaux présélectionnés a été vérifiée par spectrométrie de fluorescence des rayons X (au moyen d'un XRF, X-MET8000, Hitachi High-Tech). Ont été contrôlées leurs teneurs en éléments traces métalliques, ceci afin de répondre à la demande de Veolia de ne sélectionner que des matériaux non contaminés au regard de ce premier

critère. Tous les matériaux présentaient des teneurs très inférieures au fond géochimique de référence et en deçà des limites fixées dans le cadre de l'arrêté du Gouvernement de la Région de Bruxelles-Capitale du 8 octobre 2015, déterminant les normes d'intervention et les normes d'assainissement pour le sol et l'eau souterraine. Par la suite, les principaux paramètres physico-chimiques des matériaux issus de l'inventaire ont été déterminés afin de juger de leur pertinence au regard des objectifs visés. Les analyses ont porté plus particulièrement sur la granulométrie, le pH eau, les teneurs en CaCO₃ total et actif. Pour les matériaux d'origine organique, les caractérisations ont été complétées d'une part, par la collecte de données analytiques auprès des fournisseurs et de la Chambre d'Agriculture des Hauts de France (carbone organique, azote total, teneur en matière organique et en cations échangeables) et d'autre part, par la détermination analytique de leur conductivité électrique (CE), leurs teneurs en carbone organique, azote total, phosphore assimilable et leur composition biochimique. Les normes respectées pour la réalisation des analyses sont listées dans le tableau 8 et sont détaillées en annexe 3. L'ensemble des analyses a été réalisé au sein du Laboratoire de Génie Civil et géo-Environnement (LGCgE) dans les locaux de Junia ISA, excepté les analyses granulométriques et de carbone et azote totaux menées au Laboratoire d'analyses agronomiques SADEF.

Tableau 8 : Normes utilisées pour les déterminations analytiques des propriétés des matériaux présélectionnés

Analyse	Norme employée
Granulométrie (5 fractions – sans décarbonatation)	ISO 11277
pH eau	NF ISO 10390
Conductivité Electrique	NF ISO 11265
CaCO ₃ total	NF ISO 10693
CaCO ₃ actif	NF X 31-106
C organique	NF ISO 14235
N total	NF ISO 13878 (méthode Dumas)
P ₂ O ₅ assimilable	NF X 31-161 (méthode Joret-Hébert)
Fractionnement biochimique de la matière organique	FD U 44-162

2.2.3.1. Caractéristiques physico-chimiques des matériaux minéraux

Le tableau 9 présente les principaux paramètres physico-chimiques des matériaux minéraux présélectionnés au regard des objectifs visés, ceci en vue de définir les formulations (natures et doses des matériaux).

La majorité des matériaux présente des pH alcalins (7,50 – 9,09). Les calcaires broyés et les sables ont une part d'éléments grossiers (> 2mm) supérieure à 30 %. Dans les calcaires broyés et les sables, la fraction d'éléments grossiers entre 4 et 10 mm représente respectivement 6 et 15 %. Les sables calcaires et le sablon compactable présentent une répartition granulométrique pour la fraction inférieure à 2 mm assez similaire entre eux, avec de très faibles pourcentages en argile et limons ; la fraction sableuse est supérieure à 80 %. Les sables calcaires présentent une part d'éléments grossiers de l'ordre de 19 % ainsi que de fortes teneurs en calcaire total (815 g kg⁻¹) et calcaire actif (58 g kg⁻¹) contrairement au sablon

compactable (respectivement 57 et 14 g kg⁻¹). La granulométrie des fillers est dominée par les fractions inférieures à 200 µm dont 42 % correspondent aux fractions inférieures à 20 µm. Ils sont très calcaires (895 g kg⁻¹) avec toutefois un faible taux de calcaire actif (150 g kg⁻¹). La bentonite est le matériau avec le taux d'argile le plus élevé (61 % dont 46 % de smectites d'après les informations techniques obtenues auprès du fournisseur). Ses teneurs en CaCO₃ total et actif sont respectivement de 142 g kg⁻¹ et 42 g kg⁻¹. Les briques concassées sont dominées par la fraction supérieure à 20 µm et surtout par celles des sables. Les briques concassées présentent les teneurs en CaCO₃ les plus faibles (entre 5 et 7 g kg⁻¹).

2.2.3.2. Caractéristiques physico-chimiques des matériaux organiques

Les matériaux organiques présentent des teneurs en matières organiques qui diffèrent selon leur nature et leur degré de compostage (tableau 10). La teneur la plus élevée correspond à du fumier de cheval pailleux (822 g kg⁻¹), la plus faible au compost de déchets verts (418 g kg⁻¹). Les pH des matériaux organiques varient de 6,0 à 8,5. Ces matériaux se distinguent également par leurs teneurs en N total, P₂O₅ assimilable, K₂O, MgO et CaO. Les fientes de volaille sont ainsi plus riches en N total, P₂O₅ et CaO (respectivement, 43 ; 44,8 et 118,2 g kg⁻¹) alors que le compost de déchets verts présente une teneur en CaO intermédiaire à celles du fumier de cheval et des fientes de volaille (respectivement 36,1 contre 10,1 et 118,2 g kg⁻¹).

Tableau 9 : Paramètres physico-chimiques des matériaux minéraux d'intérêt (granulométrie sans décarbonatation).

	Matériau fin (< 2 mm)					Éléments grossiers (> 2mm) %	pH eau	CaCO ₃ total g kg ⁻¹	CaCO ₃ actif g kg ⁻¹
	Argiles (< 2 µm) %	Limon fin (2-20 µm) %	Limon grossier (20-50 µm) %	Sable fin (50-200 µm) %	Sable grossier (> 200 µm) %				
Bentonite	61	21	6	9	3	0	8,13	142	42
Calcaire broyé (0-10)	18	18	31	17	16	36	8,25	757	73
Sables calcaires (0-2)	1	6	8	11	74	19	8,83	815	58
Filler (0-1)	8	34	22	30	6	0	8,90	895	150
Sablon compactable (0-1)	1	3	2	65	29	0	9,09	57	14
Sables (0-6,3)	1	9	2	18	70	32	9,02	371	52
Briques concassées (0-1)	2	8	17	37	37	0	7,50	5 - 7	3 - 4

Valeurs moyennes, n = 3

Tableau 10 : Estimation des paramètres physico-chimiques des matériaux organiques d'intérêt

	Compost de déchets verts (TradiVert)*	Fumier de cheval pailleux**	Fientes de volailles***
Matière sèche (g kg ⁻¹ PB)	649	664	500
Matière organique (g kg ⁻¹)	418	822	640
pH	6,0	7,6	8,5
C/N	12,0	37,2	7,8
N total (g kg ⁻¹)	17,4	13,0	43,0
P ₂ O ₅ (g kg ⁻¹)	7,4	5,6	44,8
K ₂ O (g kg ⁻¹)	15,7	25,6	35,4
MgO (g kg ⁻¹)	6,2	2,7	14,6
CaO (g kg ⁻¹)	36,1	10,1	118,2

* Données du fournisseur ; **Leveau et Doligez (2007) ; ***Teurki (2013)

Les données présentées dans le tableau 10 correspondent à des informations issues soit des producteurs, soit de la littérature. Elles ont été intégrées dans les réflexions qui ont conduit à la construction des Technosols. Pour préciser leur composition et leurs paramètres physico-chimiques, ces trois matériaux organiques ont fait l'objet *a posteriori* de caractérisations spécifiques présentées dans le tableau 11.

Tableau 11 : Paramètres physico-chimiques et composition des matériaux organiques d'intérêt

	Compost de déchets verts (Tradivert)	Fumier de cheval composté	Fientes de volailles (Tradifientes)
Matière sèche (g kg ⁻¹ PB)	919 ± 4	902 ± 3	910 ± 3
pH	8,44 ± 0,13	9,55 ± 0,22	8,08 ± 0,20
CE (μS cm ⁻¹)	3657 ± 469	13052 ± 2578	10473 ± 905
C organique (g kg ⁻¹)	18 ± 0	19 ± 2	30 ± 2
N total (g kg ⁻¹)	27,8 ± 6,0	33,2 ± 3,5	31,6 ± 1,6
C/N	15 ± 0	17 ± 3	10 ± 0
P ₂ O ₅ assimilable (g kg ⁻¹)	3,07 ± 0,09	6,08 ± 0,94	6,80 ± 1,13
Hemicellulose (%)	8,1 ± 0,0	10,8 ± 0,0	21,7 ± 0,1
Cellulose (%)	7,6 ± 0,0	14,2 ± 0,1	16,2 ± 0,1
Lignine (%)	18,8 ± 0,0	17,7 ± 0,0	7,7 ± 0,0
Matières minérales (%)	27,5 ± 0,0	21,5 ± 0,1	2,4 ± 0,0
Matières organiques solubles (%)	38,0 ± 0,0	35,8 ± 0,0	52,0 ± 0,0

(n = 3 ; moyenne ± ET)

Les caractérisations faites *a posteriori* ont mis en évidence des différences non négligeables pour certains paramètres en comparaison des données de la littérature et de celles obtenues auprès des producteurs. Ces différences n'ont toutefois pas remis en cause les proportions des matériaux dans les formulations qui ont été établies avant l'analyse spécifique des matériaux au laboratoire.

Comme le laissaient présager les caractéristiques obtenues auprès des fournisseurs et dans la littérature, les matériaux organiques présélectionnés se sont distingués entre eux par leur nature et leur composition. Leurs compositions témoignent de leur faible degré de dégradation. Ils s'apparentent en effet à la catégorie des « engrais organiques » au regard de leurs importantes teneurs en matières organiques solubles (> 30 %). Cette catégorie rassemble les produits organiques riches en fractions solubles et en azote total, facilement minéralisables.

2.2.4. Sélection des matériaux parents et élaboration des formulations des Technosols

Au regard de l'ensemble des critères et paramètres examinés précédemment, la sélection des matériaux parents a été réalisée afin de les assembler pour constituer différentes formulations (organo-minérales et minérales), chacune de ces formulations pouvant correspondre à une couche d'un Technosol. La finalité de ces formulations et de leur agencement était d'aboutir à des Technosols dont les caractéristiques avoisinent le plus possible celles des sols retenus pour servir de référence en termes de maraîchage ou de production de légumes de plein champ. L'objectif visait aussi à construire des Technosols avec des profils les plus proches des sols naturels, c'est-à-dire constitués par une couche organo-minérale supérieure reposant sur une ou plusieurs couches minérales.

2.2.4.1. Sélection des matériaux parents

Les calcaires broyés et les sables ont été écartés du fait de teneurs en éléments grossiers trop élevées, incompatibles avec un usage en maraîchage. À l'inverse, ont été retenus les fillers pour leurs fortes teneurs en limons et en argile. Ces matériaux sont aussi riches en CaCO_3 total et actif, ce qui a conduit à ne pas retenir les sables calcaires présentant également des teneurs en CaCO_3 élevées. L'élimination des sables calcaires s'explique aussi par leur pourcentage d'éléments grossiers (19 %). L'intérêt du sablon compactable et des briques concassées réside dans leurs fortes teneurs en sables, ce qui devrait favoriser la portance, la facilité de travail du sol, l'infiltration des eaux, ainsi que l'aptitude du sol à se réchauffer au printemps. La microporosité des briques concassées a été supposée favorable au stockage de l'eau et surtout aux micro-organismes (microcavités). Parmi les matériaux listés, la bentonite est le seul à être en capacité d'apporter dans le mélange une part conséquente d'argiles minéralogiques de type smectites. En résumé, en ce qui concerne les matériaux parents minéraux, le choix a porté sur les fillers, le sablon compactable, les briques concassées et la bentonite.

Pour les matériaux parents organiques, ont été retenus le compost de déchets verts, le compost de fumier de cheval et les fientes de volailles en raison de leur complémentarité. De ces choix résultent, pour les formulations issues du mélange de ces matériaux, des teneurs présumées élevées en carbonates, lesquelles pourraient freiner la dégradation des matières organiques, réduire la solubilisation de certains éléments (tels que le fer) et affecter par exemple, les activités photosynthétiques (chlorose) (Soltner, 2017). À ce stade du travail, le choix a été fait de ne pas écarter un matériau parent pour son pH et sa teneur en CaCO_3 élevés, puisque son mélange aux autres matériaux et, notamment, aux matières organiques, peut tamponner cette variable. De plus, comme pour les sols du Marais audomarois, une part non

négligeable de ces carbonates n'est pas sous une forme active. Une surveillance des effets de ce paramètre sur le fonctionnement des sols s'est néanmoins avérée nécessaire.

2.2.4.2. Réflexions et méthodologies relatives à la conception des formulations

2.2.4.2.1. Formulation des couches minérales de profondeur

L'élaboration des couches minérales de profondeur a d'abord porté sur la granulométrie des fractions minérales avec pour principal objectif que les couches présentent des textures proches de celles des sols de référence considérés. Les calculs ont été réalisés en privilégiant la part d'argile à incorporer dans les Technosols puis ont été considérés par ordre de priorité les parts de limons et de sables. Pour contribuer à la formation du complexe argilo-humique des Technosols, la réflexion relative à l'assemblage des constituants des matériaux parents a aussi intégré la nécessité de favoriser la structuration, l'enracinement, la porosité, l'infiltration des eaux pluviales, la capacité de rétention en eau, la facilité de travail du sol et dans une certaine mesure, la capacité d'échange cationique. Il s'est donc avéré nécessaire de prendre en compte la minéralogie des argiles présentes dans les formulations.

Au regard des sols de référence considérés, il a été décidé d'assembler les matériaux parents pour disposer de couches présentant des teneurs de l'ordre de 25 % d'argile, 65 % de limons et 10 % de sables. Il a été montré précédemment l'intérêt de raisonner la part des argiles de type smectites dans le but de favoriser le fonctionnement des Technosols construits. Néanmoins, l'intégration de bentonite dans les formulations ne s'inscrit pas dans le cadre de l'économie circulaire et le souhait de Veolia a donc été d'évaluer l'influence de la bentonite sur l'écosystème créé, ceci en élaborant des formulations avec et sans bentonite. Les réflexions ont abouti à proposer deux formulations minérales composées (en pourcentage massique des matériaux bruts, c'est-à-dire en intégrant leurs fractions supérieures à 2 mm) de :

- 21 % de bentonite, 55 % de filler, 19 % de sablon compactable et 5 % de briques concassées ;
- 76 % de filler, 19 % de sablon compactable et 5 % de briques concassées.

Les tableaux 12 et 13 détaillent les granulométries estimées de ces formulations. L'estimation s'est appuyée sur la part de matériaux parents en mélange et sur leur granulométrie spécifique. La formulation avec la bentonite a présenté une teneur en argile qui tend vers l'objectif fixé (18,6 contre 25,0 %). La teneur en limons a été sensiblement inférieure à l'objectif (43,7 contre 65 %) au profit des sables (37,7 contre 10,0 %). Ce dépassement, lié à la proportion de sables fins (32,5 %), a été accepté en considérant que le

comportement agronomique des sables fins est relativement proche de celui des limons grossiers.

La formulation sans bentonite a inévitablement présenté une teneur en argile fortement en deçà de l'objectif fixé (7,5 contre 25 %). La part d'argile granulométrique a été compensée en partie avec un apport de filler plus conséquent. En revanche, la teneur en limons totaux avoisinait davantage l'objectif fixé (51 contre 65 %). Ce n'était pas le cas pour les sables dont la teneur excédait très largement la valeur souhaitée (41 contre 10 %).

Étant donné le rôle attribué aux argiles gonflantes, la formulation sans bentonite est susceptible de suivre un processus de structuration beaucoup plus lent. De plus, sa CEC peut également être moindre du fait d'un complexe argilo-humique plus limité.

Tableau 12 : Contribution des matériaux minéraux parents dans la granulométrie estimée de la formulation minérale avec bentonite

	Argile <2µm (%)	Limon fin (2-20 µm) (%)	Limon grossier (20-50 µm) (%)	Sable fin (50-200 µm) (%)	Sable grossier (> 200 µm) (%)	Total (%)
Bentonite	12,8	4,4	1,3	1,9	0,6	21
Filler	4,4	22,6	12,1	14,8	1,1	55
Sablon compactable	0,4	1,1	0,2	14,8	2,5	19
Briques concassées	1	1	1	1	1	5
Formulation	18,6	29,1	14,6	32,5	5,2	100
		43,7		37,7		
Valeurs guides	25	23	42	9	1	100

Tableau 13 : Contribution des matériaux minéraux parents dans la granulométrie estimée de la formulation minérale sans bentonite

	Argile <2µm (%)	Limon fin (2-20 µm) (%)	Limon grossier (20-50 µm) (%)	Sable fin (50-200 µm) (%)	Sable grossier (> 200µm) (%)	Total (%)
Filler	6,1	31,2	16,7	20,5	1,5	76
Sablon compactable	0,4	1,1	0,2	14,8	2,5	19
Briques broyées	1	1	1	1	1	5
Formulation	7,5	33,3	17,9	36,3	5	100
		51,2		41,3		
Valeurs guides	25	23	42	9	1	100

2.2.4.2.2. Formulation des couches organo-minérales de surface

La démarche réalisée pour l'élaboration des couches organo-minérales a été comparable à celle mise en œuvre pour la conception des couches minérales de profondeur ; elle a été complétée par un second volet portant sur des apports organiques. Les matières organiques jouent en effet un rôle essentiel dans le sol, notamment via la formation et le développement du complexe argilo-humique. Elles constituent aussi un réservoir d'éléments nutritifs, qui, lorsque la minéralisation s'opère, permet la libération de minéraux essentiels à la nutrition des végétaux et d'autres organismes du sol. Elles jouent par ailleurs un rôle dans

la structuration des sols. À l'image des matériaux minéraux, la proportion de matériaux organiques à incorporer dans les formulations a été pensée selon un ordre de priorité. L'objectif principal a d'abord été d'atteindre un taux de matières organiques comparable à celui des sols de référence, puis de s'assurer de la constitution d'une réserve nutritive similaire à celle de ces sols. Les calculs relatifs à ce second objectif ont plus spécifiquement visé à combiner les matières organiques de sorte à approcher les gammes de valeurs établies au regard des concentrations en P_2O_5 , K_2O , MgO et CaO . Dans la mesure où ces objectifs étaient secondaires, ils n'ont pas constitué un frein à la poursuite des opérations. Il a par ailleurs été considéré qu'ils pourraient être atteints par la suite grâce au respect des pratiques du micro-maraîchage bio-intensif.

La formulation des couches organo-minérales de surface (avec ou sans bentonite) a ainsi été raisonnée sur la base de celle des couches minérales de profondeur avec pour objectifs d'obtenir des formulations présentant des teneurs en : matière organique de 5 % ; P_2O_5 de 0,19 à 0,31 $g\ kg^{-1}$; K_2O de 0,22 à 0,27 $g\ kg^{-1}$; MgO de 0,22 à 0,52 $g\ kg^{-1}$ et CaO de 2,5 à 4,38 $g\ kg^{-1}$. L'évaluation des quantités de matériaux organiques à apporter aux formulations minérales a intégré d'une part, leurs teneurs en eau et d'autre part, le fait que les teneurs en éléments nutritifs mentionnées ci-dessus correspondent dans les formulations à des teneurs assimilables par les plantes alors que ces éléments sont exprimés en teneurs totales dans les matériaux organiques parents. Par ailleurs, les apports en éléments nutritifs (tels que Mg et Ca) des matériaux minéraux n'ont pas été considérés pour l'élaboration des formulations organo-minérales.

Au regard de la composition des matériaux organiques parents, il a été fait le choix de prioriser dans les formulations organo-minérales le fumier de cheval composté (riche en matière organique). Cet apport a été complété par l'introduction de compost de déchets verts et de fientes de volaille (riches en éléments minéraux majeurs). Le tableau 14 détaille la composition et les teneurs en éléments nutritifs estimées des apports organiques dans les formulations organo-minérales élaborées (avec et sans bentonite). Les formulations proposées comprennent 8,1 % poids sec (PS) de matériaux organiques correspondant pour 3,3 % à du fumier de cheval ; 3,2 % à du compost de déchets verts ; et 1,6 % à des fientes de volaille.

Tableau 14 : Contribution en PS des matériaux organiques parents dans les teneurs estimées en matière organique et éléments nutritifs dans les formulations organo-minérales avec et sans bentonite

	Apports en éléments nutritifs					
	MO (%)	N total (g kg ⁻¹)	P ₂ O ₅ total (g kg ⁻¹)	K ₂ O total (g kg ⁻¹)	MgO total (g kg ⁻¹)	CaO total (g kg ⁻¹)
3,3 % de fumier de cheval pailleux	2,7	0,43	0,18	0,85	0,09	0,34
3,2 % de compost de déchets verts	1	0,56	0,24	0,50	0,2	1,15
1,6 % de fientes de volaille	1,3	0,69	0,72	0,57	0,23	1,89
Formulations (total)	5	1,68	1,14	1,9	0,52	3,38
Valeurs guides	5	nd	0,19 à 0,31	0,22 à 0,27	0,22 à 0,52	2,5 à 4,38

MO : matière organique

Il est observé que les formulations proposées excèdent fortement les valeurs en P₂O₅ et K₂O des sols de référence, lesquelles sont exprimées sous des formes assimilables par les plantes. Comme mentionné précédemment, le tableau 14 renseigne sur les teneurs totales et il est fait l'hypothèse que les écarts soient plus faibles en considérant les formes échangeables. Par ailleurs, dans la mesure où ces objectifs sont secondaires

2.2.5. Mode et conditions d'élaboration des Technosols construits

La démarche a abouti à proposer quatre formulations (deux formulations minérales et deux formulations organo-minérales) pour constituer, à l'échelle du mésocosme, deux Technosols qui se différencient par la présence ou l'absence de bentonite dans leur composition. Pour satisfaire aux conditions de développement des plantes maraîchères, chacun des Technosols a été constitué en superposant une couche organo-minérale de 30 cm d'épaisseur sur une couche minérale d'épaisseur égale (figure 5).

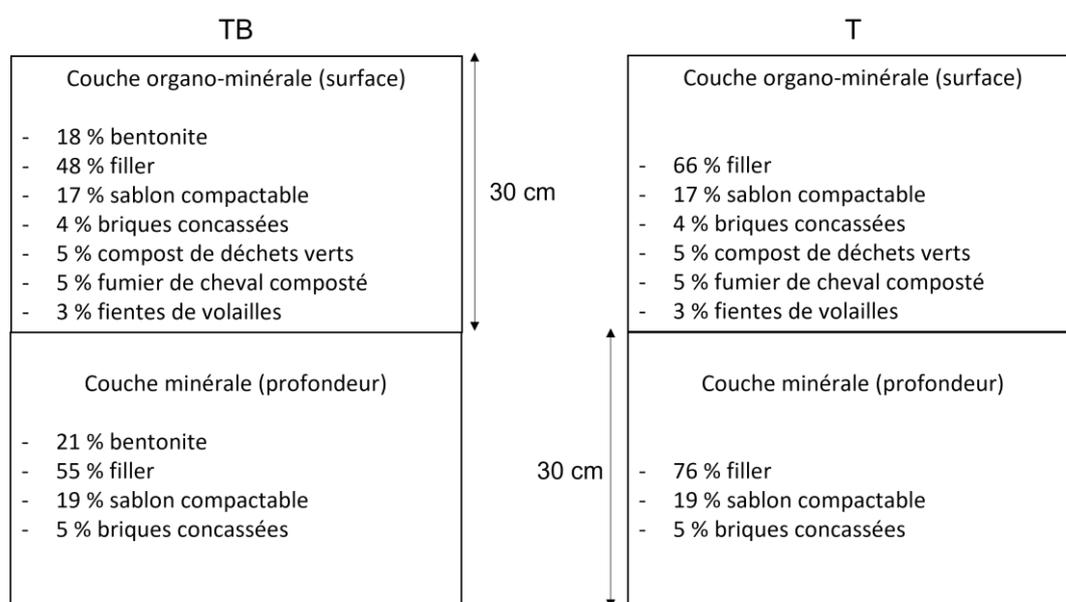


Figure 5 : Organisation et composition des couches constitutives des deux Technosols construits. TB, avec bentonite, T, sans bentonite, la part des matériaux organiques parents est exprimée en pourcentage de poids frais.

2.3. INTEGRATION DES ASPECTS TECHNICO-ECONOMIQUES

Pour renseigner sur le réalisme économique de la mise en place de ces deux Technosols, la démarche a été complétée par une estimation des coûts de leur élaboration. Cette composante économique s'avère déterminante pour Veolia quant à la faisabilité économique et logistique des propositions d'élaboration de Technosols. L'estimation budgétaire a été réalisée en considérant une surface de base d'un hectare, surface moyenne d'une micro-ferme en maraîchage intensif, et en considérant par ailleurs une épaisseur compatible avec un usage maraîcher. Pour les Technosols, il a été considéré une densité moyenne de 1,3 quelle que soit la nature des matériaux parents. N'ont pas été intégrés dans les calculs les frais de transport, de stockage, de mélange, de mise en place des matériaux parents, cette composante étant trop dépendante du contexte technico-économique et environnemental du projet.

Les tableaux 15 et 16 présentent les coûts respectivement pour les Technosols avec ou sans bentonite. Il est apparu que l'intégration de la bentonite dans la construction du Technosol engendrait un surcoût de 179 k€, soit un coût 2,1 fois plus élevé que celui du Technosol sans bentonite. Rapporté à la tonne, le prix des Technosols est de 43 € (HT) pour TB et de 20 € (HT) pour T. Pour des investisseurs, le coût de construction du Technosol avec bentonite ne semble cependant pas rédhibitoire. Il s'est toutefois avéré nécessaire de montrer la pertinence de la bentonite sur le fonctionnement du Technosol.

Tableau 15 : Estimation des coûts d'achat des matériaux parents pour la construction du Technosol avec bentonite (en € HT par hectare)

Matériaux parents	Parts des matériaux parents dans la couche (%)	Prix à la tonne (€ HT)	Coût à l'hectare (€ HT)
Couche organo-minérale			
Bentonite	18,30	132	94 208
Filler	47,80	15	27 963
Sablon compactable	16,50	4	2 799
Compost de déchets verts	4,90	11	2 102
Fumier de cheval composté	5,00	22	4 290
Fientes de volaille	3,20	46	5 741
Briques concassées	4,30	160	26 832
		Sous-total 1	163 935
Couche minérale			
Bentonite	21,05	132	108 365
Filler	55,01	15	32 181
Sablon compactable	18,99	4	3 222
Briques concassées	4,95	160	30 888
		Sous-total 2	174 656
		Total	338 591

Tableau 16 : Estimation des coûts d'achat des matériaux parents pour la construction du Technosol sans bentonite (en € HT par hectare)

Matériaux parents	Parts des matériaux parents dans la couche (%)	Prix à la tonne (€ HT)	Coût à l'hectare (€ HT)
Couche organo-minérale			
Filler	66,00	15	38 610
Sablon compactable	16,50	4	2 799
Compost de déchets verts	4,90	11	2 102
Fumier de cheval composté	5,00	22	4 290
Fientes de volaille	3,20	46	5 741
Briques concassées	4,40	160	27 456
		Sous-total 1	80 998
Couche minérale			
Filler	75,95	15	44 431
Sablon compactable	18,99	4	3 222
Briques concassées	5,06	160	31 574
		Sous-total 2	79 227
		Total	160 225

2.4. DESCRIPTION DE LA DEMARCHE EXPERIMENTALE

2.4.1. Expérimentation en mésocosmes sous serre

La fertilité⁶ des deux Technosols a été évaluée après l'assemblage des matériaux parents et à l'issue d'une première culture végétale destinée à favoriser les interactions entre les différents constituants mis en œuvre. L'expérimentation a été menée durant 42 jours en utilisant douze containers (l : 1 m, L : 1,2 m, H : 1 m) disposés sous serre, afin de bénéficier d'un environnement semi-contrôlé et de maîtriser les apports en eau. La serre se situe au sein de la ferme expérimentale du groupe Veolia à Lomme (figure 6, A, B, C). Depuis 2018, Veolia y cultive plus de 420 variétés de fruits et légumes sous serre et à l'extérieur, sur une parcelle de 6000 m².

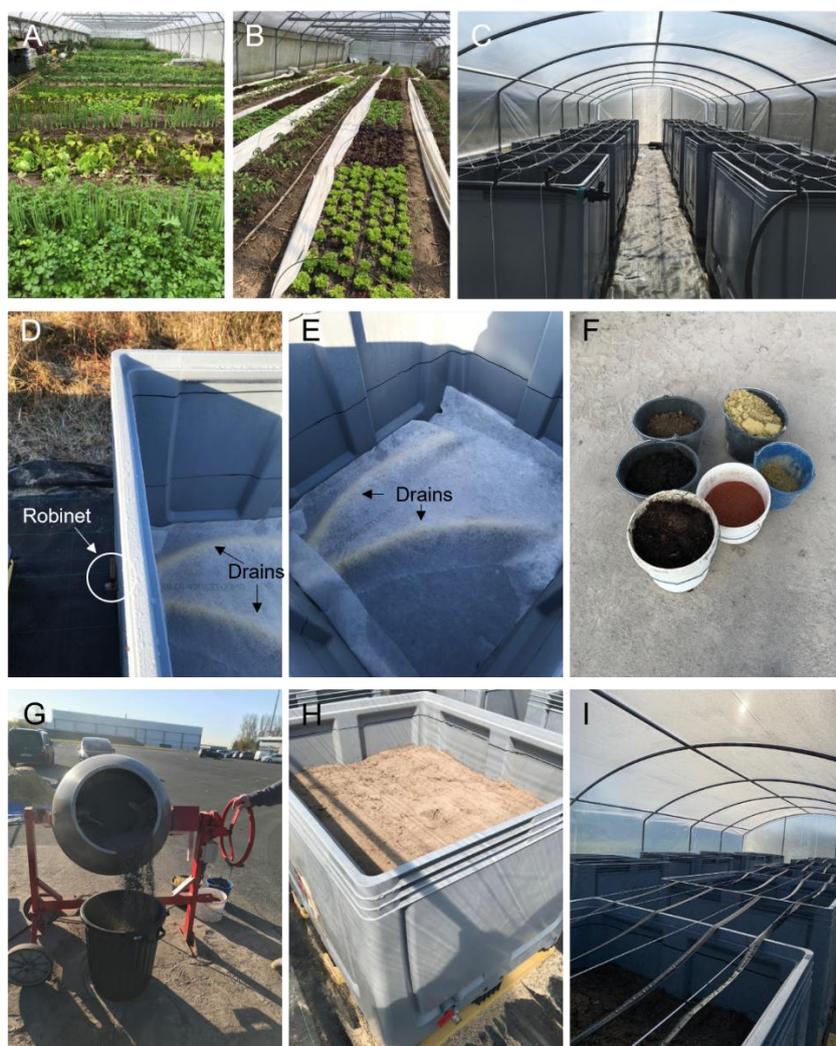


Figure 6 : (A, B) Serre professionnelle cultivée par le groupe Veolia ; (C) Ensemble des douze containers de la serre expérimentale ; (D, E) Système de drainage et de récupération des eaux de percolation des mésocosmes ; (F, G, H) Élaboration des formulations par mélange des matériaux parents ; (I) Système d'irrigation des mésocosmes.

⁶ Il est d'usage d'employer le terme de fertilité d'un sol pour traduire son aptitude à produire (Barbier, 1955). Dans les prochains paragraphes, il a été choisi d'utiliser ce terme comme un synonyme du concept de potentialités agronomiques introduit précédemment.

Les containers, équipés à leur partie inférieure d'un robinet de purge, ont été posés avec une légère pente pour permettre un écoulement par gravité des eaux de drainage. Pour faciliter cet écoulement, un tuyau de drainage a été placé dans le fond des containers et mis en contact avec le robinet (figure 6, D, E). Après la pose d'un filtre synthétique, les containers ont été remplis au moyen des formulations élaborées. Il a été veillé à ce qu'ils aient reçu les mêmes volumes de matériaux. La disposition des containers dans la serre a été randomisée (Figure 7).

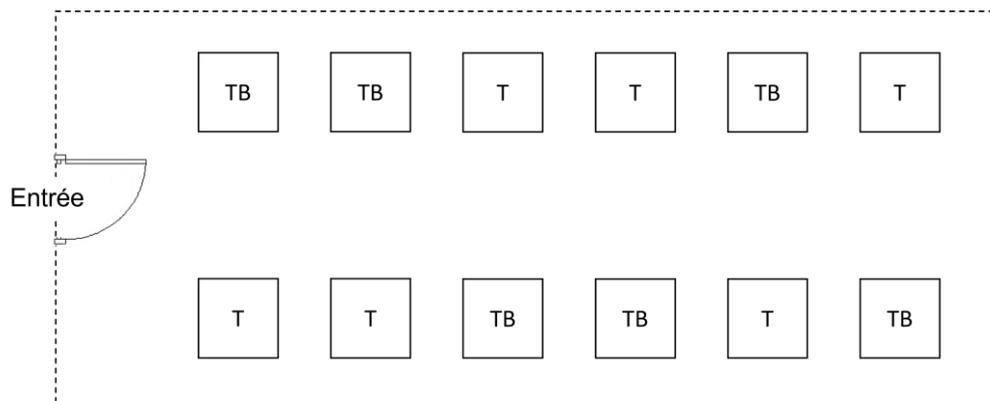


Figure 7 : Disposition des mésocosmes dans la serre expérimentale

Pour l'élaboration des formulations organo-minérales ou minérales, les mélanges de matériaux parents ont été réalisés au moyen d'une bétonnière en vue d'assurer leur homogénéité (figure 6, F, G, H). Les mélanges ont été réalisés en respectant les proportions massiques préalablement définies. L'objectif était de constituer, en six réplicats, deux Technosols correspondant à des bicouches, la couche inférieure étant constituée par la formulation minérale et la couche supérieure par la formulation organo-minérale.

Lors de la mise en place du dispositif expérimental (13 avril 2021), les formulations organo-minérales ont été échantillonnées en six réplicats et les formulations minérales en triplicats. Sur l'ensemble des prélèvements ont été mesurés différents paramètres agronomiques (lesquels sont listés en 2.4.1.1.1.) Ces analyses ont marqué le début de l'expérimentation en mésocosmes et correspondent au t_0 (figure 8). Des prélèvements ultérieurs ont été réalisés à différents pas de temps (t_1 , après une culture de phacélie, t_2 , après une première mise en culture maraîchère et t_3 , après une seconde mise en culture maraîchère) pour étudier l'évolution temporelle de ces paramètres et de la fertilité des Technosols construits.

Afin d'initier les premiers processus pédogénétiques, des apports en eau ont été réalisés uniformément à la surface des Technosols, et ceci durant les trois premières semaines. Pour éviter un engorgement superficiel, l'irrigation a été réalisée par des apports successifs. Au total, 150 L d'eau de ville (≈ 15 à 20 L tous les 2 à 3 jours) ont été apportés au

moyen d'un système de tuyaux suintants disposés au-dessus des containers (figure 6, I). Cet apport correspond au moins à 40 % de la capacité au champ des Technosols construits (avec des capacités de rétention en eau maximale de 534 g kg⁻¹ pour TB et de 369 g kg⁻¹ pour T). La capacité de rétention en eau des substrats a été mesurée au laboratoire selon la méthode USDA Water Erosion Prediction Project (WEPP ; Savabi *et al.*, 2011). L'objectif de l'humectation progressive des matériaux a été notamment d'initier les processus de gonflement/rétractation des smectites présentes dans les formulations, favorisant ainsi un début de structuration des Technosols. Ces premiers processus ont été renforcés avec la mise en place d'un engrais vert en vue de favoriser l'agrégation des constituants. Le choix a porté sur la phacélie (*Phacelia tanacetifolia*) retenue pour son développement rapide et la facilité de la destruction de cette culture. De plus, la phacélie s'adapte à tout type de sol et présente divers intérêts. Son système racinaire pivotant contribue à l'aération du sol et en limite le tassement. Il lui permet de puiser en profondeur les nutriments nécessaires à son développement qui sont restitués au sol suite à la destruction de la culture (e.g. azote et phosphore). De par son important taux de couverture, la phacélie limite le développement d'adventices. C'est également une plante mellifère qui attire les pollinisateurs mais aussi des prédateurs tels que les syrphes ou les carabes, lesquels régulent respectivement les communautés de pucerons et de mollusques (limace ou escargot). En outre, la phacélie est préconisée pour rompre le cycle de divers ravageurs dans les rotations culturales puisqu'elle appartient à la famille des hydrophylacées qui ne contient aucun légume cultivé. Cet engrais vert s'est d'ailleurs révélé très utile pour maximiser les rendements de certaines cultures maraîchères telles que la laitue ou le céleri-rave (Jablonska Ceglarek, 1976 ; Schröder & Henkel, 1971).

Le 7 mai 2021, après ressuyage et un travail superficiel du sol au moyen d'une griffe sur une épaisseur de 5 cm, 7 g de phacélie par m² ont été semés à la volée, soit un total de 8,4 g de graines par mésocosme. Après 42 jours de culture (temps nécessaire à la phacélie pour atteindre la floraison au sein d'au moins un sol d'étude), la phacélie a été fauchée et pesée pour évaluer le rendement selon les formulations. Une partie des récoltes a été retenue pour la réalisation de déterminations analytiques. Le surplus de résidus de culture a été séché, broyé et déposé à la surface des mésocosmes, ceci pour éviter toute exportation de nutriments et simuler des pratiques culturales du micro-maraîchage bio-intensif. La fauche de la phacélie correspond au t₁ de l'expérimentation, date à laquelle a été réalisé un nouvel échantillonnage de la couche organo-minérale des Technosols en vue d'évaluer leur fertilité (figure 8).

Pour discuter les résultats obtenus sur les deux Technosols construits, ces essais culturaux et les analyses qui y sont associées ont également été réalisés sur un sol témoin

cultivé selon les principes du micro-maraîchage bio-intensif. Il s'agit du sol de la ferme maraîchère de Veolia qui est adjacente à la serre expérimentale. Les essais ont été réalisés sur une unique parcelle d'une surface de 1,2 m² (pour respecter la même surface que celle des Technosols construits), excluant ainsi la possibilité d'obtenir des valeurs moyennes ou des écarts types. Sur cette parcelle, la même quantité de phacélie (8,4 g) a été semée après avoir travaillé le sol de la même manière que pour les deux Technosols. Bien que le sol maraîcher regroupe plusieurs critères qui en font un excellent témoin, il convient de souligner les limites de ce sol en tant que tel. Ce sol naturel n'a pas été cultivé hors-sol, contrairement aux Technosols construits, et n'a donc pas été soumis aux mêmes conditions expérimentales. Bien qu'il ait été, à l'égard des Technosols construits, sous abri, le sol témoin n'a pas été disposé sous le même serre expérimentale, si bien qu'il peut avoir subi différentes variations de température et d'humidité. Soulignons cependant qu'il a été veillé à ce que le sol témoin bénéficie des mêmes modalités d'irrigation (en évaluant au préalable sa capacité maximale de rétention en eau de 360 g kg⁻¹). Malgré les limites évidentes énumérées, les caractéristiques du sol témoin ont permis de réaliser des comparaisons pertinentes avec les Technosols construits et de mieux comprendre leurs propriétés et leur évolution.

2.4.1.1. Caractérisation de la fertilité des Technosols construits

2.4.1.1.1. Déterminations analytiques en fonction des matrices étudiées

a) Technosols

Les échantillons des couches constitutives des Technosols construits (prélevés en triplicats pour les formulations minérales et en 6 réplicats pour les couches organo-minérales) lors de leur mise en place à t_0 ont été analysés. Les déterminations ont porté sur la granulométrie, le pH eau, les teneurs en CaCO₃ total et actif, la conductivité électrique (CE), le P₂O₅ assimilable, la CEC et les cations échangeables, les teneurs en Fe, Al, Mn totaux et libres. Pour les couches organo-minérales, ont été aussi déterminées les teneurs en carbone organique total, l'azote total, la respirométrie et les activités biologiques (enzymatiques et fongiques). Pour ces couches, les mêmes déterminations ont été réalisées à t_1 sur six réplicats (soit à $t_0 + 42$ jours).

Le tassement des matériaux constituant les Technosols a aussi été évalué après les apports successifs en eau et avant la mise en place de la phacélie. Le tassement a été déterminé en mesurant la différence entre la hauteur initiale des Technosols et leur hauteur à l'issue de leur irrigation progressive.

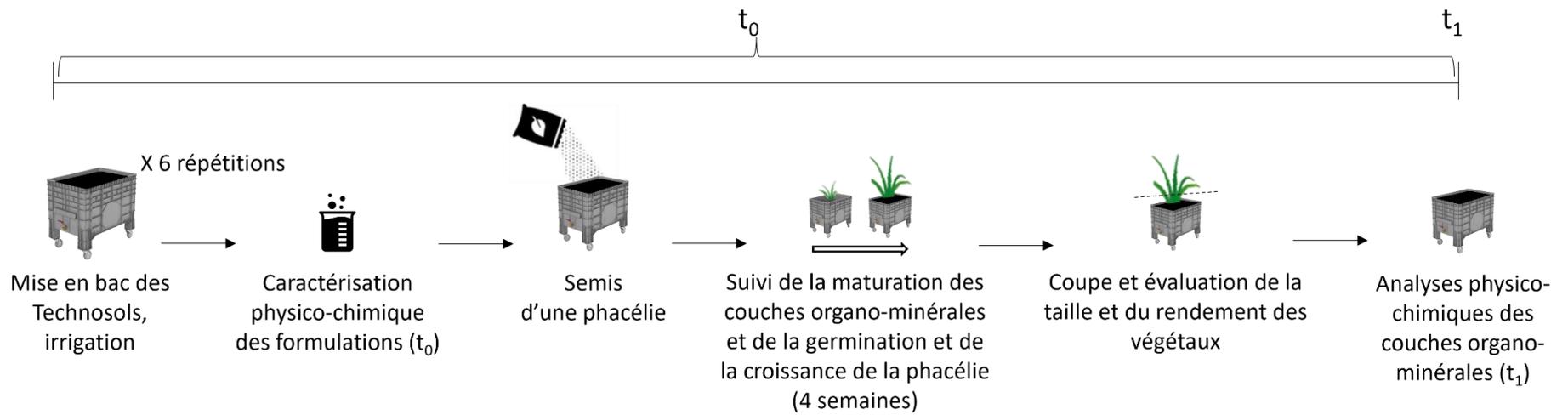


Figure 8 : Schéma de la démarche expérimentale relative à la conception des Technosols, mettant en avant les étapes t_0 à t_1

L'ensemble des normes utilisées pour la réalisation des déterminations analytiques est listé dans le tableau 17. Les analyses des teneurs en Fe, Al et Mn libres et totaux, de respirométrie et des activités biologiques se sont appuyées sur différentes méthodologies analytiques qui ont été adaptées. L'ensemble des protocoles utilisés sont décrits en annexe 3.

Tableau 17 : Normes détaillant les protocoles pour l'analyse des différents indicateurs renseignant sur la fertilité des Technosols construits

Analyse	Norme employée
Granulométrie (5 fractions – sans décarbonatation)	ISO 11277
pH eau	NF ISO 10390
CE	NF ISO 11265
CaCO ₃ total	NF ISO 10693
CaCO ₃ actif	NF X 31-106
C organique	NF ISO 14235
N total	NF ISO 13878 (méthode Dumas)
CEC et cations échangeables	ISO 11260
P ₂ O ₅ assimilable	NF X 31-161 (méthode Joret-Hébert)
Fe, Al, Mn totaux	Minéralisation puis dosage au SAA (AA-6800, Shimadzu)
Fe, Al, Mn libres	D'après Mehra Jackson (1960) et adaptation par le laboratoire d'analyse des sols de l'INRAE d'Arras puis dosage au SAA (AA-6800, Shimadzu)
Respirométrie	ISO 16072
Activités enzymatiques	Par libération de la fluorescéine d'après Green <i>et al.</i> , 2006
Biomasse moléculaire fongique	Par quantification de l'ergostérol d'après Gong <i>et al.</i> , 2001

b) Phacélie

- Contenu en chlorophylles et en polyphénols

La phacélie a fait l'objet d'une analyse du contenu en chlorophylle et en polyphénols épidermiques une fois sa maturité atteinte. Ces indicateurs permettent d'évaluer l'état de santé général de la plante analysée puisqu'ils sont étroitement liés à son activité photosynthétique. La chlorophylle est notamment à l'origine de l'absorption de lumière avant conversion en énergie. La mesure de la teneur en chlorophylle foliaire permet ainsi indirectement de quantifier l'azote. La teneur en azote des végétaux peut par ailleurs être appréhendée par l'analyse des flavonoïdes. En effet, ceux-ci sont une catégorie de composés phénoliques dont les teneurs sont étroitement corrélées à la teneur en azote des végétaux. Une carence en azote est généralement à l'origine d'une augmentation du contenu en flavonoïdes foliaires. Parmi les flavonoïdes, les flavonols sont majoritairement synthétisés après une exposition lumineuse. Les anthocyanes assurent quant à elles la protection des végétaux du rayonnement ultraviolet. Leur analyse respective illustre la qualité des interactions entre les végétaux et la lumière.

Les mesures, qui ont concerné 30 plantules de phacélie par mésocosme et par surface cultivée du sol témoin (n = 180), ont été réalisées à l'aide d'un capteur Dualex Scientific (FORCE-A, Orsay, France). L'appareil est muni d'une pince à appliquer sur une feuille pour effectuer les mesures. Il renvoie directement le contenu en chlorophylle en $\mu\text{g cm}^{-2}$, en flavonols et anthocyanes en unité d'absorbance relative sur des échelles respectives de 0 à 3 et de 0 à 1,5, et l'indicateur de statut azoté (Nitrogen Balanced Index – NBI) qui correspond

au rapport entre les teneurs en chlorophylle et en flavonols. Les mesures ont été réalisées la veille de la fauche du végétal (t_1).

- Composition minérale

La composition minérale des cultures est une analyse complémentaire aux paramètres physico-chimiques et biologiques des sols. Elle permet notamment d'observer si le végétal cultivé a reçu une nutrition adaptée à ses besoins et d'identifier des éventuelles carences en nutriments.

Sur l'ensemble des échantillons de phacélie ($n = 3$) ont été mesurées les teneurs totales en éléments majeurs (N, K, P, Ca, Mg, Na totaux) et en oligo-éléments (B, Cu, Fe, Mn, et Zn). Les échantillons prélevés ont été séchés (40°C), broyés à $250\ \mu\text{m}$ puis confiés à la SADEF pour analyse (extraction par voie sèche à l'acide fluorhydrique et dosage en ICP AES (NF X 31-147 1996) ; ISO 14869-1)). L'ensemble des résultats a été exprimé respectivement en g kg^{-1} et en mg kg^{-1} de poids sec (PS).

2.4.1.1.2. Analyses statistiques

Les analyses statistiques ont été réalisées au moyen du logiciel XLSTAT. Pour chaque variable, la moyenne et l'écart-type ont été mesurés grâce aux répétitions expérimentales.

Les caractéristiques (physico-chimiques et biologiques) des Technosols construits ont été comparées au regard de leurs moyennes, ceci dans le but d'identifier les différences entre les deux Technosols. Les données collectées ont été confrontées entre les deux Technosols à t_0 et à t_1 au moyen du test de Student après avoir vérifié que les conditions d'application du test (égalité des variances et normalité des résidus) étaient respectées. L'évolution des Technosols entre t_0 et t_1 a également été observée en appliquant le test de Student pour échantillons appariés.

Pour comparer les données des Technosols construits aux données disponibles sur les sols de référence et le sol témoin, des ANOVA et tests post-hoc de Tukey ont été réalisés sur l'ensemble des variables considérées après avoir vérifié que les conditions d'application des tests (égalité des variances et normalité des résidus) étaient respectées.

Les différences ont été considérées comme significatives à $\alpha = 0,05$.

2.4.1.1.3. Effets des interactions précoces entre les constituants des Technosols et la phacélie sur la fertilité des Technosols construits

La fertilité des deux Technosols construits a été évaluée durant les 9 semaines qui séparent la constitution des Technosols et la récolte de la phacélie (3 semaines de stabilisation des matériaux avec irrigation, suivies de 6 semaines de culture). Il a été examiné, d'une part,

les paramètres physico-chimiques et biologiques des couches minérales (t_0) et organo-minérales (t_0 et t_1) et, d'autre part, des informations acquises sur la phacélie.

Dans les paragraphes ci-dessous, sont nommés TB, le Technosol construit au moyen de formulations intégrant de la bentonite et T, le Technosol sans bentonite et témoin le sol maraîcher cultivé par Veolia.

2.4.1.1.3.1. Caractéristiques des couches organo-minérales à t_0

a) Paramètres physico-chimiques

Les granulométries des deux couches organo-minérales de surface, présentées dans le tableau 18, sont proches de celles estimées sur la base des caractéristiques des matériaux parents. En ce qui concerne les couches organo-minérales, des différences ont été observées selon la présence ou non de bentonite. Elles ne sont toutefois significatives que pour la teneur en argile avec 19,2 % pour TB et 8,5 % pour T. Pour les deux Technosols, les teneurs en limons ont été comprises entre 16,9 et 18,5 % pour TB contre 20,3 et 21,7 % pour T ; celles en sables entre 19,8 et 26,2 % pour TB contre 24,2 et 25,4 % pour T.

Les teneurs en limon fin des deux Technosols (en moyenne 22,2 % pour TB et 21,7 % pour T) ont avoisiné celles des références définies précédemment (23 %). Les teneurs moyennes en sable fin des deux Technosols excédaient largement la valeur de référence ($34,9 \pm 0,0$ % pour TB et $37,9 \pm 0,0$ % pour T contre 9 % pour la référence). Un constat similaire a été observé pour le sable grossier ($10,3 \pm 0,0$ % pour TB et $11,8 \pm 0,0$ % pour T contre 1 % pour la référence). En revanche, les teneurs moyenne en limon grossier étaient inférieures à la valeur de référence ($13,5 \pm 0,0$ % pour TB et $20,2 \pm 0,01$ % pour T contre 42 % pour la référence). Il en a été de même pour la teneur en argile de T ($8,5 \pm 0,0$ % contre 25 % pour la référence). Pour TB, la teneur en argile ($19,2 \pm 0,0$ %) a avoisiné la valeur de référence.

Tableau 18 : Répartition des différentes fractions granulométriques des couches organo-minérales de surface des deux Technosols construits à leur mise en place (t_0)

	Argile ($<2 \mu\text{m}$) (%)	Limon fin ($2 - 20 \mu\text{m}$) (%)	Limon grossier ($20 - 50 \mu\text{m}$) (%)	Sable fin ($50 - 200 \mu\text{m}$) (%)	Sable grossier ($> 200 \mu\text{m}$) (%)
TB	$19,2 \pm 0,0$ *	$22,2 \pm 0,0$	$13,5 \pm 0,0$	$34,9 \pm 0,0$	$10,3 \pm 0,0$
T	$8,5 \pm 0,0$	$21,7 \pm 0,1$	$20,2 \pm 0,1$	$37,9 \pm 0,0$	$11,8 \pm 0,0$
Valeurs guides des sols naturels de référence	25	23	42	9	1

TB, le Technosol avec bentonite, T, le Technosol sans bentonite ; * indique une différence significative entre les deux couches organo-minérales de surface des Technosols construits au regard du paramètre observé ; (n = 6 ; moyenne \pm ET ; test t de Student de comparaison de moyennes).

Les teneurs en CaCO_3 total ont été élevées quel que soit le Technosol. Elles ont toutefois été significativement différentes : respectivement $59,3 \pm 0,0$ % pour TB contre $71,8 \pm 0,05$ % pour T (tableau 19). Ces valeurs étaient très supérieures à celles du sol du MIN (2,7 %), des sols lœssiques du Nord-Pas de Calais (20 à 25 %) et du Marais audomarois (20 %).

Ces caractéristiques ont conféré à TB une texture (GEPPA) sablo argilo-limoneuse calcaire et à T une texture limono-sableuse calcaire (Baize & Jabiol, 1995). Au bilan, si les teneurs en sables excédaient les valeurs de référence, elles sont restées en cohérence avec celles de sols en maraîchage (Esoma Okothomas, 2019 ; Kouakou *et al.*, 2008 ; Lamy *et al.*, 2006 ; Ondo, 2011). Par ailleurs, il est à supposer que les matériaux organiques parents des Technosols favorisent l'agrégation et améliorent la structure du sol, ce qui diminue leur risque d'érodibilité liée aux importantes proportions de sables (Esoma Okothomas, 2019).

Les parts de CaCO_3 actif des couches organo-minérales se sont avérées très élevées (tableau 19). Elles étaient légèrement supérieures pour T ($8,4 \pm 0,03$ % contre $5,1 \pm 0,03$ % pour TB) bien que l'analyse statistique n'ait pas mis en évidence de différence significative.

Les deux Technosols construits ont présenté un pH alcalin : $8,34 \pm 0,22$ pour TB et $8,53 \pm 0,11$ pour T. Ces valeurs sont légèrement supérieures aux valeurs de référence (entre 6,5 et 7,5) mais très proches du pH du sol de la ferme cultivée par Veolia ($8,2 \pm 0,21$).

Les valeurs moyennes de la conductivité électrique étaient de $1250 \mu\text{S cm}^{-1}$ pour TB et $1410 \mu\text{S cm}^{-1}$ pour T sans que l'analyse statistique ne montre de différence. Au regard des classes établies par Durand (1983), TB et T appartiennent à la classe des sols salés (entre 1000 et $2000 \mu\text{S cm}^{-1}$). Si les végétaux ont besoin de sels solubles pour assurer leur bon développement, certains légumes (e.g. céleri, haricot, laitue, pois, radis) sont plus sensibles à une conductivité trop importante puisque les teneurs excédentaires en sels au niveau de leurs zones racinaires réduisent leur croissance en modifiant notamment leur capacité à absorber l'eau du sol. La salinité des sols peut aussi impacter la croissance des végétaux en augmentant la pression osmotique du sol et en réduisant la capacité des végétaux à prélever les nutriments essentiels à leur développement. Des seuils de tolérance des cultures maraîchères ont été établis au regard de la salinité des sols. Les cultures les plus sensibles (aubergine, fraise, haricot, melon) ont un seuil fixé à $1000 \mu\text{S cm}^{-1}$ au-delà duquel leur rendement peut être affecté (Machado & Serralheiro, 2017). La plupart des cultures s'accommode de milieux dont la conductivité électrique ne dépasse pas $2000 \mu\text{S cm}^{-1}$ (Maynard *et al.*, 2007). Ainsi, bien que salés selon la classification, TB et T ont présenté des conductivités électriques compatibles avec une activité maraîchère.

Les teneurs en matière organique ($4,07 \pm 0,01$ % pour TB et $4,23 \pm 0,01$ % pour T) étaient très proches de la valeur de référence à 5 %. En revanche elles étaient inférieures à celle du sol témoin cultivé par Veolia ($7,9 \pm 4,3$ %).

Tableau 19 : Valeurs des paramètres physiques, chimiques et biologiques associés à la fertilité des couches organo-minérales des deux Technosols à leur mise en place (t_0)

Paramètres à t_0	Couches organo-minérales de surface	
	TB	T
pH	8,34 ± 0,22	8,53 ± 0,11
CE ($\mu\text{S cm}^{-1}$)	1250 ± 270	1410 ± 264
CaCO ₃ total (g kg^{-1})	593 ± 36	718 ± 53 *
CaCO ₃ actif (g kg^{-1})	51 ± 27	84 ± 27
MO (%)	4,1 ± 0,0	4,2 ± 0,0
C organique total (g kg^{-1})	23,5 ± 5,1	24,4 ± 3,1
N total (g kg^{-1})	2,17 ± 0,42	1,83 ± 0,22
C/N	10,8 ± 0,8	13,4 ± 1,1 *
CEC ($\text{cmol}^+ \text{kg}^{-1}$)	7,51 ± 3,07 *	2,94 ± 3,07
P ₂ O ₅ assimilable (g kg^{-1})	0,51 ± 0,19	0,41 ± 0,12
K ₂ O (g kg^{-1})	1,70 ± 0,25	1,53 ± 0,40
MgO (g kg^{-1})	0,80 ± 0,17 *	0,31 ± 0,06
Na ₂ O (g kg^{-1})	0,38 ± 0,06 *	0,28 ± 0,04
CaO (g kg^{-1})	2,5 ± 0,5 *	1,7 ± 0,2
Fer total (mg kg^{-1})	14828 ± 2785 *	9100 ± 489
Aluminium total (mg kg^{-1})	13701 ± 4872 *	3592 ± 318
Manganèse total (mg kg^{-1})	248 ± 38 *	168 ± 7
Fer libre (mg kg^{-1})	483 ± 63	402 ± 91
Aluminium libre (mg kg^{-1})	141 ± 40 *	74 ± 17
Manganèse libre (mg kg^{-1})	51 ± 14 *	17 ± 1
Respiration sol ($\text{mg kg}^{-1} \text{O}_2 \text{j}^{-1}$)	366 ± 121	352 ± 94
Ergostérols ($\mu\text{g g}^{-1} \text{sol sec}$)	2,27 ± 0,94	1,53 ± 0,52
FDA ($\text{nmol g}^{-1} \text{sol min}^{-1}$)	2,16 ± 1,03	1,65 ± 0,94

TB, avec bentonite ; T, sans bentonite ; * indique une différence significative au regard des tests statistiques (n = 6 ; moyenne ± ET) entre les couches organo-minérales de surface des deux Technosols à leur mise en place (t_0).

Les teneurs en N total ont été de $2,17 \pm 0,42 \text{ g kg}^{-1}$ pour TB et de $1,83 \pm 0,22 \text{ g kg}^{-1}$ pour T. Comme pour les teneurs en MO, les teneurs en N total sont étroitement corrélées à la part de matériaux parents organiques en mélange. Bien que les teneurs en N total et en C organique ne soient pas significativement différentes entre T et TB, le rapport C/N diffère significativement entre les deux Technosols ($13,4 \pm 1,10$ pour T contre $10,8 \pm 0,76$ pour TB). Au regard des écart-types, il peut être considéré que les C/N des deux Technosols s'inscrivent dans la gamme de valeurs souhaitée (9-12) et sont proches du C/N du sol de la ferme Veolia ($11,7 \pm 0,7$). D'une façon générale, un C/N compris entre 10 et 15 atteste un bon degré de fertilité des sols.

Pour les deux Technosols, les teneurs en P_2O_5 assimilable se sont montrées très supérieures à la gamme de valeurs souhaitée (plus de $0,15 \text{ g kg}^{-1}$ contre $0,51 \pm 0,19 \text{ g kg}^{-1}$ pour TB et $0,41 \pm 0,12 \text{ g kg}^{-1}$ pour T).

À contrario, les CEC des Technosols ont été bien en deçà des valeurs espérées qui devaient être supérieures à 20 cmol+ kg^{-1} . Or, quel que soit le Technosol, elles ont été inférieures à 10 cmol+ kg^{-1} et des différences significatives ont été notées avec $7,51 \pm 3,07 \text{ cmol+ kg}^{-1}$ pour TB et $2,94 \pm 3,07 \text{ cmol+ kg}^{-1}$ pour T. La teneur en CaO de TB ($2,53 \pm 0,49 \text{ g kg}^{-1}$) s'inscrit dans la gamme de valeurs souhaitée (entre 2,5 et $4,38 \text{ g kg}^{-1}$). En revanche, ce n'est pas le cas pour T ($1,67 \pm 0,18 \text{ g kg}^{-1}$). La teneur en MgO est conforme pour T ($0,31 \pm 0,06 \text{ g kg}^{-1}$ alors que la valeur de référence est comprise entre 0,22 et $0,52 \text{ g kg}^{-1}$). Pour TB, la teneur en MgO a excédé nettement la valeur visée avec $0,80 \pm 0,17 \text{ g kg}^{-1}$. Les teneurs en K_2O pour TB et T ont été respectivement de $1,70 \pm 0,25 \text{ g kg}^{-1}$ et $1,53 \pm 0,40 \text{ g kg}^{-1}$. Celles-ci excèdent très fortement la valeur de référence ($> 0,16 \text{ g kg}^{-1}$). Les teneurs en Na_2O ont différencié significativement avec $0,38 \pm 0,06 \text{ g kg}^{-1}$ pour TB contre $0,28 \pm 0,04 \text{ g kg}^{-1}$ pour T. Les résultats obtenus sur la CEC interpellent par leur faiblesse avec cependant une influence favorable de la bentonite expliquée par des teneurs en CaO, MgO et Na_2O plus élevées dans TB.

Les teneurs en Fe, Al, Mn totaux étaient significativement plus élevées dans TB avec respectivement $14828 \pm 2785 \text{ mg kg}^{-1}$, $13701 \pm 4872 \text{ mg kg}^{-1}$ et $248 \pm 38 \text{ mg kg}^{-1}$ contre $9100 \pm 489 \text{ mg kg}^{-1}$, $3592 \pm 318 \text{ mg kg}^{-1}$ et $168 \pm 7 \text{ mg kg}^{-1}$ pour T. Quel que soit le Technosol, les teneurs en Fe, Al et Mn totaux étaient inférieures à celles observées dans les sols loessiques régionaux (respectivement de 21100 mg kg^{-1} , 41600 mg kg^{-1} et 609 mg kg^{-1}). Les teneurs en Fe et Mn des Technosols étaient également inférieures à celles du sol de la ferme de Veolia (respectivement 22398 mg kg^{-1} et 336 mg kg^{-1}). En revanche, les teneurs en Al total de TB avoisinaient celles de ce sol dont la valeur était de 13044 mg kg^{-1} .

Au regard des teneurs totales, les parts de Fe, Al et Mn libres représentaient respectivement 3,26, 1,03 et 20,56 % pour TB et 4,42, 2,06 et 10,12 % pour T. Les valeurs libres de TB avoisinaient davantage la valeur moyenne des sols maraîchers du Marais Audomarois (lesquelles étaient de 15100 mg kg⁻¹, d'après Servant et Barthès, (1973)). Les teneurs en Fe et Mn libres des Technosols étaient inférieures à celles du sol de la ferme de Veolia (respectivement 1305 mg kg⁻¹ et 129 mg kg⁻¹). Celles en Fe libre pour les Technosols l'ont aussi été par rapport aux sols cultivés dans le Marais Audomarois (6600 mg kg⁻¹).

b) Activités biologiques

Les activités biologiques dans les couches organo-minérales des Technosols à t₀ ont été évaluées au moyen de la respirométrie basale, des activités enzymatiques⁷ et des biomasses moléculaires fongiques⁸. La respiration basale des sols est un indicateur de mesure indirecte de l'activité biologique (Prosser, 1997). Il s'agit de la mesure totale des activités des micro-organismes du sol qui renseigne sur le fonctionnement du sol et, de manière intrinsèque, sur son degré de fertilité. La caractérisation des activités enzymatiques du sol permet d'en évaluer le fonctionnement et d'en estimer le potentiel biologique. Les enzymes du sol sont principalement synthétisées par les micro-organismes qu'il abrite. Lorsqu'elles sont formées, les enzymes participent à différents processus biochimiques tels que la minéralisation ou encore la décomposition de la matière organique. Les activités enzymatiques sont d'ailleurs réputées pour être très sensibles aux perturbations de leur milieu et sont, de ce fait, utilisées comme indicateur des pressions naturelles ou anthropiques (Schloter *et al.*, 2003). L'étude des activités enzymatiques permet ainsi d'appréhender la fertilité d'un milieu. Les champignons sont les micro-organismes prévalents en nombre et en masse dans les sols et participent à la dégradation de la matière organique. La détermination de la biomasse moléculaire fongique est particulièrement préconisée pour juger de l'état microbiologique du milieu étudié et, de manière indirecte, de son fonctionnement.

Les trois paramètres n'ont pas différencié pas selon les deux Technosols. La respirométrie moyenne était de 366 ± 121 mg O₂ kg⁻¹ j⁻¹ pour TB contre 352 ± 94 mg O₂ kg⁻¹ j⁻¹ pour T. Ces valeurs sont significativement supérieures à celles du sol de la ferme Veolia (233 ± 21 mg O₂ kg⁻¹ j⁻¹) et sont inférieures à la valeur moyenne des sols cultivés établie dans le cadre du programme Bioindicateurs de l'ADEME qui est de 486,5 ± 252,2 mg O₂ kg⁻¹ j⁻¹. Bien qu'il n'y ait pas de différence significative entre les Technosols et le sol témoin cultivé par Veolia, il est à souligner l'importance des écarts-types des valeurs de respirométrie des Technosols. Au regard de ces résultats, la matière organique des Technosols a présenté une

⁷ Mesurées à travers la libération de fluorescéine

⁸ Évaluées par quantification de l'ergostérol

certaine hétérogénéité. Elle a cependant été accessible aux différents micro-organismes dans son ensemble.

Les activités enzymatiques globales (estérases, lipases, protéases) moyennes ont été de $2,16 \pm 1,03 \text{ nmol g}^{-1} \text{ sol min}^{-1}$ pour TB contre $1,65 \pm 0,94 \text{ nmol min}^{-1} \text{ g}^{-1} \text{ sol}$ pour T. Elles étaient légèrement plus élevées que celles du sol de la ferme de Veolia ($1,19 \pm 0,23 \text{ nmol min}^{-1} \text{ g}^{-1} \text{ sol}$ de FDA) et étaient très inférieures à la moyenne des sols cultivés du programme Bioindicateurs de $18,59 \pm 30,61 \text{ nmol min}^{-1} \text{ g}^{-1} \text{ sol}$.

La biomasse moléculaire fongique était de $2,27 \pm 0,94 \text{ } \mu\text{g g}^{-1}$ pour TB et de $1,53 \pm 0,52 \text{ } \mu\text{g g}^{-1}$ pour T. Comme pour la respiration basale et pour les activités enzymatiques, ces valeurs sont légèrement supérieures à celle de la ferme cultivée par Veolia ($1,08 \pm 0,14 \text{ } \mu\text{g g}^{-1}$ de sol sec) sans que cette différence ne soit significative au regard des tests statistiques appliqués. La biomasse moléculaire fongique des sols cultivés analysés dans le cadre du programme Bioindicateurs est proche des Technosols avec une valeur de $2,71 \pm 1,68 \text{ } \mu\text{g g}^{-1}$.

Étant donné leur composition similaire en matériaux organiques parents (même nature et même quantité), il était supposé que les Technosols ne présenteraient pas de différences au regard des trois paramètres sélectionnés pour témoigner de leur activité biologique à leur mise en place. L'hypothèse de départ a donc été validée. Les deux Technosols ont montré des valeurs légèrement supérieures à celles du sol témoin cultivé par Veolia. Ces résultats traduisent une activité microbienne plus importante dans TB et T, très certainement expliquée par l'incorporation de matière organique fraîche dans les mélanges, qui est connue pour améliorer l'activité des micro-organismes (Debosz *et al.*, 2002). De plus, la respiration basale et la biomasse moléculaire fongique de TB et T ont approché la moyenne des sols cultivés établie dans le cadre du programme Bioindicateurs de l'ADEME. Ces résultats traduisent qu'à la mise en place des couches organo-minérales de surface des Technosols construits, les activités des micro-organismes sont comparables à celles de sols cultivés français (sur une moyenne de 82 sols cultivés analysés dans le cadre du programme Bioindicateurs). Ces valeurs ont été observées dans le temps puisque ces indicateurs biologiques présentent une réponse rapide à une perturbation de l'environnement. Par leur fonctionnement, ils renseignent également sur la qualité des sols. En revanche, à leur mise en place, la moyenne des activités enzymatiques des Technosols était très largement inférieure à celle des sols cultivés analysés dans le cadre du programme Bioindicateurs. Cette information est à modérer puisqu'il n'existe pas de valeurs optimales auxquelles se référer dans la mesure où ce paramètre varie considérablement en fonction de l'usage du sol, de sa couverture végétale ou encore des pratiques culturales adoptées sur la parcelle analysée. Il

semble d'ailleurs nécessaire de noter l'importance des valeurs des écart-types de ce paramètre parmi les sols cultivés observés dans le cadre du programme Bioindicateurs qui témoigne de la grande disparité des sols cultivés au regard de ce seul paramètre. Si les valeurs moyennes de la respiration basale, de la biomasse moléculaire fongique et des activités enzymatiques des couches organo-minérales de TB et de T se sont inscrites dans les valeurs de référence en approchant celles du sol cultivé par Veolia, il est à souligner l'importance de leurs écart-types qui atteste d'une forte variabilité intra-échantillon pour TB et T. Il est également supposé que l'importance des valeurs de ces trois paramètres pour TB et T à leur mise en place serait liée à un apport de matière fraîche (MO majoritairement solides, de granulométrie grossière et assez hétérogènes). Ces valeurs pourraient être amenées à décroître à mesure que la matière organique serait dégradée par les micro-organismes du sol. L'utilisation des protocoles est aussi à questionner puisque ces derniers sont établis pour des sols naturels et ne permettent peut-être pas d'acquérir des résultats optimaux sur des Technosols immédiatement après leur mise en place. En effet, ces derniers sont encore très hétérogènes et peuvent varier considérablement en fonction de la prise d'essai relativement faible (e.g. la présence d'une proportion plus importante de MO dans un échantillon peut générer une grande variabilité intra-échantillon). À notre connaissance, ces protocoles n'ont d'ailleurs jamais été utilisés sur des Technosols construits.

2.4.1.1.3.2. Caractéristiques des couches minérales à t_0

Les couches minérales des deux Technosols ont présenté des pH alcalins avec des valeurs similaires entre elles ($8,80 \pm 0,06$ pour TB contre $8,81 \pm 0,09$ pour T) (tableau 20). Ces résultats sont à mettre en parallèle avec les teneurs en CaCO_3 totales très élevées ($65,7 \pm 0,0$ % pour TB et $79,1 \pm 0,02$ % pour T) mais aussi importantes en CaCO_3 actif ($7,9$ % pour TB et $9,9$ % pour T). Qu'il s'agisse des teneurs en CaCO_3 total ou actif, les deux Technosols ont différencié significativement avec des teneurs en carbonates supérieures dans T, expliquées par des pourcentages de filler plus importants dans sa composition. La composition de la couche minérale de profondeur, exclusivement élaborée à partir de matériaux minéraux alcalins, explique les valeurs supérieures de ces trois paramètres dans les couches de profondeur de TB et de T par rapport à leurs couches de surface.

Les conductivités électriques moyennes des deux Technosols ont été de $244 \pm 15 \mu\text{S cm}^{-1}$ pour TB et de $262 \pm 15 \mu\text{S cm}^{-1}$ pour T. Ces valeurs ne présentent pas de différence significative et sont très inférieures à celles des couches organo-minérales (ratio de 1 à 5). La conductivité électrique des couches minérales de profondeur est plus proche du sol témoin de la ferme de Veolia dont la valeur est de $331 \pm 6 \mu\text{S cm}^{-1}$. Comme pour les paramètres précédents, ce constat est à mettre en relation avec la présence de matière organique dans les couches de surface à des conductivités élevées, notamment pour le fumier de cheval

composté et pour les fientes de volailles (respectivement 13052 ± 2578 et $10473 \pm 905 \mu\text{S cm}^{-1}$) et moindre pour le compost de déchets verts ($3657 \pm 469 \mu\text{S cm}^{-1}$). De manière générale, les matières organiques ont tendance à augmenter la salinité des sols. La salinité et la conductivité électrique des matières organiques évoluent d'ailleurs positivement à mesure que la minéralisation s'opère (Koull & Halilat, 2016 ; Francou, 2003). La conductivité électrique étant étroitement corrélée aux matières organiques en présence, il est à supposer qu'au fur et à mesure de leur dégradation et de l'évolution des Technosols, ces derniers atteindront un état d'équilibre avec des valeurs de conductivité électrique plus faibles. Ce postulat sera néanmoins à vérifier en tenant compte des pratiques du micro-maraîchage bio-intensif mises en place, lesquelles visent à restituer les résidus culturaux au sol et à introduire l'application de différents amendements organiques dans la rotation culturale en fonction des saisons.

Les couches minérales des deux Technosols ont différencié significativement au regard de leur CEC ($19,8 \pm 1,7 \text{ cmol}^+ \text{ kg}^{-1}$ pour TB et $13,5 \pm 2,0 \text{ cmol}^+ \text{ kg}^{-1}$ pour T). Ceci s'explique par la capacité d'adsorption des smectites dans TB. Par ailleurs, ces CEC sont considérablement plus élevées que celles des couches organo-minérales. Il est émise l'hypothèse selon laquelle les matériaux organiques apportés lors de l'élaboration des couches de surface pourraient favoriser, de par leur charge négative, l'adsorption des cations Ca^{2+} et Mg^{2+} , très largement présents. Ainsi en comparaison des couches organo-minérales, TB et T ont présenté en profondeur des teneurs considérablement plus importantes en CaO (respectivement $18,3 \pm 3,4$ et $23,7 \pm 3,3 \text{ g kg}^{-1}$ et $2,5 \pm 0,5$ et $1,7 \pm 0,2 \text{ g kg}^{-1}$ en surface). Il en a été de même pour MgO avec, respectivement, pour TB et T : $1,04 \pm 0,07$ et $0,64 \pm 0,03 \text{ g kg}^{-1}$ et $0,80 \pm 0,17$ et $0,31 \pm 0,06 \text{ g kg}^{-1}$). À l'inverse, les teneurs en K_2O étaient inférieures dans les couches minérales de profondeur pour TB et T avec, respectivement, $0,31 \pm 0,03$ et $0,15 \pm 0,00 \text{ g kg}^{-1}$ et $1,70 \pm 0,25$ et $1,53 \pm 0,40 \text{ g kg}^{-1}$ en surface. Il en a été de même pour Na_2O avec $0,15 \pm 0,01$ et $0,06 \pm 0,00 \text{ g kg}^{-1}$ et $0,38 \pm 0,06$ et $0,28 \pm 0,04 \text{ g kg}^{-1}$ en surface. Cet enrichissement en K_2O et Na_2O pour les couches organo-minérales dans TB et T peut être expliqué par la présence de matières organiques, plus spécifiquement par la présence de fumier de cheval composté (cf. tableau 14). Les résultats montrent que les teneurs en éléments nutritifs ne sont pas négligeables. Elles pourraient aisément contribuer à l'alimentation minérale des végétaux présentant un enracinement profond.

Les teneurs en Fe, Al et Mn totaux ont différencié significativement dans les couches minérales des deux Technosols avec des valeurs plus importantes pour TB. Pour TB, les teneurs étaient de $16878 \pm 1462 \text{ mg kg}^{-1}$ de Fe total, $15484 \pm 1060 \text{ mg kg}^{-1}$ d'Al total, et $296 \pm 22 \text{ mg kg}^{-1}$ alors que celles de T étaient de $8660 \pm 225 \text{ mg kg}^{-1}$ de Fe total, $3538 \pm 288 \text{ mg kg}^{-1}$ d'Al total et $178 \pm 2 \text{ mg kg}^{-1}$ de Mn total. Ces différences statistiques ont également été mises en

évidence pour les formes libres de Al et Mn, avec des parts de 1 % d'Al et 22 % de Mn pour TB et de 2 % d'Al et 8 % de Mn pour T. En revanche, les parts de Fe libre des deux Technosols étaient très proches avec des teneurs de $479 \pm 16 \text{ mg kg}^{-1}$ pour TB et $432 \pm 30 \text{ mg kg}^{-1}$ pour T. À l'image des couches organo-minérales, les couches minérales des Technosols construits ont révélé des teneurs en Fe, Al, Mn totaux et libres inférieures à celles des sols de référence (sols loessiques régionaux et de la ferme de Veolia), excepté pour les teneurs en Al total de TB qui étaient supérieures à celle de la ferme témoin avec une valeur moyenne de 15484 mg kg^{-1} . Ces teneurs sont spécifiques aux matériaux parentaux et ne peuvent à elles seules suffire à conclure à une atténuation de la fertilité. En revanche, elles ont fait l'objet d'un suivi au sein des cultures afin de s'assurer que ces dernières n'avaient pas subi de carence en l'un de ces éléments.

Il est à noter que les caractéristiques présentées sur les couches minérales et organo-minérales correspondent à t_0 juste après l'élaboration des formulations, c'est-à-dire en l'absence de toute interaction physico-chimique.

Tableau 20 : Valeurs des paramètres physiques, chimiques et biologiques associés à la fertilité des couches minérales des deux Technosols à leur mise en place (t_0)

Paramètres	Couches minérales de profondeur	
	TB	T
pH	8,80 ± 0,06	8,81 ± 0,09
CE ($\mu\text{S cm}^{-1}$)	244 ± 15	262 ± 15
CaCO ₃ total (g kg^{-1})	657 ± 16 (B)	791 ± 17 (A)
CaCO ₃ actif (g kg^{-1})	52 ± 5 (B)	76 ± 9 (A)
MO (%)	nd	nd
C organique total (g kg^{-1})	nd	nd
N total (g kg^{-1})	nd	nd
C/N	nd	nd
CEC ($\text{cmol}^+ \text{kg}^{-1}$)	19,8 ± 1,7 (A)	13,5 ± 2,0 (B)
P ₂ O ₅ assimilable (g kg^{-1})	0,00 ± 0,00	0,00 ± 0,00
K ₂ O (g kg^{-1})	0,31 ± 0,03 (A)	0,15 ± 0,00 (B)
MgO (g kg^{-1})	1,04 ± 0,07 (A)	0,64 ± 0,03 (B)
Na ₂ O (g kg^{-1})	0,15 ± 0,01 (A)	0,06 ± 0,00 (B)
CaO (g kg^{-1})	18,3 ± 3,4	23,7 ± 3,3
Fer total (mg kg^{-1})	16878 ± 1462 (A)	8660 ± 225 (B)
Aluminium total (mg kg^{-1})	15484 ± 1060 (A)	3538 ± 288 (B)
Manganèse total (mg kg^{-1})	296 ± 22 (A)	178 ± 2 (B)
Fer libre (mg kg^{-1})	479 ± 16	432 ± 30
Aluminium libre (mg kg^{-1})	158 ± 27 (A)	65 ± 23 (B)
Manganèse libre (mg kg^{-1})	64 ± 6 (A)	14 ± 4 (B)
Respiration sol ($\text{mg kg}^{-1} \text{O}_2 \text{j}^{-1}$)	nd	nd
Ergostérols ($\mu\text{g g}^{-1} \text{sol sec}$)	nd	nd
FDA ($\text{nmol g}^{-1} \text{sol min}^{-1}$)	nd	nd

nd : non déterminé ; la présence d'une lettre majuscule indique une différence significative au regard des tests statistiques ($n = 3$; moyenne ± ET) entre les couches minérales de profondeur des deux Technosols.

2.4.1.1.3.3. Développement et composition de la phacélie

La germination et le développement de la phacélie ont fait l'objet d'un suivi. Une semaine après le semis, les deux Technosols présentait des différences significatives au regard du nombre moyen de plants ayant levé avec 59 ± 18 plants pour T et 102 ± 33 plants pour TB. La figure 9 illustre l'installation et le développement de la plante durant ces 42 jours.

Le 39^{ème} jour, les plants des Technosols en fleur ont été dénombrés. Il en résulte une différence significative avec en moyenne 32 ± 14 plants en fleur pour TB et 3 ± 3 pour T.

À la récolte (t_1 , soit 42 jours après le semis), il est apparu que la phacélie cultivée sur TB présentait un taux de couverture significativement plus élevé que sur T (respectivement $82 \% \pm 0,14$ contre $49 \% \pm 0,17$) comme le montrent les figures 9 et 10.

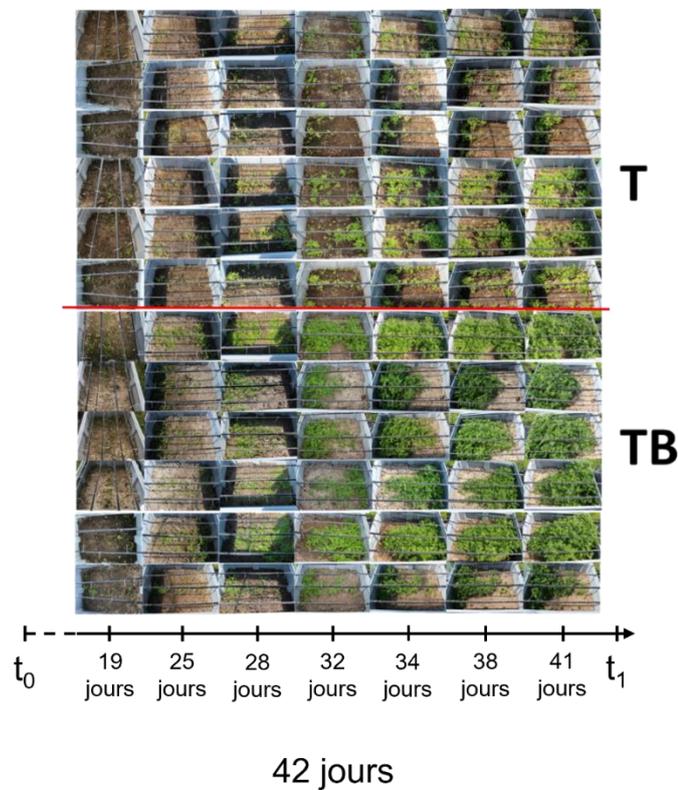


Figure 9 : Cinétique d'évolution du taux de couverture des mésocosmes par la phacélie sur 42 jours. TB, Technosol avec bentonite ; T, Technosol sans bentonite

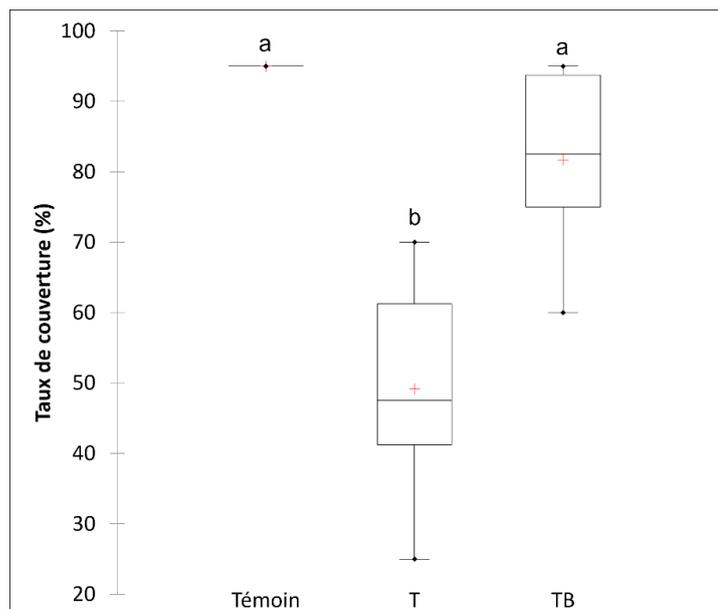


Figure 10 : Distribution statistique à t_1 du taux de couverture des phacélies sur le témoin (sol maraîcher cultivé par Veolia), T et TB (n = 6 ; moyennes \pm ET)

Sur chacun des containers, un échantillon de phacélie a été constitué sur lequel ont été mesurées la taille et la biomasse (figure 11). La figure 11A montre que les plantes ayant poussé sur TB sont plus grandes que celles issues de T (respectivement $52,1 \pm 9,7$ cm et $24,7 \pm 7,6$ cm). Ce constat est corroboré par la mesure des biomasses : 230 ± 97 g pour TB et 48 ± 26 g pour T (figure 11, B). Comparées à la biomasse cultivée sur le sol témoin ($3\ 732$ g), les biomasses de TB et T étaient considérablement plus faibles, le taux de couverture de TB était proche de celui du sol témoin (95 %), tandis que celui de T était très inférieur. La hauteur des parties aériennes différait significativement selon les trois supports cultureux, avec un niveau plus élevé au sein du sol témoin ($70,57 \pm 1,61$ cm), un niveau intermédiaire pour TB ($52,09 \pm 0,66$ cm) et un niveau plus bas pour T ($24,74 \pm 0,66$ cm).

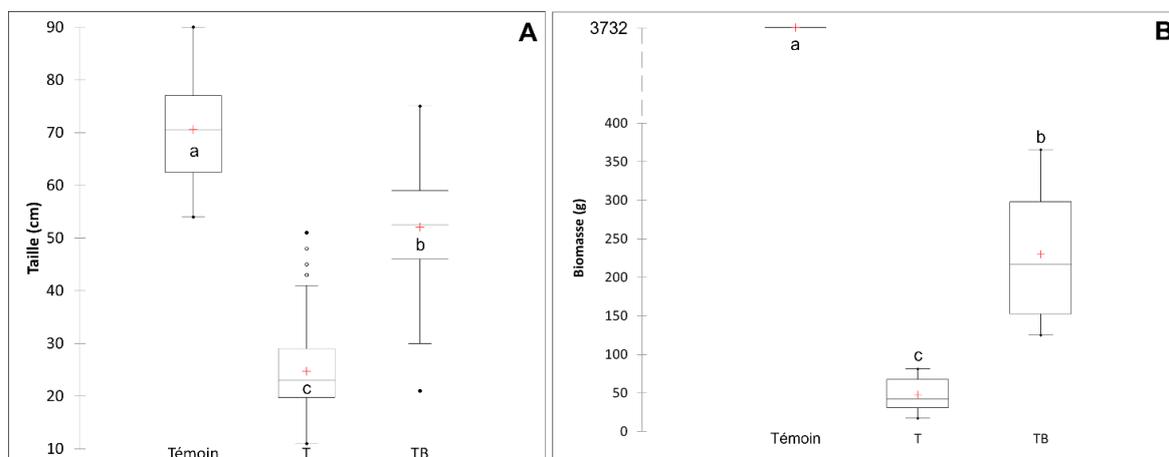


Figure 11 : Distributions statistiques (A) de la hauteur des parties aériennes de phacélie récoltées sur le témoin, TB et T (n = 180) et (B) des biomasses (PS) de phacélie récoltées au sein du témoin, TB et T (n = 6)

D'ordinaire, les indicateurs de l'activité photosynthétique et du statut azoté des végétaux sont observés sur les cultures alimentaires, notamment dans le but de détecter

d'éventuelles carences. Par conséquent, la phacélie n'a jamais été observée dans la littérature par rapport à ces paramètres puisqu'il s'agit d'un engrais vert destiné à améliorer la fertilité des sols et que ses caractéristiques physiologiques sont subsidiaires dans ce contexte. Pour cette étude, il a cependant été décidé de cultiver la phacélie sur le sol maraîcher témoin afin de bénéficier de valeurs comparatives. Ces indicateurs ont ainsi fait l'objet d'un suivi et ont été analysés le 35^{ème} jour de culture. Les données sont présentées dans le tableau 21.

Tableau 21 : Valeurs des indicateurs d'efficacité de l'activité photosynthétique de la phacélie en fonction de la modalité testée

Paramètres	TB	T	Témoin
Chlorophylle ($\mu\text{g cm}^{-2}$)	12,16 \pm 7,48 (a)	7,03 \pm 5,37 (b)	14,44 \pm 9,58 (a)
Anthocyanes	0,16 \pm 0,03 (b)	0,21 \pm 0,05 (a)	0,12 \pm 0,04 (c)
Flavonols	0,80 \pm 0,18 (b)	0,64 \pm 0,13 (c)	1,28 \pm 0,20 (a)
NBI	15,32 \pm 8,65 (a)	10,99 \pm 9,01 (b)	10,90 \pm 7,03 (b)

TB, Technosols avec bentonite ; T, Technosol sans bentonite ; NBI : Nitrogen Balance Index ; la présence d'une lettre indique une différence significative entre les modalités testées (TB, T et le témoin) ; (n = 180 ; moyenne \pm ET).

Les analyses montrent que les teneurs en chlorophylle a de TB (12,16 \pm 7,48 $\mu\text{g cm}^{-2}$) et du sol témoin (14,44 \pm 9,58 $\mu\text{g cm}^{-2}$) ne diffèrent pas significativement mais sont toutes deux significativement plus élevées que celle de T (7,03 \pm 5,37 $\mu\text{g cm}^{-2}$). Il est à supposer que la teneur en chlorophylle a de la phacélie a pu dépendre du substrat cultural, avec une meilleure disposition à assurer une activité photosynthétique au sein de TB et du témoin que dans T. Les teneurs plus élevées en chlorophylle a des phacélies issues du sol témoin et de TB suggèrent également un meilleur statut nutritionnel de ces cultures par rapport à celles cultivées sur T.

Les teneurs en anthocyanes des phacélies cultivées sur les trois sols d'étude ont différé significativement avec les valeurs suivantes par ordre croissant : 0,12 \pm 0,04 pour le témoin, 0,16 \pm 0,03 pour le TB et 0,21 \pm 0,05 pour le T. Sachant que (i) les niveaux d'anthocyanes diminuent à mesure que les niveaux de chlorophylle augmentent lors de la croissance foliaire (Moore, 1965) et (ii) que la collecte de données a été effectuée après la floraison, il est supposé que ces niveaux étaient parmi les plus bas du cycle végétal des phacélies cultivées sur le sol témoin et TB puisque ces dernières se sont mieux développées que celles produites sur T. Des teneurs élevées en anthocyanes peuvent également refléter un déficit en N et/ou P du sol. Les deux Technosols construits ne diffèrent pas significativement au regard de leurs teneurs en P₂O₅. En revanche, leurs valeurs sont significativement plus élevées que celle du sol témoin (0,15 g kg⁻¹). En conséquence, l'hypothèse d'un déficit en P au sein de T est rejetée. En ce qui concerne les teneurs en N, il est à noter des valeurs moyennes significativement plus élevées au sein du sol témoin que dans T. Si cette différence n'a pas été observée entre les deux Technosols construits, les valeurs de T au regard de ce paramètre sont plus faibles que celles de TB et pourraient être à l'origine d'une plus forte teneur en anthocyanes chez les

phacélie qui en sont issues. Il est ainsi envisagé que les plus faibles teneurs en N de T ont influencé ses teneurs plus importantes en anthocyanes.

Au même titre que les anthocyanes, les teneurs en flavonols des phacélie cultivées sur les trois sols étudiés ont différencié significativement avec les valeurs suivantes par ordre croissant : $0,64 \pm 0,13$ pour T, $0,80 \pm 0,18$ pour TB et $1,28 \pm 0,20$ pour le témoin. Ces résultats peuvent traduire une meilleure disposition de la phacélie à assimiler les éléments essentiels à son développement (notamment le carbone et l'azote) lorsqu'elle est cultivée sur le sol témoin. La teneur en flavonols dépend également du nombre de feuilles développées sur les tiges. En considérant l'évolution et le développement de la phacélie des trois sols d'étude, les teneurs en flavonols plus élevées dans les phacélie cultivées sur TB et le témoin pourraient s'expliquer par un meilleur développement foliaire des cultures sur ces sols par rapport à T au sein duquel le végétal a à peine atteint le stade de floraison. De plus, les flavonols épidermiques sont connus pour être positivement impactés par une carence en carbone et/ou en azote du sol (Abdallah *et al.*, 2016). Compte tenu de la différence significative entre les teneurs en flavonols des biomasses des trois sols d'étude, il était à envisager une différence significative entre leurs teneurs en carbone et en azote. Néanmoins, ces différences n'ont pas été observées et il s'est même avéré que le sol présentant les teneurs en N et C les plus élevées était le sol témoin (respectivement $3,93 \pm 0,09$ g kg⁻¹ et $45,87 \pm 2,46$ g kg⁻¹) qui présentait par ailleurs la biomasse aux plus fortes teneurs en flavonols. En l'état, ces résultats ne suffisent pas à exclure l'hypothèse d'une carence en azote dans la mesure où les analyses réalisées se rapportent aux teneurs totales du sol qui ne sont pas systématiquement disponibles pour les végétaux. En considérant les seuls Technosols construits, les teneurs en N total étaient plus élevées dans TB ($2,17 \pm 0,42$ g kg⁻¹) que dans T ($1,83 \pm 0,22$ g kg⁻¹), et la teneur en C organique était légèrement plus faible ($23,52 \pm 5,1$ g kg⁻¹ pour TB et $24,43 \pm 3,1$ g kg⁻¹ pour T), ce qui pourrait expliquer les teneurs en flavonols plus élevées dans TB.

Les indices de bilan azoté (NBI) des phacélie cultivées au sein des deux Technosols construits ont différencié significativement avec des valeurs de $15,32 \pm 8,65$ pour les phacélie issues de TB et de $10,99 \pm 9,01$ pour celles issues de T. Le score des phacélie de T n'a pas différencié de celui des phacélie du témoin ($10,90 \pm 7,03$). Le score des phacélie de TB a été significativement supérieur à celui des phacélie du témoin. Ces résultats montrent que TB et T ont une capacité à fournir de l'azote aux cultures comparable (voire meilleure) à celle du sol témoin. En considérant les données relatives aux activités photosynthétiques globales des phacélie cultivées au sein des sols d'étude, il s'est avéré que la phacélie issue du sol témoin a présenté les meilleurs résultats suivie, par ordre décroissant, de celle cultivée sur TB et finalement de celle cultivée sur T.

Dans le but d'identifier une éventuelle carence nutritive, les teneurs en éléments majeurs et en oligo-éléments ont été déterminées dans les parties aériennes de la phacélie (figure 12).

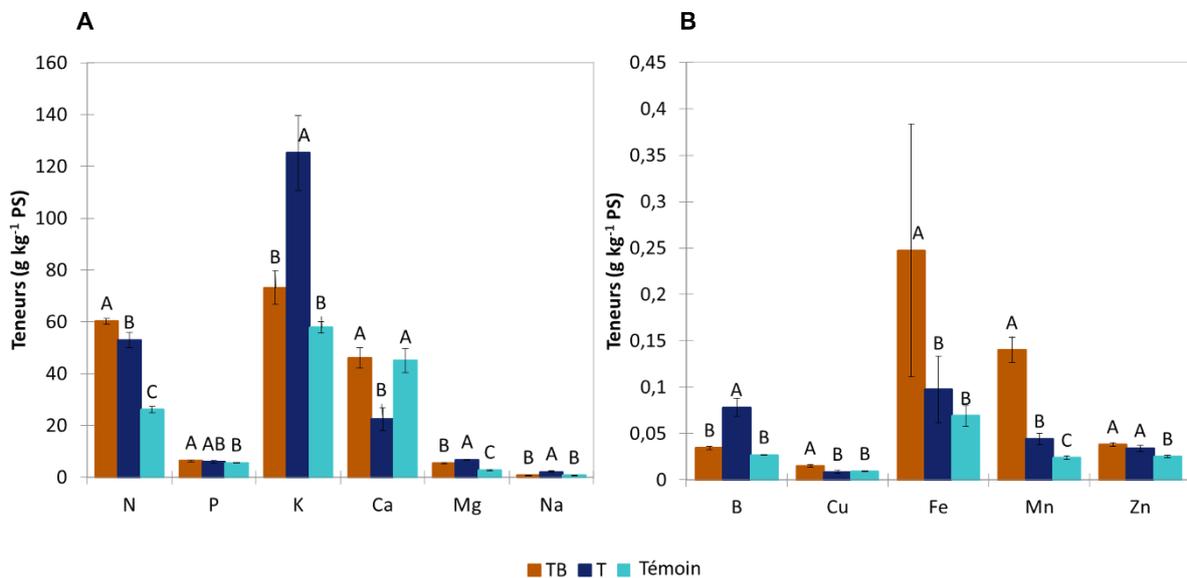


Figure 12 : Teneurs en (A) éléments majeurs et (B) oligo-éléments des plantes de phacélie à t₁ en fonction du sol témoin et des Technosols (n = 6 ; moyennes ± ET)

Hormis les teneurs totales en P et Zn, les phacélies issues de TB et T présentent des différences significatives pour chacun des éléments. Par rapport aux phacélies cultivées sur le sol témoin, celles provenant d'au moins un des deux Technosol construits ont montré des différences significatives. Les biomasses issues de TB et T présentaient des teneurs en éléments majeurs et en oligo-éléments plus élevées que celles produites sur le sol témoin (excepté Ca pour T). Par rapport aux biomasses issues de T et du sol témoin, celles cultivées sur TB présentaient des teneurs plus élevées en N ($60 \pm 1 \text{ g kg}^{-1}$ pour TB, $53 \pm 3 \text{ g kg}^{-1}$ pour T et $26 \pm 1 \text{ g kg}^{-1}$ pour le témoin), P ($6,4 \pm 0,4 \text{ g kg}^{-1}$ pour TB, $5,9 \pm 0,4 \text{ g kg}^{-1}$ pour T et $5,5 \pm 0,2 \text{ g kg}^{-1}$ pour le contrôle), Ca ($46 \pm 4 \text{ g kg}^{-1}$ pour TB, $22 \pm 4 \text{ g kg}^{-1}$ pour T et $45 \pm 5 \text{ g kg}^{-1}$ pour le témoin), Cu ($15 \pm 1 \text{ mg kg}^{-1}$ pour TB, $9 \pm 2 \text{ mg kg}^{-1}$ pour T et $9 \pm 0 \text{ mg kg}^{-1}$ pour le témoin), Fe ($247 \pm 136 \text{ mg kg}^{-1}$ pour TB, $97 \pm 36 \text{ mg kg}^{-1}$ pour T et $69 \pm 11 \text{ mg kg}^{-1}$ pour le témoin), Mn ($140 \pm 13 \text{ mg kg}^{-1}$ pour TB, $44 \pm 6 \text{ mg kg}^{-1}$ pour T et $24 \pm 2 \text{ mg kg}^{-1}$ pour le témoin) et Zn ($38 \pm 2 \text{ mg kg}^{-1}$ pour TB, $34 \pm 4 \text{ mg kg}^{-1}$ pour T et $25 \pm 1 \text{ mg kg}^{-1}$ pour le témoin). Les phacélies issues des trois sols d'essai ont différencié significativement selon leurs teneurs en N et Mn avec les teneurs les plus élevées dans les phacélies de TB, des teneurs intermédiaires dans celles de T et les teneurs les plus faibles dans celles du témoin. En ce qui concerne les teneurs en P, seule une différence significative a été observée entre les phacélies issues de TB qui étaient supérieures à celles du sol témoin. Les teneurs en K, Na et B ont été significativement plus élevées dans les phacélies de T et ont été comparables dans celles de TB et du témoin. Les teneurs en Ca étaient proches dans les phacélies de TB et du sol témoin et

significativement plus faibles dans les phacélies de T. Des teneurs significativement plus élevées en Mg ont été observées dans les phacélies de T par rapport à celles de TB et du témoin. Les phacélies de TB ont également présenté des teneurs plus élevées que celles du témoin pour cet élément. En ce qui concerne les teneurs en Cu et Fe, des teneurs significativement plus élevées ont été observées dans les phacélies de TB par rapport à celles de T et du témoin. Pour les teneurs en Zn, des valeurs significativement plus importantes ont été atteintes dans les phacélies cultivées sur les Technosols par rapport à celles du témoin.

La plus faible teneur en P_2O_5 assimilable du sol témoin semble avoir eu une incidence sur la teneur en P de la biomasse qui en résulte ; celle-ci était plus faible que dans les Technosols construits. Le même phénomène a été observé pour les teneurs en N. Bien que le sol témoin ait des valeurs en N total plus élevées, il est probable que les formes assimilables par les végétaux en cet élément soient plus faibles dans ce sol et que, pour cette raison, ses biomasses aient une teneur considérablement plus faible en N que celles provenant de TB et T. Le déficit en N assimilable du sol témoin par rapport aux deux Technosols construits pourrait être la raison de teneurs en flavonols considérablement plus élevées dans les phacélies cultivées sur ce sol. En ne considérant que les biomasses produites sur les Technosols, les tests statistiques ont mis en évidence une différence significative au regard de leurs teneurs en N. De ce fait, l'hypothèse précédemment émise selon laquelle un déficit en N serait à l'origine d'une différence significative entre les teneurs en flavonols des phacélies des deux Technosols est validée. Cette différence pourrait aussi être expliquée par un meilleur développement foliaire des cultures produites sur TB. Il a par ailleurs été mis en évidence qu'une carence en N pouvait être à l'origine de teneurs plus élevées en anthocyanes dans les plantes (Stewart *et al.*, 2001). Ce phénomène a également été observé dans cette étude en comparant les Technosols au sol témoin. Il est probable que les teneurs en N plus faibles dans les biomasses issues de T soient responsables de teneurs en anthocyanes significativement plus élevées dans ces mêmes végétaux.

Sur un total de 6 éléments majeurs, les biomasses cultivées sur les Technosols construits ont présenté des niveaux supérieurs pour 4 éléments (N, P, K et Mg). Parmi les 5 oligo-éléments analysés, les biomasses cultivées sur TB et T ont également présenté des valeurs supérieures pour 4 d'entre eux (B, Fe, Mn et Zn). Les plantes de « bonne qualité sur le plan nutritionnel » sont généralement décrites comme celles qui concentrent les niveaux les plus élevés en éléments majeurs (Temgoua *et al.*, 2015). Conséquemment, les résultats montrent que TB et T offrent une production de meilleure qualité que le sol témoin. En comparant les biomasses issues de TB et T et sur la base de la variabilité de leurs concentrations en éléments majeurs et oligo-éléments, les conclusions quant à la qualité des biomasses produites demeurent incertaines. Les concentrations plus faibles en Fe dans la

phacélie cultivée sur T pourraient expliquer son niveau de chlorophylle a plus faible par rapport à TB. Il est effectivement connu que le fer joue un rôle indirect dans la respiration, la synthèse chlorophyllienne et l'activité photosynthétique des végétaux, plus particulièrement en participant à la formation de certaines enzymes. Selon Loué (1987), il convient également de préciser que l'absorption de Fe par les plantes peut être limitée lorsque le substrat de culture a un pH basique et une teneur en carbonate très élevée. De surcroît, la teneur totale en CaCO_3 significativement plus élevée pour T, combinée à son pH supérieur, peut avoir influencé négativement l'absorption de Fe des cultures qui s'y développaient. Il en est de même pour l'absorption de Mn, qui se transforme en oxyde insoluble en présence d'un pH alcalin, ainsi que pour le Cu, dont le rôle est similaire à celui du Fe (ibid). Une teneur plus élevée en Mn a été observée dans la phacélie de TB ; elle pourrait expliquer les différences de teneur en chlorophylle a entre les phacélies des deux Technosols. Si de tels phénomènes peuvent expliquer les différences entre les deux Technosols, ils ne peuvent être appliqués au sol témoin qui, malgré des concentrations plus faibles en ces éléments, présente des niveaux plus élevés de chlorophylle a. En principe, lorsqu'un élément est excessivement ou insuffisamment présent, le végétal n'est pas en mesure d'accomplir un cycle complet (végétatif et reproductif). L'ensemble des biomasses cultivées au sein des trois sols d'étude a atteint le stade de floraison. De ce fait, la phacélie n'a souffert d'aucune carence en un quelconque élément quel que soit son substrat cultural. Les différences de teneurs en éléments majeurs et oligo-éléments entre les Technosols construits sont souvent significatives. Ces différences pourraient résulter des stades culturaux auxquels les mesures ont été réalisées puisqu'il a été montré que les éléments absorbés variaient au cours du développement végétal. Puisque la phacélie a eu tendance à se développer plus rapidement sur TB que sur T, il est supposé que les différences de teneurs en éléments s'expliquent majoritairement par leur seule différence de développement. L'influence du compactage et de la capacité de rétention d'eau des deux Technosols peut également avoir limité le développement des racines ainsi que leur capacité à prélever les éléments nutritifs nécessaires au développement de la culture.

2.4.1.1.3.4. Caractéristiques des couches organo-minérales après la culture de phacélie (t_1)

Le tassement moyen des Technosols après un apport successif de 150 L d'eau a été de $4,0 \pm 0,6$ cm pour TB et $9,6 \pm 0,3$ cm pour T. Le test t de Student de comparaison de deux moyennes met en évidence la différence significative des tassements des deux Technosols. Le Technosol sans bentonite semble plus sensible au tassement sous l'effet du poids de ses matériaux parents. Par ailleurs, il est possible qu'avec l'incorporation de molécules d'eau dans les espaces interfoliaires des smectites, TB ne subisse les effets du tassement que dans une moindre mesure.

Les paramètres physico-chimiques retenus pour évaluer l'évolution de la fertilité des Technosols construits ont été analysés à nouveau après la fauche de la phacélie (t_1). Les résultats des caractérisations sont présentés dans le tableau 22 et sont comparés aux résultats obtenus à t_0 .

Après 42 jours d'expérimentation, le caractère fortement carbonaté des deux Technosols perdure (> 50 %). Il a toutefois été observé une baisse significative de la teneur en CaCO_3 total pour les deux Technosols (- 12,8 % pour TB et - 13,6 % pour T). Cette baisse a toutefois été accompagnée d'une augmentation de la teneur en calcaire actif pour T ($89,04 \pm 5,02 \text{ g kg}^{-1}$) et un maintien de cette teneur pour TB ($51,21 \pm 9,44 \text{ g kg}^{-1}$). Les CaCO_3 total et actif constituent une réserve en carbonates progressivement mis à disposition dans le sol et sa solution à travers leur dégradation et la libération à terme d'ions Ca^{2+} . La diminution des teneurs en CaCO_3 total et la légère augmentation des taux de CaCO_3 actif dans les deux Technosols laissent supposer que le CaCO_3 total a été dégradé en particules plus fines s'apparentant au CaCO_3 actif. L'augmentation en ions Ca^{2+} dans TB et, plus spécifiquement dans T, illustre par ailleurs l'altération des formes insolubles de calcium (CaCO_3 total et actif) liée à une libération de formes solubles adsorbées sur le complexe argilo-humique (Ca^{2+}).

Le pH a diminué significativement : - 0,75 unité pour TB et - 0,59 unité pour T. Il reste néanmoins significativement plus important dans T. Plusieurs facteurs peuvent influencer les variations de pH tels que la température, le taux d'humidité, le pouvoir tampon du sol (directement lié à ses teneurs en argile et en MO) ou encore les activités biologiques (Félix-Faure *et al.*, 2013). Plus spécifiquement, les auteurs montrent que le pH du sol a tendance à diminuer au printemps puis à augmenter au cours de l'hiver. Ils expliquent notamment qu'avec le réchauffement saisonnier, les activités biologiques s'amplifient et libèrent du CO_2 . Ce dégagement de CO_2 augmente la concentration en acide carbonique dans la solution du sol et il s'ensuit une réaction chimique ($2\text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons 2\text{HCO}_3^- + 2\text{H}^+$) qui libère des ions H^+ à l'origine d'une baisse du pH. Souvent, cette évolution du pH reste stable tant que le sol est irrigué puis, au retour de l'automne combiné avec l'arrêt progressif des apports en eau, les activités biologiques diminuent et le pH réaugmente progressivement. Avec la mise en œuvre de matières organiques parents qui appartiennent à la classe des engrais organiques au regard de l'analyse de leurs composés pariétaux, il est à supposer une nitrification de l'ammonium par les micro-organismes du sol. Ce processus peut engendrer une légère acidification du sol. Le pH peut également être amené à se modifier sous l'effet des exsudats racinaires et de la respiration végétale. En effet, pour compenser une absorption ionique (qu'il s'agisse de cations ou d'anions), les racines végétales rééquilibrent les charges en excréant soit des protons H^+ , soit des anions OH^- , qui peuvent à terme générer respectivement une acidification ou une alcalinisation de la rhizosphère (Hinsinger *et al.*, 2003). Enfin, la baisse de

pH observée entre t_0 et t_1 dans les deux Technosols construits est à associer pour partie à leur perte en CaCO_3 total.

La conductivité électrique ne présente toujours pas de différence significative entre les Technosols construits et n'a significativement pas évolué depuis la mise en place des Technosols. Une tendance a néanmoins été observée avec une légère augmentation de la CE pour TB (+ $100 \mu\text{S cm}^{-1}$) et une diminution pour T (- $160 \mu\text{S cm}^{-1}$). Les conductivités électriques de T et TB s'inscrivent ainsi dans une gamme de valeur correcte au regard de ce paramètre. Cette absence d'évolution significative a également été observée pour les teneurs en matière organique et en carbone organique total entre Technosols, d'une part, et entre pas de temps, d'autre part.

Les teneurs en MO de TB sont restées stables entre t_0 et t_1 (avec 4,1 %) alors qu'elles ont eu tendance à légèrement baisser pour T (- 0,3 %). À t_1 , les teneurs en N total des deux Technosols sont relativement similaires. Une diminution de la teneur en N total a été mesurée entre les deux pas de temps pour TB et T avec respectivement - 23,5 % et - 17,5 %. Cette diminution est significative pour T mais ne l'est pas pour TB.

Les rapports C/N des deux Technosols sont plus élevés et ne présentent plus de différence significative entre Technosols. L'évolution de ce rapport en fonction du temps est significative entre t_0 et t_1 pour TB (respectivement 10,8 contre 14,32) mais ne l'est pas pour T (respectivement 13,4 contre 15,03).

Bien qu'aucune différence significative n'ait été mise en évidence après 9 semaines (3 semaines d'irrigation et 6 semaines de culture) pour la conductivité électrique, la teneur en MO et en C organique des Technosols, ces paramètres ont eu tendance à diminuer pour T et semblent être restés stables pour TB. Ces évolutions s'expliquent en partie par la nature des matériaux organiques parents des Technosols. Il s'agit essentiellement de débris d'origines végétale et animale qui s'apparentent à de la matière organique fraîche, plus propice à une dégradation rapide à travers la minéralisation. Les produits de la minéralisation sont notamment les nutriments tels que le potassium, le calcium ainsi que le magnésium. Si ces trois cations échangeables ont été plus amplement analysés par la suite, notons d'ores et déjà leur augmentation entre t_0 et t_1 pour les deux Technosols qui tendent à confirmer une minéralisation préférentielle de la matière organique entre les deux pas de temps. Il est à supposer un ralentissement de ce phénomène de minéralisation étant donné l'évolution positive du rapport C/N qui témoigne d'une dégradation plus lente de la matière organique en lien avec une activité biologique réduite lorsque ce rapport est supérieur à 12.

La capacité d'échange cationique a augmenté pour les deux Technosols de 7,51 à 10,64 $\text{cmol}^+ \text{kg}^{-1}$ pour TB et de 2,94 à 4,91 $\text{cmol}^+ \text{kg}^{-1}$ pour T, ce qui peut traduire de la formation partielle du complexe argilo-humique. Ce résultat est à modérer dans la mesure où l'évolution entre t_0 et t_1 n'est pas statistiquement montrée.

Les teneurs en P_2O_5 des Technosols sont stables et n'ont que peu augmenté entre t_0 et t_1 . En effet, les teneurs ont évolué de 0,51 à 0,59 g kg^{-1} pour TB et de 0,41 à 0,44 g kg^{-1} pour T. Ces valeurs entrent toujours dans la gamme des valeurs guides (cf. tableau 5). À t_1 , les Technosols présentent une différence significative au regard de ce paramètre. Ces résultats sont à analyser au regard des biomasses cultivées sur T et TB. Ces dernières sont effectivement significativement plus importantes au sein de TB. Or, il est à envisager la mise en place d'une rhizodéposition dans le sol par les racines de phacélie ; celle-ci pourrait avoir favorisé la minéralisation des nutriments et plus particulièrement du phosphore (Hinsinger, 2010) retrouvé en quantité significativement plus importante dans TB que dans T.

Alors que les deux Technosols présentaient des différences significatives au regard de leurs teneurs en CaO et MgO à t_0 (respectivement 2,52 et 0,80 g kg^{-1} pour TB et 1,67 et 0,31 g kg^{-1} pour T), ces différences ont été moins marquées après la culture de phacélie (respectivement 2,96 et 0,95 g kg^{-1} pour TB et 3,15 et 0,99 g kg^{-1} pour T). Elles ont peu évolué pour TB tandis qu'elles ont augmenté significativement pour T. La principale différence entre TB et T réside dans la part d'argile en présence. Dans TB, l'incorporation de bentonite a pu favoriser la formation du complexe argilo-humique qui assure l'adsorption et l'échange des cations. Il est probable que dans TB, le complexe argilo-humique ait davantage retenu les cations et en ait limité la mise en solution. Les teneurs en K_2O présentent une tendance à la baisse pour TB et à la hausse pour T sans que ces évolutions ne soient significatives. En revanche, les teneurs en Na_2O ont significativement diminué pour les deux Technosols. Elles sont passées de 0,38 à 0,02 g kg^{-1} pour TB et de 0,28 à 0,02 g kg^{-1} pour T. Les teneurs en CaO et Na_2O s'inscrivent dans les valeurs guides puisqu'il est observé des teneurs de 4,74 g kg^{-1} de CaO et 0,02 g kg^{-1} de Na_2O dans les sols lœssiques régionaux. Les teneurs en MgO et K_2O sont en revanche excédentaires dans les Technosols comparativement à ces sols dont les teneurs respectives sont de 0,10 et 0,20 g kg^{-1} . L'évolution des teneurs en K_2O dans les Technosols est à surveiller au cours du temps dans la mesure où un excédent en cet élément peut être à l'origine d'une immobilisation de MgO même lorsque cet élément est présent en quantité (Roudaut *et al.*, 2011). Ce phénomène peut engendrer une carence minérale susceptible d'impacter la synthèse de chlorophylle ou encore le transport des sucres au sein des cultures. Les teneurs en cations Mg^{2+} ont également été contrôlées dans la suite de cette étude puisqu'ils sont susceptibles de remplacer les cations Ca^{2+} au sein du complexe argilo-humique ; ceux-ci jouent un rôle primordial dans l'agglomération des constituants du sol. La

substitution des cations Ca^{2+} par les cations Mg^{2+} peut ainsi réduire la stabilité structurale du sol. La stabilité structurale des agrégats correspond à leur faculté à résister à différentes contraintes environnementales (e.g. pluies, vents). Dans les cas les plus extrêmes, les agrégats des sols instables sont dissociés en de plus fines particules lorsqu'ils sont soumis à ces facteurs climatiques. Il peut en résulter différents phénomènes tels que l'érosion hydrique ou éolienne, un lessivage des particules les plus fines en profondeur et parfois même un encroûtement en surface engendré par le remplissage des pores libres par les particules fines. Cette croûte constitue une barrière à la circulation des flux et peut limiter le développement des cultures. Une augmentation en Mg^{2+} peut également conduire à une augmentation de la salinité du sol. Les teneurs en Mg ont d'ailleurs fait l'objet d'analyses dans les biomasses cultivées, ceci afin d'identifier une mauvaise assimilation en cet élément liée à un excès de K_2O dans les Technosols construits. De manière générale, outre leur influence directe sur les sols, les teneurs excédentaires en nutriments peuvent mener à un lessivage et à la contamination des nappes phréatiques. Bien que cette expérimentation ait été réalisée en mésocomes, une attention particulière a été portée quant aux teneurs en nutriments et a tenu compte de ce risque en cas de mise en place des Technosols *in situ*.

Les teneurs en Fe, Al, Mn totaux et libres ont eu tendance à augmenter très légèrement. Elles ont évolué respectivement de 14828 à 16193 mg kg^{-1} pour TB et de 9100 à 9780 mg kg^{-1} pour T en Fe total, de 13701 à 16362 mg kg^{-1} pour TB et de 3592 à 3797 mg kg^{-1} pour T en Al total, de 248 à 268 mg kg^{-1} pour TB et de 168 à 172 mg kg^{-1} pour T en Mn total, de 483 à 596 mg kg^{-1} pour TB et de 402 à 519 mg kg^{-1} pour T en Fe libre, de 141 à 174 mg kg^{-1} pour TB en Al libre, de 51 à 58 mg kg^{-1} pour TB et de 17 à 22 mg kg^{-1} pour T en Mn libre. Seules les teneurs en Al libre de T ont eu tendance à diminuer avec une teneur moyenne de 74 mg kg^{-1} à t_0 et de 65 mg kg^{-1} à t_1 . Les valeurs sont néanmoins restées très en deçà des valeurs du sol maraîcher témoin, des sols loessiques de région et des sols cultivés du Marais Audomarois, excepté pour les teneurs en Al total de TB qui sont restées dans la gamme de valeur de celles de la ferme de Veolia. Ces paramètres étant inhérents aux matériaux parentaux et le choix des mélanges n'ayant pas tenu compte des teneurs à avoisiner dans les couches de TB et de T lors de leur élaboration, il est cohérent d'observer des différences avec les sols de référence.

La respiration basale des sols a diminué de manière significative pour les deux Technosols entre leur mise en place et la récolte de la phacélie. Elle est passée de 366 à 142 $\text{mg kg}^{-1} \text{O}_2 \text{j}^{-1}$ pour TB et de 352 à 89 $\text{mg kg}^{-1} \text{O}_2 \text{j}^{-1}$. Ces résultats mettent en évidence une diminution des activités microbiennes entre les deux pas de temps pour TB et T. Cette baisse des activités peut être expliquée soit par un paramètre limitant l'action des micro-organismes, soit directement par la baisse des micro-organismes dans les Technosols. Pour affiner les

interprétations, les bactéries en présence ont été quantifiées (après extraction EDTA 0,1 mM, tampon Tris 0,1 mM et Nycodenz et quantification par absorbance UV-VIS à 280 nm (spectrophotomètre, Multiskan® GO) à t_0 et à t_1 . À 280 nm, la densité optique reflète l'ADN en suspension, lequel peut être relié à la quantité de bactéries en présence. Il est apparu que, quelle que soit la modalité considérée, la densité optique a légèrement diminué sans que cette différence ne soit significative. Elle est ainsi passée de 2,53 à 2,42 pour les modalités formulées sans bentonite et de 2,83 à 2,57 pour les modalités incluant une part de bentonite. Ces résultats prouvent que le nombre de bactéries en présence n'a pas changé entre les deux pas de temps et suggèrent que seules leurs activités ont pu diminuer au cours du temps. De surcroît, l'hypothèse d'un facteur limitant est validée, tandis que celle selon laquelle la quantité de micro-organismes dans TB et T aurait chuté est rejetée. À t_1 , la respiration basale de TB a été significativement supérieure à celle de T, ce qui signifie que les activités des micro-organismes y ont été plus importantes. Plusieurs pistes sont envisagées pour tenter d'expliquer les causes de cette différence entre Technosols apparue à l'issue de la culture de phacélie. La première s'appuie sur une sélection de facteurs connus pour influencer la respiration basale hétérotrophe qui diffèrent entre TB et T tels que le pH ou encore la capacité de rétention en eau des sols (Muhinda *et al.*, 2009 ; Shi & Jin, 2016). Le pH significativement plus alcalin de T a pu constituer un facteur limitant les activités microbiennes générales. De plus, les deux Technosols diffèrent significativement au regard de leur capacité de rétention en eau avec une capacité totale de 534 g kg^{-1} pour TB et de 369 g kg^{-1} pour T. À leur mise en place et pendant toute la période pendant laquelle la phacélie a été cultivée, les deux Technosols ont été irrigués en respectant les mêmes apports en eau. Il s'avère que ces quantités d'eau ont pu être trop importantes pour T, saturant ainsi les espaces poreux du Technosol et engendrant son tassement. La combinaison de ce tassement et de cette saturation en eau pourrait être à l'origine d'une anoxie du milieu qui aurait inhibé les activités des organismes microbiens en manque d'oxygène. Ce postulat est à modérer dans la mesure où la détermination de la respiration basale au moyen du système Oxitop nécessite un remaniement des échantillons et la mise en place de conditions optimales pour le développement des micro-organismes. Néanmoins, les évolutions des activités enzymatiques globales présentées plus en détails ultérieurement, traduisent un état du sol au moment de son prélèvement et suivent les mêmes tendances. De ce fait, cette hypothèse n'est pas à exclure des réflexions.

La seconde hypothèse tient compte des différences significatives observées au regard des biomasses produites dans les deux Technosols. Dans TB, la phacélie a développé des tiges de plus grande taille et un meilleur rendement global. Il est à supposer que la phacélie a pu améliorer les activités microbiennes en participant à l'approvisionnement des micro-

organismes en carbone par le biais de son mucilage et de ses exsudats racinaires. Ces différences pourraient persister après la destruction du couvert végétal et l'apport de ses pailles en surface des containers qui pourrait contribuer à creuser l'écart déjà formé entre les deux Technosols.

En comparaison de la valeur de respiration basale du sol témoin, ($233 \pm 21 \text{ mg kg}^{-1} \text{O}_2 \text{ j}^{-1}$), celles des deux Technosols étaient significativement inférieures. La diminution de la respiration basale peut aussi résulter de la présence de matériaux organiques parents majoritairement composés de fraction soluble et caractérisés par de faibles teneurs en MO stable. Les composés pariétaux des matériaux organiques parents (i.e. compost, fumier de cheval et fientes de volaille) ont été analysés et présentaient :

- 8,2 % d'hémicellulose, 7,6 % de cellulose, 18,7 % de lignine 27,5 % de matières minérales et 38,0 % de matières organiques solubles pour le compost ;
- 10,8 % d'hémicellulose, 14,2 % de cellulose, 17,7 % de lignine, 21,5 % de matières minérales et 35,8 % de matières organiques solubles pour le fumier de cheval composté ;
- 21,7 % d'hémicellulose, 16,2 % de cellulose, 7,7 % de lignine, 2,4 % de matières minérales et 52,0 % de matières organiques solubles pour les fientes de volailles.

La caractérisation des composés pariétaux des matériaux organiques parents a permis de regrouper les trois produits parmi le groupe des « engrais organiques » en raison de leur fraction soluble supérieure à 30 %. Les composés labiles de la fraction soluble de ces matériaux parentaux ont probablement boosté l'activité biologique à leur mise en place, laquelle a décliné progressivement, à mesure que les composés disponibles ont été dégradés. Si la respiration basale des Technosols donne un premier aperçu de leur activité biologique, les analyses des activités enzymatiques et de la biomasse moléculaire fongique ont permis de compléter les informations. Au même titre que les activités biologiques dans leur ensemble, les activités enzymatiques et la biomasse moléculaire fongique ont baissé, avec une diminution statistiquement significative pour les activités enzymatiques. Pour TB, ces dernières ont évolué de 2,16 à 0,50 $\text{nmol g}^{-1} \text{sol min}^{-1}$ et de 1,65 à 0,32 $\text{nmol g}^{-1} \text{sol min}^{-1}$ pour T. En ce qui concerne la biomasse moléculaire fongique, elle a varié de 2,27 à 1,55 $\mu\text{g g}^{-1}$ entre t_0 et t_1 pour TB et de 1,53 à 0,60 $\mu\text{g g}^{-1}$ pour T. Pour T, cette évolution est significative. L'ensemble de ces valeurs a été comparé aux activités biologiques du sol témoin cultivé par Veolia. Il en ressort que malgré une baisse des teneurs en ergostérols des Technosols, ces dernières ne présentent pas de différence significative avec celle du témoin (1,08 $\mu\text{g g}^{-1}$) après les 42 jours de culture de phacélie. En revanche, les activités enzymatiques des Technosols ont été significativement

inférieures à celles du témoin avec des teneurs en fluorescéine moyennes de $1,19 \text{ nmol min}^{-1} \text{ g}^{-1} \text{ sol}$ pour ce sol.

Tableau 22 : Valeurs des paramètres physiques, chimiques et biologiques associés à la fertilité du sol témoin et des couches organo-minérales de deux Technosols à leur mise en place (t_0) et 42 jours après l'implantation d'un couvert végétal (t_1)

Paramètres	Couches organo-minérales de surface				Témoin
	TB		T		
	t_0	t_1	t_0	t_1	
pH	8,34 ± 0,22 (a)	7,59 ± 0,06 (b) (B)	8,53 ± 0,11 (a)	7,94 ± 0,18 (b) (A)	7,31 ± 0,05 (C)
CE ($\mu\text{S cm}^{-1}$)	1250 ± 270	1350 ± 120 (A)	1410 ± 264	1250 ± 155 (A)	331 ± 6 (B)
CaCO ₃ total (g kg^{-1})	593 ± 36 (a)	517 ± 27 (b) (B)	718 ± 53 * (a)	620 ± 62 (b) (A)	2 ± 1 (C)
CaCO ₃ actif (g kg^{-1})	51 ± 27	51 ± 9 (B)	84 ± 27	89 ± 5 (A)	59 ± 24 (B)
MO (%)	4,1 ± 0,0	4,1 ± 0,0 (B)	4,2 ± 0,0	3,9 ± 0,0 (B)	7,9 ± 4,3 (A)
C organique total (g kg^{-1})	23,5 ± 5,1	23,6 ± 2,4 (B)	24,4 ± 3,1	22,4 ± 1,9 (B)	45,9 ± 2,5 (A)
N total (g kg^{-1})	2,17 ± 0,42	1,66 ± 0,23 (B)	1,83 ± 0,22 (a)	1,51 ± 0,13 (b) (B)	3,93 ± 0,09 (A)
C/N	10,8 ± 0,8 (b)	14,3 ± 2,0 (a)	13,4 ± 1,1 *	15,0 ± 2,3	11,7 ± 0,7
CEC ($\text{cmol}^+ \text{kg}^{-1}$)	7,5 ± 3,1 *	10,6 ± 4,5 (B)	2,9 ± 3,1	4,9 ± 4,0 (B)	25,6 ± 1,7 (A)
P ₂ O ₅ assimilable (g kg^{-1})	0,51 ± 0,19	0,59 ± 0,11 (A)	0,41 ± 0,12	0,44 ± 0,09 (B)	0,15 (B)
K ₂ O (g kg^{-1})	1,70 ± 0,25	1,62 ± 0,42	1,53 ± 0,40	1,57 ± 0,28	1,34 ± 0,07
MgO (g kg^{-1})	0,80 ± 0,17 *	0,95 ± 0,22 (B)	0,31 ± 0,06 (b)	0,99 ± 0,22 (a) (B)	1,47 ± 0,14 (A)
Na ₂ O (g kg^{-1})	0,38 ± 0,06 * (a)	0,02 ± 0,00 (b) (B)	0,28 ± 0,04 (a)	0,02 ± 0,00 (b) (B)	0,10 ± 0,00 (A)
CaO (g kg^{-1})	2,5 ± 0,5 *	3,0 ± 1,2 (B)	1,7 ± 0,2 (b)	3,2 ± 1,1 (a) (B)	8,16 ± 0,81 (A)
Fer total (mg kg^{-1})	14828 ± 2785 *	16193 ± 884 (B)	9100 ± 489	9780 ± 1079 (C)	22398 (A)
Aluminium total (mg kg^{-1})	13701 ± 4872 * (b)	16362 ± 3190 (a) (A)	3592 ± 318	3797 ± 634 (B)	13044 (A)
Manganèse total (mg kg^{-1})	248 ± 38 *	268 ± 19 (B)	168 ± 7	172 ± 9 (C)	336 (A)
Fer libre (mg kg^{-1})	483 ± 63 (b)	596 ± 28 (a) (B)	402 ± 91	519 ± 57 (C)	1306 (A)
Aluminium libre (mg kg^{-1})	141 ± 40 *	174 ± 33 (B)	74 ± 17	65 ± 28 (C)	485 (A)
Manganèse libre (mg kg^{-1})	51 ± 14 *	58 ± 6 (B)	17 ± 1 (b)	22 ± 2 (a) (C)	130 (A)
Respiration sol ($\text{mg kg}^{-1} \text{O}_2 \text{j}^{-1}$)	366 ± 121 (a)	142 ± 24 (b) (B)	352 ± 94 (a)	89 ± 20 (b) (C)	233 ± 21 (A)
Ergostérols ($\mu\text{g g}^{-1} \text{sol sec}$)	2,27 ± 0,94	1,55 ± 0,56 (A)	1,53 ± 0,52 (a)	0,60 ± 0,47 (b) (B)	1,08 ± 0,14 (AB)
FDA ($\text{nmol g}^{-1} \text{sol min}^{-1}$)	2,16 ± 1,03 (a)	0,50 ± 0,30 (b) (B)	1,65 ± 0,94 (a)	0,32 ± 0,10 (b) (B)	1,19 ± 0,23 (A)

(Moyenne ± ET ; pour les Technosols, n = 6 ; pour le sol témoin, n = 3, sauf pour P₂O₅ assimilable et Fe, Al et Mn totaux et libres (n = 1)) ; TB, avec bentonite ; T, sans bentonite ; une lettre minuscule indique une différence entre t_0 et t_1 pour un même Technosol ; * indique une différence entre les deux Technosols (TB et T) à t_0 ; une lettre majuscule indique une différence significative entre les trois sols d'essai (TB, T et le témoin) à t_1

2.4.2. Tests de germination, de croissance et de biomasse

2.4.2.1. Méthodologie utilisée

Pour évaluer le degré de fertilité des deux Technosols à l'issue de leur processus d'élaboration (t_1), des tests de germination et de biomasse ont été réalisés au laboratoire en conditions semi-contrôlées. La fertilité des deux Technosols a été comparée à celle du sol cultivé par Veolia, de nouveau utilisé comme témoin pour cette expérimentation. Les tests ont été réalisés sur deux cultures : une culture de ray-grass anglais (*Lolium perenne* L.) de la variété Calao et une culture maraîchère de cresson (*Lepidium sativum*). La sélection de ces végétaux résulte, pour le ray-grass, de la volonté de comparer le pouvoir germinatif des Technosols à d'autres Technosols construits de la littérature (Coull *et al.*, 2021 ; Fourvel *et al.*, 2019 ; Vidal-Beaudet *et al.*, 2018 ; Watkinson *et al.*, 2017), et pour le cresson, de la nécessité d'évaluer la capacité de germination d'une culture maraîchère couramment employée dans ce type de tests au sein des Technosols construits (Baca *et al.*, 1990 ; Mumme *et al.*, 2018 ; Paré *et al.*, 1997 ; Warman, 1999). Les essais ont été réalisés dans des pots de 1 L dans lesquels ont été ajoutés $200 \pm 0,01$ g des Technosols d'essai après culture de phacélie (t_1) et du sol témoin. Chaque modalité a fait l'objet de 3 réplicats. Les sols ont été humidifiés à 60% de leur capacité maximale de rétention d'eau. 300 mg de ray-grass anglais ont été répandus uniformément à la surface de chaque pot, tandis que pour les tests sur le cresson, 5 graines ont été semées par pot. La germination des graines, leur développement et leur biomasse fraîche (après récolte) et sèche (40°C) ont été observés et déterminés sur une période de 44 jours. À l'issue de l'expérimentation, la hauteur des parties aériennes a été mesurée.

2.4.2.2. Évaluation de la capacité des Technosols à soutenir la production de biomasses une fois leur processus d'élaboration terminé

Les résultats des tests de germination et de biomasse sont présentés dans la figure 13 et le tableau 23. Les tests de germination du ray-grass ont révélé un retard d'une demi-journée dans l'émergence des plants cultivés au sein de TB par rapport à ceux du sol témoin (ce dernier ayant un développement plus rapide). Ce retard a néanmoins été compensé au cours du temps comme en témoignent les résultats de biomasse fraîche obtenus à la fin des essais qui ont montré une biomasse comparable entre les ray-grass cultivés sur le sol témoin ($11,34 \pm 0,10$ g) et ceux cultivés sur TB ($12,73 \pm 0,49$ g). Le ray-grass cultivé sur T ($1,90 \pm 1,53$ g) a, en revanche, montré une émergence plus faible que les deux autres sols, qui a persisté tout au long de l'essai comme en témoigne sa valeur de biomasse plus faible. Cette dernière était significativement inférieure à celle de TB et du sol témoin. Ainsi, au regard du test de germination, de croissance et de biomasse mené sur le ray-grass, seul TB est susceptible d'être aussi productif que le sol témoin. Comparés à d'autres Technosols construits de la littérature,

les résultats de la biomasse sèche de T étaient proches de ceux d'un Technosol construit exclusivement à partir de fines de déchets de construction et de démolition, tandis que ceux de TB étaient plus proches de ceux d'un Technosol composé de 50% de fines de déchets de construction et de démolition et de 50% de compost de déchets verts (Coull *et al.*, 2021). À titre d'information, l'expérience des auteurs a été réalisée dans 300 mg de sol à 70 % de la CAC, dans des pots d'un litre avec une photopériode de 16 h de jour et 8 h de nuit, pour une durée totale de 30 jours.

Le second test de germination a porté sur la culture de cresson et a révélé des résultats différents des premiers. Les tests statistiques ont mis en évidence des différences significatives entre les biomasses des trois sols d'essai. La biomasse la plus élevée a été observée dans le sol témoin ($8,47 \pm 0,86$ g). La biomasse issue de TB ($3,72 \pm 0,35$ g) a été significativement inférieure à celle du témoin mais supérieure significativement à celle de T ($0,00 \pm 0,00$ g). Pour ce second test, les résultats montrent une moindre capacité des Technosols à la germination, au développement et à la biomasse des cultures.



Figure 13 : Photographies des tests de germination, de croissance et de biomasse réalisés sur le ray-grass et le cresson dans les trois sols d'essai (T, TB et le témoin)

Tableau 23 : Biomasse fraîche des cultures utilisées pour les tests de germination en fonction du Technosol cultivé et du sol témoin.

Paramètres	TB	T	Témoin
Biomasse du ray grass (g)	$12,73 \pm 0,49$ (a)	$1,90 \pm 1,53$ (b)	$11,34 \pm 0,10$ (a)
Biomasse du cresson (g)	$3,72 \pm 0,35$ (b)	$0,00 \pm 0,00$ (c)	$8,47 \pm 0,86$ (a)

TB, le Technosol avec bentonite ; T, le Technosol sans bentonite. Les lettres indiquent une différence significative entre les modalités testées (TB, T et témoin) (n = 3 ; moyenne \pm ET).

2.5. BILAN

Après identification de sols régionaux réputés pour leurs fortes potentialités agronomiques, des gammes de valeurs guides ont été définies et ont permis d'établir des critères de sélection et d'élaboration des formulations pour les deux Technosols construits. Les matériaux parents identifiés et sélectionnés auprès des partenaires de Veolia ont été mélangés dans différentes proportions et se distinguent par la présence ou non de bentonite. Une première phase de mise en culture d'un couvert végétal a été incluse dans le procédé d'élaboration des Technosols construits afin d'initier une évolution de leurs paramètres physico-chimiques.

Il s'avère que par rapport aux objectifs initiaux et aux gammes de valeurs à approcher, les paramètres physico-chimiques des deux Technosols construits ont évolué et que leur fertilité tend à s'améliorer en approchant davantage, pour la plupart des paramètres, les valeurs guides. L'ensemble des résultats est synthétisé dans le tableau 24. Ces résultats confirment l'hypothèse émise selon laquelle il est possible de construire un Technosol, avec des matériaux disponibles localement et dont les propriétés se rapprochent de valeurs optimales préalablement définies. L'analyse approfondie des résultats suggère une meilleure disposition de TB à répondre aux attentes.

Tableau 24 : Synthèse des valeurs des paramètres agronomiques de TB et T à t₁, et premières interprétations et points de vigilance

Paramètres	TB	T	Avantages et/ou point de vigilance
pH	Proche de l'objectif (entre 6,5 et 7,5) 	Proche de l'objectif (entre 6,5 et 7,5) 	-
CaCO ₃ total et actif	Teneurs très élevées 	Teneurs très élevées 	<ul style="list-style-type: none"> Les sols calcaires (> 30 %) présentent en général une importante activité bactérienne associée à une bonne capacité à dégrader les matières organiques (Duchaufour, 1950), Des teneurs excédentaires peuvent, en libérant du calcium soluble dans la solution du sol, saturer le complexe argilo-humique en ions Ca²⁺ au détriment des autres cations (e.g. Mg²⁺ et K⁺) et entraîner des problèmes d'assimilation de ces éléments ainsi qu'une insolubilisation du fer, du cuivre, du manganèse, du zinc et des phosphates, Des teneurs trop importantes en CaCO₃ actif peuvent aussi engendrer des carences en azote
MO	Teneurs avoisinant les 5 % visés 	Teneurs avoisinant les 5 % visés 	-
C/N	Ratio en augmentation 	Ratio en augmentation 	<ul style="list-style-type: none"> Rapport fortement corrélé aux activités des organismes microbiens, Supérieur à 12, la minéralisation opérée par les micro-organismes est ralentie et les nutriments nécessaires au développement des cultures sont libérés en quantité moindre
CEC	Faible et largement inférieure à l'objectif fixé (> 20 cmol+ kg ⁻¹) 	Faible et largement inférieure à l'objectif fixé (> 20 cmol+ kg ⁻¹) 	<ul style="list-style-type: none"> La CEC des Technosols illustre leur capacité à fixer les cations, Les CEC des deux Technosols traduisent une faible réserve en cations pour les végétaux mais facilement disponible, Étant donné le pas de temps relativement faible entre t₀ et t₁, la faible CEC de TB et de T n'est pas préoccupante mais elle a fait l'objet d'un suivi au cours de l'année culturale afin de s'assurer que les végétaux ne subissent pas de carence
Cations échangeables	Teneurs dans les seuils guides fixés 	Teneurs dans les seuils guides fixés 	<ul style="list-style-type: none"> De fortes teneurs en K₂O et MgO sont observées, Les surplus en cations peuvent provoquer des phénomènes d'antagonisme en favorisant une absorption trop importante en un cation au détriment des autres, Dans les cas les plus extrêmes, ces phénomènes peuvent même créer un appauvrissement du complexe argilo-humique, Très souvent un excès de K peut créer un appauvrissement en Ca et Mg au sein du complexe, Au regard de l'évolution des valeurs de T et TB, aucun phénomène d'antagonisme n'est observé à t₁

TB, avec bentonite, T, sans bentonite

CHAPITRE 3 : POTENTIALITES AGRONOMIQUES DES TECHNOSOLS CONSTRUITS

Le chapitre précédent a porté sur l'élaboration de deux Technosols construits et sur leur caractérisation physique, chimique et biologique à l'instant initial (i.e. t_0) et après maturation et structuration des formulations en mésocosmes suite à la mise en place d'un couvert végétal (i.e. à t_1) (figure 14). Les résultats ont mis en évidence que les Technosols T et TB ont déjà commencé à évoluer en l'espace de 9 semaines. Leur fertilité semble s'améliorer avec des paramètres physico-chimiques (i.e. pH, teneurs en MO, CaO, MgO, K₂O) proches des valeurs guides établies. Les résultats des tests de germination réalisés en laboratoire sur les cultures de ray grass et de cresson ont montré que, malgré sa mise en place récente, le Technosol TB était capable d'assurer une germination proche de celle du sol maraîcher témoin. Les résultats de la biomasse cultivée sur T ont montré un potentiel de germination plus faible. Pour évaluer les potentialités agronomiques de T et TB, l'expérimentation en mésocosmes a été poursuivie avec la mise en culture maraîchère des deux Technosols. Deux saisons culturales se sont succédées avec la production de cultures de printemps, puis d'hiver, dont les récoltes respectives ont marqué les pas de temps t_2 et t_3 (figure 14). L'objectif était de respecter un schéma cultural ainsi que des pratiques réalisées en micro-maraîchage bio-intensif. La finalité de ces travaux était de vérifier les hypothèses selon lesquelles les Technosols construits présenteraient un niveau de fonction comparable au sol de référence avec (i) une pédogénèse précoce qui ferait évoluer leurs propriétés au cours du temps, (ii) une fonction de production de biomasse qui réponde aux attentes de cultures professionnelles cultivées en maraîchage bio-intensif et (iii) une meilleure production de biomasse (quantitative et qualitative) dans le Technosol formulé à partir de bentonite. L'évaluation des potentialités agronomiques a porté sur : (i) les évolutions des paramètres physiques, chimiques et biologiques et ce, toujours dans un objectif d'approcher les valeurs guides de référence, et (ii) l'analyse des denrées produites en termes d'activité photosynthétique, de biomasse et de diagnostic de nutrition végétale. Ce chapitre vise également à évaluer l'aptitude d'un ingénieur de l'écosystème (*Lumbricus terrestris*) à améliorer la fertilité des Technosols et à favoriser l'agrégation de leurs constituants avec pour hypothèse qu'une inoculation volontaire permettrait d'augmenter le niveau de fonctions rendues par les Technosols. Plus spécifiquement, l'inoculation des vers de terre a été réalisée à la fois en mésocosmes et en microcosmes (figure 14).

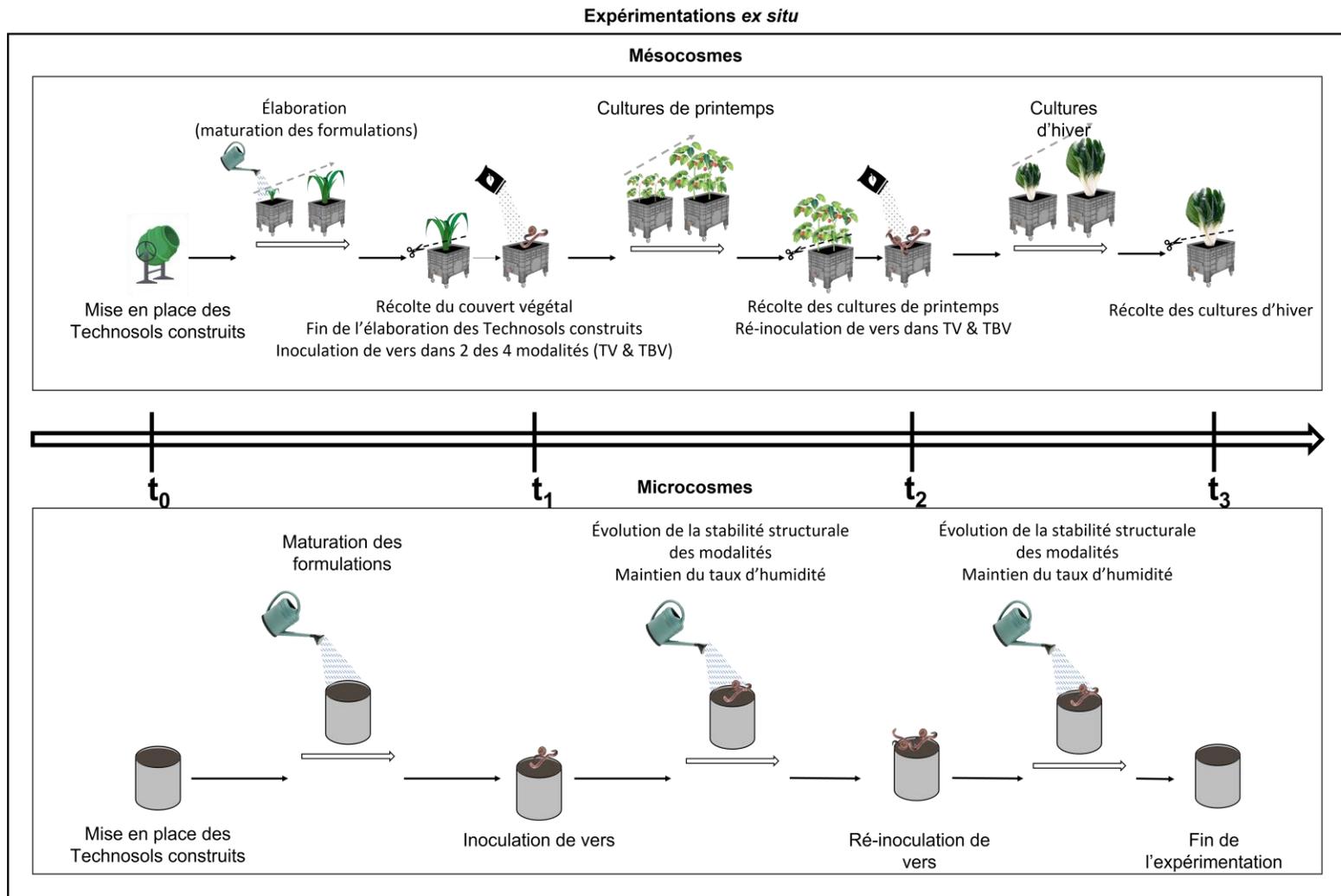


Figure 14 : Démarche expérimentale entre t_0 et t_3 en mésocosmes pour évaluer les potentialités agronomiques des deux Technosols avec ou sans l'inoculation de vers de terre, et en microcosmes pour évaluer l'influence des vers de terre sur l'agrégation

3.1. METHODOLOGIE

3.1.1. Dispositifs expérimentaux en mésocosmes et microcosmes

En juin 2021, au terme de leur phase d'élaboration – qui correspond à la récolte de la phacélie (t_1) – les Technosols du dispositif expérimental en mésocosmes sous serre (cf. chapitre 2, 2.4.1.) ont été cultivés en suivant une rotation de cultures maraichères. Les récoltes des cultures de printemps et d'hiver ont respectivement marqué les pas de temps t_2 et t_3 (figure 14).

La transition entre la phase d'élaboration des Technosols et leur mise en culture maraîchère (t_1) se distingue aussi par l'inoculation, dans une partie des mésocosmes, d'ingénieurs de l'écosystème, à savoir des vers épi-anéciques de l'espèce *Lumbricus terrestris*. Ainsi, 50 individus ont été ajoutés par bac dans trois des six mésocosmes de formulation TB et trois des six mésocosmes de formulation T (figures 15 et 16). Ce choix résulte de la volonté d'approcher le nombre de vers par m^2 d'une prairie profonde et fertile (Cuendet *et al.*, 1997). Après l'introduction des organismes, les Technosols inoculés ont été différenciés au moyen des appellations TBV (i.e. Technosol avec bentonite et vers) et TV (i.e. Technosol sans bentonite et avec vers). L'ensemencement des bacs a été réalisé grâce à la mise en place d'une « unité d'inoculation » afin de faciliter l'enfouissement des organismes (Chiffre *et al.*, 2019 ; Golli Siagbe, 2015 ; Laossi *et al.*, 2010). Cette dernière a consisté en la création de deux tranchées (l : 10 cm x L : 40 cm x H : 5 cm) humectées au sein desquelles ont été déposés les vers de terre (achetés chez Terres et Eaux – distributeur commercial d'articles de pêche). Un second inoculum a été réalisé à l'issue des récoltes des cultures de printemps, avant la mise en place des cultures d'hiver (t_2) pour palier à d'éventuelles pertes.

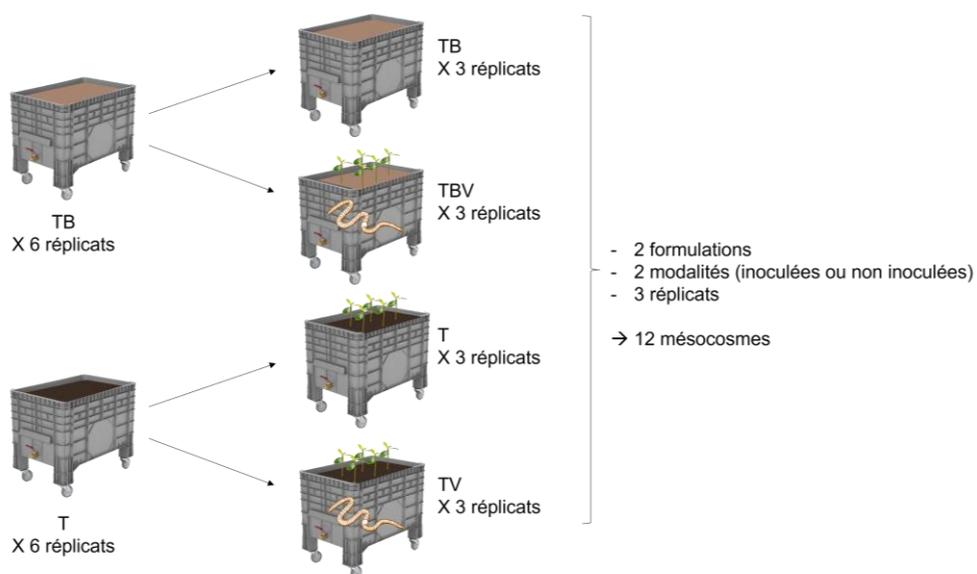


Figure 15 : Schéma représentant les différentes modalités expérimentales en mésocosmes

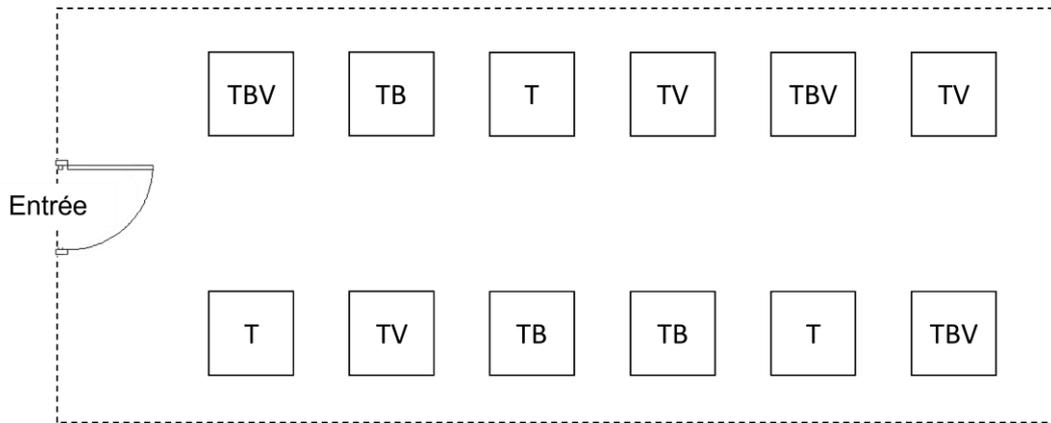


Figure 16 : Agencement des mésocosmes dans la serre expérimentale après inoculation des modalités

Les cultures maraîchères ont été choisies dans le respect des productions et pratiques mises en place par Veolia au sein de leur ferme à la même période. Une attention particulière a été portée quant à l'implantation de légumes feuilles, racines, tiges et aromates, ceci afin d'étudier la fonction des Technosols à supporter tous les types de cultures. Il a également été vérifié la possibilité de procéder à des associations culturales pour se conformer aux pratiques du micro-maraîchage bio-intensif. Les mauvaises associations ont été écartées et le seul compagnonnage a été privilégié. La synthèse des informations relatives au compagnonnage et aux mauvaises associations culturales figure en annexe 2. Les premières cultures retenues et implantées dans les mésocosmes ont été les suivantes : persil (de variété géant d'Italie), cébettes (Parade), céleri-rave (Monarch), betteraves rouges (Chioggia), mesclun (Telex), tomates cerises (Sweet baby), basilic (Grand vert) et carottes (Napoli). Elles ont été mises en place après un travail de la couche superficielle du sol au moyen d'une griffe. Le persil, les cébettes, céleri-rave, mesclun, tomates cerises et basilic ont été repiqués à partir de plants préalablement semés en plaques alvéolées tandis que les betteraves rouges et carottes ont été semées. Un calendrier cultural a été établi et les cultures récoltées ont été remplacées par de nouvelles au fur et à mesure de l'année (figure 17). Les premières productions ont ainsi été suppléées par l'implantation d'épinards (Géant d'hiver), de mâche (Vit), de roquette (Cultivée), de navets (Jaune boule d'or), de blettes (White ribbed 3) et de pourpier d'hiver (Claytone de Cuba). Toutes les cultures de la seconde période culturale ont été repiquées, à l'exception de la roquette qui a fait l'objet d'un semis à la volée. Notons que c'est au mois d'octobre 2021 que la majorité des cultures ont été remplacées, marquant ainsi la limite entre la récolte des cultures de printemps (t_2) et l'implantation des cultures d'hiver. Cette période correspond également à l'apport d'amendements organiques dans le respect des pratiques inhérentes au micro-maraîchage bio-intensif. À t_2 , 75 g de compost de déchets verts et 1,6 L de Goméo, composé d'un mélange de guano d'oiseaux marins et de tourteaux végétaux ont été apportés par mésocosmes. La récolte des cultures d'hiver (t_3) marque la fin de l'expérimentation. Parmi l'ensemble des cultures, certaines ont présenté des difficultés à la

germination ou encore à la reprise à la suite de leur repiquage. Il a été choisi de les remplacer intégralement par de nouvelles cultures. En conséquence, la laitue (feuille de chêne) a succédé aux mesclun, betteraves, basilic et carottes. En raison de contraintes (environnements différents avec d'un côté les Technosols sous serre expérimentale et de l'autre le sol témoin sous serre professionnelle) et de conditions disparates (les Technosols sont en mésocosmes alors que le sol témoin est en condition naturelle), le protocole a été adapté au cours de l'expérimentation. Seules les cultures d'hiver ont pu être comparées au témoin : elles ont été cultivées sur le sol témoin sur une placette de même surface que celle des Technosols. Les contraintes du maraîchage professionnel n'ont néanmoins pas permis de disposer de répliquat de cette placette.

Les mésocosmes ont été régulièrement alimentés en eau de ville. L'irrigation a été raisonnée, comme le ferait un maraîcher, en tenant compte de l'état du sol, des cultures et de la température. Pendant l'expérimentation, le taux d'humidité des Technosols a été monitoré au moyen de sondes capacitatives (HydraSCOUT – HSTI). Ces mesures ont permis d'ajuster les irrigations des mésocosmes de sorte à maintenir une humidité constante supérieure à 40 % de la CAC.

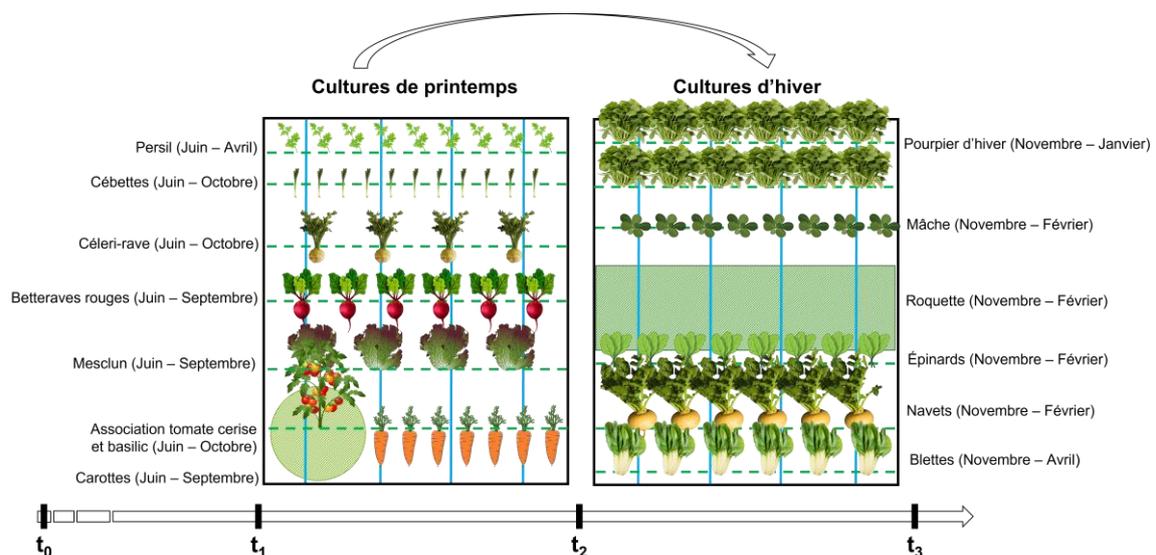


Figure 17 : Schéma du plan cultural en mésocosmes

Le dispositif expérimental a été complété par une expérimentation menée dans 12 microcosmes (cylindres PVC ; D : 30 cm, H : 60 cm). Les Technosols ont été mis en place dans les microcosmes en respectant les mêmes conditions que celles appliquées aux mésocosmes (i.e. une formulation minérale de profondeur sur une épaisseur de 30 cm sur laquelle reposait une formulation organo-minérale de surface d'une épaisseur de 30 cm). Cette expérimentation complémentaire a été entreprise pour pallier l'éventuelle dilution de l'effet des vers dans les mésocosmes. Il a en effet été envisagé que les effets des actions de

bioturbation des vers ne seraient pas perceptibles dans un volume d'un mètre cube en six mois seulement. Outre le suivi de l'évolution des paramètres des Technosols sous l'action des vers, cette expérimentation a permis d'évaluer la capacité des vers inoculés à se maintenir dans les milieux. Si la survie des vers introduits a également été suivie parmi les organismes introduits dans les mésocosmes, le plus faible volume des microcosmes a permis de contrôler les conditions expérimentales de façon plus précise et de limiter les risques de déficit hydrique. À t_1 , 5 vers ont donc été introduits (de sorte à respecter une proportion égale d'organismes selon les volumes des micro- et mésocosmes) dans 3 des 6 Technosols TB et 3 des 6 Technosols T. Les vers ont été inoculés en respectant les mêmes schémas d'irrigation et degrés d'humidité dans les microcosmes que dans les mésocosmes. Comme pour les mésocosmes, une seconde inoculation de 5 vers a été réalisée à t_2 dans les microcosmes. Par ailleurs, les microcosmes ont été disposés dans la serre à proximité des mésocosmes de même formulation.

3.1.2. Échantillonnage et déterminations analytiques appliquées aux différentes matrices étudiées

3.1.2.1. Caractérisation des horizons de surface et profonds des modalités dans les mésocosmes

À t_2 et t_3 , des échantillons ont été prélevés dans chaque horizon de surface des modalités (T, TV, TB et TBV). Pour chaque mésocosme, cinq échantillons élémentaires ont été prélevés puis mélangés de manière homogène de sorte à obtenir un échantillon composite par mésocosme.

Les déterminations analytiques ont porté sur le pH eau, les teneurs en CaCO_3 total et actif, la conductivité électrique (CE), le P_2O_5 assimilable, la CEC et les cations échangeables, les teneurs en carbone organique total et en MO, les teneurs en azote total, la respiration basale du sol, les activités enzymatiques et fongiques, dans le respect des normes énumérées dans le tableau 17 du chapitre 2. Pour rappel, l'ensemble des protocoles utilisés est décrit en annexe 3.

À t_3 , les horizons profonds ont été échantillonnés afin d'observer leur évolution après un an. Pour cela, les mésocosmes ont été sciés de haut en bas de sorte à observer les profils des Technosols et à les classer parmi les catégories établies par la WRB. L'analyse des profils a porté sur l'enracinement des cultures, l'épaisseur des horizons, leurs limites, couleurs, classes texturales, nature des structures, humidité, compacités et friabilités. L'accès aux horizons profonds des Technosols a aussi permis d'en prélever des échantillons pour étudier l'évolution de leurs caractéristiques après 1 an. Les déterminations analytiques ont concerné le pH eau, la conductivité électrique, les teneurs en CaCO_3 total et actif, C organique total,

N total, CEC et cations échangeables au moyen des mêmes protocoles que ceux mentionnés dans le chapitre 2 – 2.4.1.1.1.

3.1.2.2. Collecte des cultures maraîchères en mésocosmes

À t_2 et t_3 , les végétaux ont été récoltés puis analysés afin d'évaluer leurs teneurs en chlorophylle a et polyphénols épidermiques, fluorescence chlorophyllienne, leur biomasse et leur composition minérale. La profondeur d'enracinement des cultures a également été observée à t_3 lors de l'ouverture des mésocosmes.

À l'instar des analyses menées sur la phacélie, les déterminations analytiques des cultures maraîchères ont porté sur le contenu en chlorophylle et en polyphénols épidermiques (dont le protocole est décrit au chapitre 2 – 2.6.1.1.1.). Ces analyses ont été réalisées au terme du développement des cultures, avant leur récolte. Les mesures ont concerné 20 plantules de chaque culture étudiée par mésocosme au moyen du capteur Dualox Scientific (FORCE-A, Orsay, France). Ces observations ont été complétées, pour les cultures dont la surface foliaire était suffisamment importante, par la caractérisation de leur fluorescence chlorophyllienne au moyen d'un fluorimètre chlorophyllien Pocket PEA (Hansatech Instruments, Pentney King's Lynn, Royaume-Uni). L'étude de ce paramètre permet notamment de comparer l'efficacité de l'activité photosynthétique des végétaux des sols d'essai et de considérer un ensemble de stress pouvant les affecter de manière différentielle. Cet indicateur révèle en effet les pertes nettes du rendement photosynthétique puisque la fluorescence, mesurée par l'outil, et l'émission de chaleur constituent les deux voies de désexcitation des pigments chlorophylliens autres que la photosynthèse au niveau du photosystème II (PSII). Après avoir plongé un échantillon dans l'obscurité pendant une durée de 20 minutes à l'aide de pinces spécialement conçues à cet effet, le fluorimètre est utilisé pour émettre un flash lumineux de haute intensité ($3500 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$, 627 nm), ceci afin d'induire une réponse rapide de fluorescence chlorophyllienne. L'instrument, équipé d'une photodiode, détecte et mesure ensuite la fluorescence de la chlorophylle de l'échantillon analysé. À l'issue de la mesure, le fluorimètre renvoie le ratio F_v/F_m qui correspond au rapport de fluorescence variable ($F_m - F_0$; F_0 représentant la fluorescence de base à l'obscurité) et de fluorescence maximale (F_m). Ce ratio traduit l'efficacité du photosystème II (PSII) à exploiter la lumière pour assurer l'activité photosynthétique. La valeur de cet indicateur est proche de 0,8 pour un végétal sain et est supposée décroître à mesure que les végétaux subissent des stress. La mesure a été réalisée avant de procéder à la récolte. 5 répétitions ont été réalisées sur 20 plantules de chaque végétal à chaque période d'analyse.

À l'issue de leur récolte, l'ensemble des organes comestibles des cultures a été pesé pour déterminer les biomasses fraîches. Par la suite, les récoltes ont été séchées (40°C) avant d'être

broyées (250 μm) pour la réalisation de leur diagnostic de nutrition végétale selon la méthode développée par Sadeb laboratoire et décrite en 2.6.1.1.1. Pour rappel, les analyses visent à déterminer les teneurs en éléments majeurs (azote, phosphore, potassium, calcium, magnésium et sodium totaux) et en oligo-éléments (bore, cuivre, fer, manganèse et zinc totaux). L'ensemble des résultats relatifs à ce diagnostic est exprimé en poids sec. Afin d'effectuer une comparaison aux valeurs de la littérature (exprimées en poids frais), les résultats ont été convertis en poids frais.

3.1.2.3. Mesure de la stabilité des agrégats dans les microcosmes

À t_3 , les cylindres ont été sciés de haut en bas afin de prélever un échantillon composite de chacun de leurs horizons de surface et de profondeur pour en évaluer la stabilité structurale (NF EN ISO 10930). Deux traitements ont été réalisés : (1) le premier pour simuler une inondation ou de fortes pluies, (2) le second pour reproduire des conditions de pluies modérées ou d'irrigation. Les protocoles sont présentés en annexe 3. Les analyses ont permis de calculer le diamètre pondéré moyen des sols d'essai. La valeur de ce diamètre permet d'évaluer la stabilité des agrégats (tableau 25).

Tableau 25 : Classe de stabilité des agrégats de sols en fonction du MWD

MWD	Stabilité
< 0,4 mm	Très instable
0,4 mm à 0,8 mm	Instable
0,8 mm à 1,3 mm	Moyennement stable
1,3 mm à 2,0 mm	Stable
> 2,0 mm	Très stable

3.1.3. Analyses statistiques

Les analyses statistiques ont été réalisées au moyen du logiciel XLSTAT. Pour chaque variable, la moyenne et l'écart-type ont été mesurés grâce aux répétitions expérimentales.

Les caractéristiques physiques, chimiques et biologiques des modalités et du sol maraîcher témoin ont été comparées, à chaque pas de temps, au moyen d'ANOVA et de tests post-hoc de Tukey. La distribution des résidus a été analysée pour vérifier l'égalité des variances et la normalité des résidus. Les échantillons étant appariés, des ANOVA à une mesure répétée ont été effectuées pour analyser l'évolution des paramètres d'une même modalité à travers le temps. Pour faciliter la présentation des données, il a été considéré que T et TV ainsi que TB et TBV constituaient des modalités différentes dès t_0 . Dans l'interprétation des résultats, l'influence des vers sur l'évolution des paramètres suivis n'a été prise en compte qu'à leur introduction à t_1 .

De la même manière, les données collectées sur les légumes ont été analysées au moyen d'ANOVA. Pour les cultures de printemps, les biomasses, teneurs en chlorophylle et polyphénols épidermiques, l'indice de fluorescence chlorophyllienne et les compositions

minérales ont été comparés entre productions issues des modalités. Pour les cultures d'hiver, le test a visé à comparer les paramètres des cultures produites sur les modalités expérimentales et sur le sol maraîcher témoin. Les cultures issues du sol témoin n'ont fait l'objet que d'un unique réplicat et les résultats ont essentiellement servi de point de comparaison sans pouvoir établir de valeurs moyennes ou d'écart-types pour les paramètres étudiés.

Pour comprendre quels facteurs ont influencé les biomasses des cultures, des tests de statistiques exploratoires ont été réalisés. Les biomasses ont été confrontées aux paramètres physiques, chimiques et biologiques des sols d'essai à l'aide d'analyses en composantes principales.

Les différences ont été considérées comme significatives à $\alpha = 0,05$.

3.2. ÉVOLUTION DU POTENTIEL AGRONOMIQUE DES MODALITES DES TECHNOSOLS AU REGARD DE LEURS CARACTERISTIQUES PHYSIQUES, CHIMIQUES ET BIOLOGIQUES

3.2.1. Couches organo-minérales

Les paramètres agronomiques retenus pour évaluer la fertilité des couches organo-minérales de TB, TBV, T et TV ont été suivies aux quatre pas de temps de l'expérimentation (t_0 , t_1 , t_2 et t_3) (figure 18 ; Annexe 4).

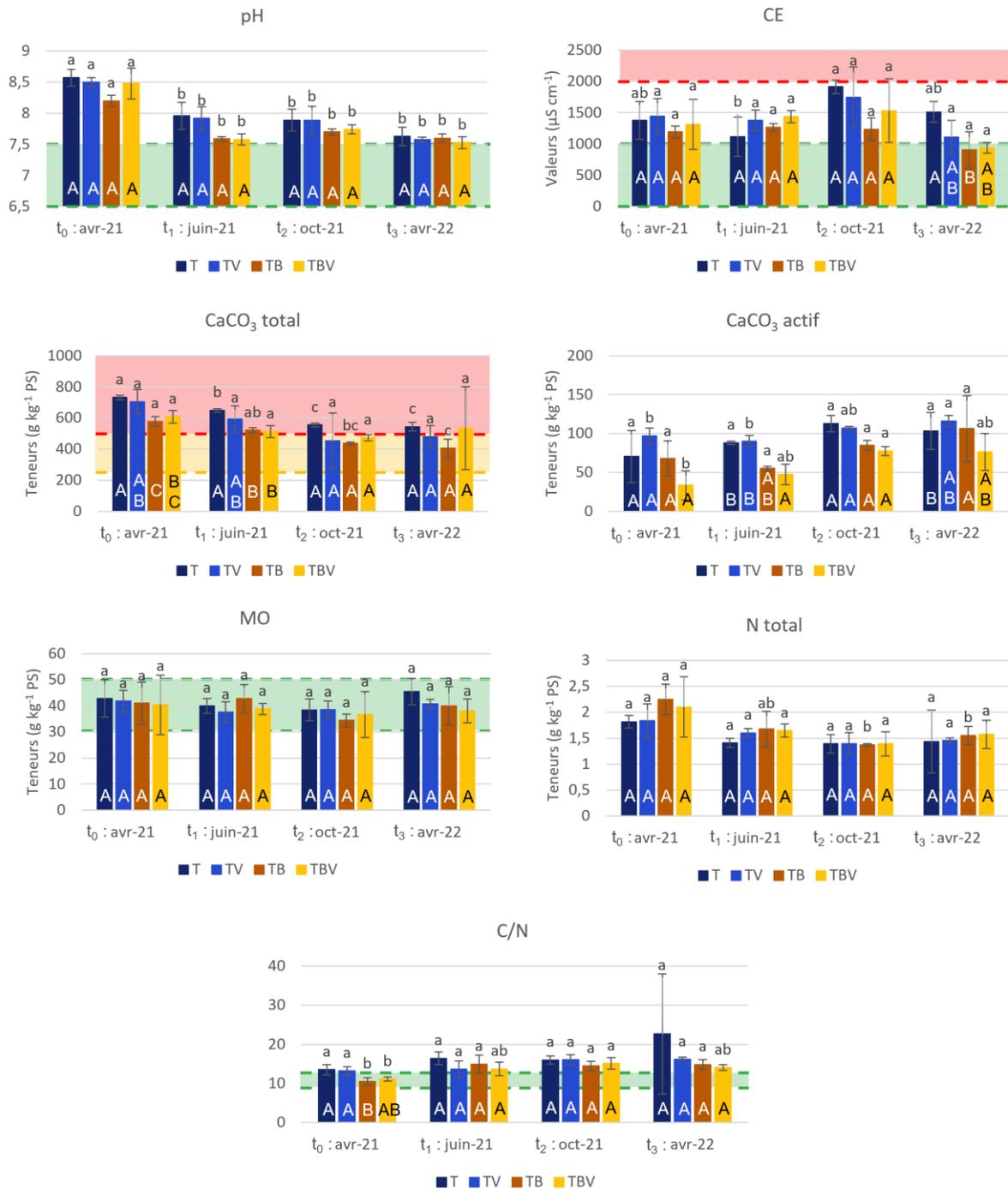


Figure 18 : Paramètres physico-chimiques mesurés dans les couches supérieures des modalités expérimentales aux différents pas de temps (moyenne \pm ET ; n = 3).

TB, avec bentonite ; TBV, avec bentonite et vers (*L. terrestris*) ; T, sans bentonite ; TV, sans bentonite et avec vers (*L. terrestris*) ; CE : conductivité électrique ; MO : matière organique. Les zones colorées se réfèrent aux valeurs guides : vert, limite (ou gamme de valeurs) dans laquelle s'inscrire ; orange, limite (ou gamme de valeurs) vers laquelle la teneur en élément considéré s'écarte légèrement ; rouge, limite (ou gamme de valeurs) pour laquelle les teneurs en élément considéré s'écartent fortement. Les lettres minuscules indiquent une différence significative pour une même modalité aux différents pas de temps. Les lettres majuscules montrent une différence significative entre les 4 modalités pour un même pas de temps.

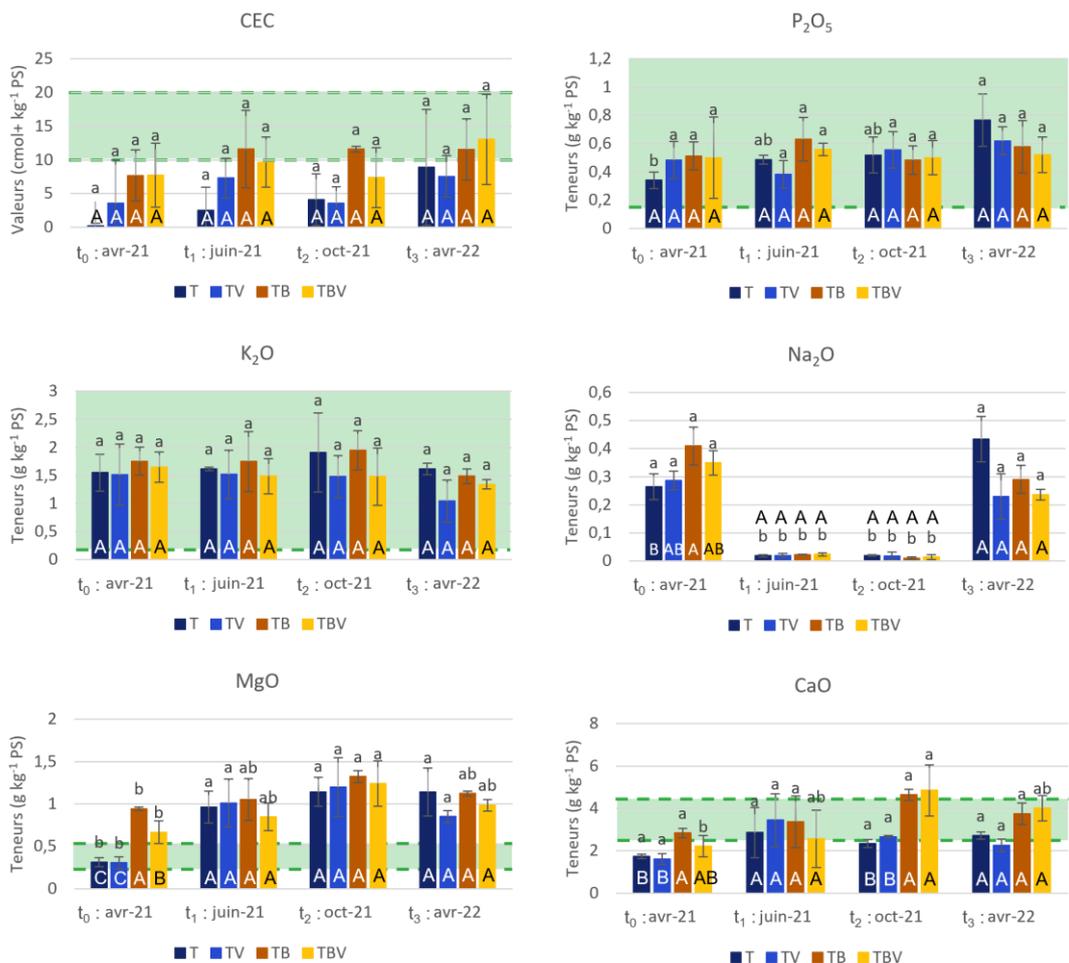


Figure 188 suite

3.2.1.1. Paramètres physico-chimiques

Les résultats des paramètres physico-chimiques sont présentés dans la figure 18 et décrits ci-dessous un par un selon le schéma suivant : ils montrent tout d’abord les grandes tendances quelle que soit la modalité (T, TV, TB et TBV), puis les différences entre les modalités T et TB, ensuite l’influence des vers sur les modalités TV et TBV par rapport à T et TB et enfin les résultats à t₃ et leur comparaison aux valeurs guides.

- **pH**

Le pH des quatre modalités a diminué au cours de l’expérimentation. Les valeurs étaient significativement plus faibles à t₁ qu’à t₀ (-0,6 unités en moyenne pour T, TV et TB et -0,9 unités pour TBV). À t₂, le pH des modalités était proche des valeurs de t₁ (passant de 7,94 ± 0,18 à 7,89 ± 0,17 pour T, 7,92 ± 0,19 à 7,89 ± 0,23 pour TV, 7,59 ± 0,03 à 7,70 ± 0,05 pour TB et 7,58 ± 0,09 à 7,74 ± 0,07 pour TBV). À t₃, les valeurs étaient légèrement inférieures à celles de t₂ (avec des valeurs de 7,63 ± 0,15 pour T, 7,58 ± 0,04 pour TV, 7,60 ± 0,07 pour TB et 7,53 ± 0,10 pour TBV). Cette tendance à une acidification s’est probablement réalisée sous

l'effet de l'irrigation régulière des Technosols. L'eau d'irrigation a pu provoquer la perte d'une partie des ions de la solution du sol par drainage vers les couches profondes, ce qui a engendré la modification du pH des couches supérieures. Une partie des matières organiques incorporées aux formulations a également pu provoquer l'acidification progressive des modalités à travers leur minéralisation.

Pour T et TV, le pH a eu tendance à diminuer au cours de l'expérimentation, tandis que pour TB et TBV, les valeurs ont été très légèrement supérieures à t_2 par rapport à t_1 (aux prémices du refroidissement des températures), puis ont été plus faibles à t_3 qu'à t_2 (à l'arrivée de la période estivale). Il est souvent observé, sous climat tempéré, une baisse des valeurs de pH en été – qui résulte de la synthèse d'acides organiques par les activités biologiques (optimales en cette saison) – et une augmentation de ces valeurs en hiver, induite par la dilution des ions en solution sous l'effet des pluies (Baize, 2018). Cette hypothèse a été vérifiée et est argumentée dans la partie de ce chapitre relative aux activités biologiques.

L'effet de l'inoculation des vers n'est pas observé entre t_1 et t_3 .

À t_3 , les pH ont diminué de 0,94 unités pour T, 0,91 unités pour TV, 0,60 unités pour TB et 0,95 unités pour TBV par rapport à t_0 . Ces diminutions sont significatives pour l'ensemble des modalités. À t_3 , les pH de chaque modalité demeurent légèrement basiques (entre 7,5 et 7,8) mais tendent chacun vers la neutralité (entre 6,5 et 7,5).

Au regard des valeurs guides, les pH des quatre modalités tendent, après une année d'évolution, vers la limite haute de la gamme de valeurs cibles à avoisiner (entre 6,5 et 7,5) et ne devraient pas constituer un frein aux prélèvements des nutriments par les cultures.

- **Conductivité électrique**

Dans l'ensemble, les CE des quatre modalités ont peu évolué. Aucune différence significative n'a été mise en évidence pour l'évolution des CE de TV, TB et TBV aux pas de temps. En revanche, la CE de T a été significativement plus élevée à t_2 ($1913 \pm 108 \mu\text{S cm}^{-1}$) qu'à t_1 ($1116 \pm 316 \mu\text{S cm}^{-1}$). Les modalités n'ont pas différencié entre elles à t_0 , t_1 et t_2 . Seules T et TB ont présenté des différences significatives à t_3 , avec respectivement des valeurs moyennes de $1512 \pm 165 \mu\text{S cm}^{-1}$ et $904 \pm 291 \mu\text{S cm}^{-1}$.

De t_0 à t_3 , les modalités ne semblent pas avoir suivi les mêmes tendances évolutives. À t_1 , les CE ont légèrement diminué par rapport à t_0 pour TV (avec des valeurs de $1442 \pm 282 \mu\text{S cm}^{-1}$ à t_0 et $1376 \pm 166 \mu\text{S cm}^{-1}$ à t_1) et plus distinctement pour T ($1379 \pm 304 \mu\text{S cm}^{-1}$ à t_0 et $1116 \pm 316 \mu\text{S cm}^{-1}$ à t_1), tandis qu'elles ont très légèrement augmenté pour TB et TBV (passant respectivement de $1192 \pm 95 \mu\text{S cm}^{-1}$ à $1265 \pm 61 \mu\text{S cm}^{-1}$ pour TB et $1313 \pm 402 \mu\text{S cm}^{-1}$ à 1439

$\pm 98 \mu\text{S cm}^{-1}$ pour TBV). À t_2 , les valeurs moyennes sont restées relativement stables pour TB et TBV par rapport à t_1 alors qu'elles ont davantage augmenté pour T et TV. Les valeurs ont finalement diminué pour chacune des modalités à t_3 (avec des valeurs moyennes de $1512 \pm 165 \mu\text{S cm}^{-1}$ pour T, $1111 \pm 269 \mu\text{S cm}^{-1}$ pour TV, $904 \pm 291 \mu\text{S cm}^{-1}$ pour TB et $939 \pm 87 \mu\text{S cm}^{-1}$ pour TBV).

Différents facteurs peuvent influencer la CE d'un sol. Elle peut notamment dépendre de leur teneur en eau (les sols sont généralement de mauvais conducteurs à l'état sec). Ainsi, plus le sol est saturé, plus la conductivité est élevée. La nature des matériaux parents influence également la CE des sols, puisque les matériaux aux meilleures capacités de rétention confèrent une meilleure saturation en eau au substrat. Au regard des matériaux constitutifs des Technosols construits, il est envisagé que les teneurs en argile significativement plus importantes dans TB et TBV que dans T et TV aient influencé l'augmentation de leurs CE à t_1 par rapport à t_0 . À l'inverse, la diminution des valeurs de CE de T et TV à ce même pas de temps est attribuée à leur plus faible capacité de rétention en eau. Pour rappel, à t_0 , les modalités ont bénéficié d'une irrigation similaire (au moyen d'un système de suintant). Ce système n'a été modifié qu'à t_1 , après avoir observé une différence significative de rétention en eau entre les deux formulations de Technosols. Les saturations plus importantes de TB et TBV à cette période semblent correspondre aux valeurs de CE plus élevées, puis tendre vers une évolution similaire à celles de T et TV à l'issue de l'adaptation du système d'irrigation. Les évolutions des CE de T, TV, TB et TBV coïncident par la suite avec les températures saisonnières (augmentation de la CE des modalités avec la montée des températures puis diminution de la CE corrélée à un refroidissement).

Entre t_0 et t_3 , les CE des modalités n'ont pas différencié significativement. Elles ont globalement diminué pour TV, TB et TBV et très légèrement augmenté pour T. L'effet des vers n'a pas été observé entre t_1 et t_3 . En un an, les CE de TB et TBV ont atteint les gammes de valeurs à avoisiner, tandis que celle de TV tend vers la limite supérieure de cette gamme. Seule la CE de T reste éloignée de ces valeurs. Au bilan, avec des CE de $1512 \pm 165 \mu\text{S cm}^{-1}$ pour T, $1111 \pm 269 \mu\text{S cm}^{-1}$ pour TV, $904 \pm 291 \mu\text{S cm}^{-1}$ pour TB et $939 \pm 87 \mu\text{S cm}^{-1}$ pour TBV à t_3 , les modalités expérimentales s'inscrivent dans la classe des sols non salins ($0 - 2000 \mu\text{S cm}^{-1}$) définie par la FAO. Cette classe de salinité ne présente que des effets négligeables sur les cultures. En se référant à la classification établie par Durand (1983), les modalités appartiennent cette fois à la classe des sols salés (entre 1000 et $2000 \mu\text{S cm}^{-1}$) pour T et TV et à la classe des sols légèrement salés (500 à $1000 \mu\text{S cm}^{-1}$) pour TB et TBV. Au regard des seuils de tolérance définis pour les cultures maraîchères, les rendements des cultures les plus sensibles (aubergine, fraise, haricot, melon) pourraient être affectés (avec une limite de $1000 \mu\text{S cm}^{-1}$) (Machado & Serralheiro, 2017). Ce n'est pas le cas pour TB et TBV avec des

valeurs inférieures à cette limite. Rappelons néanmoins qu'une valeur de $2000 \mu\text{S cm}^{-1}$ est communément considérée comme le niveau au-delà duquel les cultures sensibles ne peuvent s'accommoder au milieu de culture (Maynard *et al.*, 2007) et que les CE des modalités sont toutes inférieures à ce seuil à t_3 .

- **CaCO₃ total**

Les teneurs en CaCO₃ total des modalités ont eu tendance à diminuer depuis leur mise en place (t_0) jusqu'à la récolte des cultures d'hiver (t_3). Dans le chapitre 2, les analyses statistiques avaient mis en évidence qu'à leur mise en place, les deux Technosols (T et TB) différaient par rapport à ce paramètre et que cette différence avait persisté dans le temps jusqu'à la récolte de la phacélie (t_1). Ces différences ne sont plus perceptibles entre modalités à t_2 et à t_3 malgré des valeurs qui demeurent, à t_3 , sensiblement plus élevées pour les formulations sans bentonite (T et TV) – en raison de la part plus importante de filler apportée à ces formulations lors de leur élaboration. L'importante diminution des teneurs en CaCO₃ total à t_1 par rapport à t_0 peut provenir de l'hétérogénéité des Technosols lors de leur mise en place. En effet, bien que les matériaux aient été brassés au moyen d'une bétonnière pour optimiser l'homogénéité des Technosols, il est probable que les échantillons prélevés aient été, à ce stade de l'expérimentation, plus chargés en filler (plus carbonatés). Les variations des teneurs en CaCO₃ total seraient peut-être ainsi mieux illustrées à partir de t_1 , suite à l'initiation des premiers processus pédogénétiques.

À nouveau, la présence ou l'absence de vers ne semble pas avoir affecté les valeurs de ce paramètre puisque les modalités T et TV puis TB et TBV ne diffèrent pas entre elles aux 4 pas de temps. Cependant, les modalités inoculées (TV et TBV) semblent avoir été moins impactées par la diminution de leurs teneurs en CaCO₃ total puisque ces dernières sont restées comparables aux 4 pas de temps. La sécrétion de biosphéroïdes calcitiques (i.e. particules de carbonate de calcium) par les vers de terre pourraient avoir partiellement compensé l'altération des carbonates de ces modalités et atténué la diminution de leurs teneurs en CaCO₃ total (Lambkin *et al.*, 2011).

La tendance évolutive des teneurs en CaCO₃ total des modalités peut être mise en relation avec différents processus, en particulier l'altération chimique des carbonates et la libération d'ions en solution. Les matériaux parents étaient constitués de fractions granulométriques majoritairement inférieures à 2 mm qui ont pu, par altération, évoluer pour partie en CaCO₃ actif.

À t_3 , le caractère fortement carbonaté (25 à 50 %) persiste pour TB et TV (avec des teneurs respectives de $404 \pm 60 \text{ g kg}^{-1}$ et $480 \pm 70 \text{ g kg}^{-1}$) tandis qu'il est très fortement

carbonaté (50 à 80 %) pour TBV et T (respectivement $534 \pm 267 \text{ g kg}^{-1}$ et $544 \pm 27 \text{ g kg}^{-1}$). Ces teneurs constituent une réserve en carbonates progressivement mis à disposition dans le sol et sa solution à travers leurs dégradations et la libération, à terme, d'ions Ca^{2+} .

Les teneurs en carbonate total ne suffisent pas, à elles seules, à évaluer le degré de fertilité des sols. Néanmoins, associées aux teneurs en calcaire actif et en ions Ca^{2+} , elles renseignent sur les cations susceptibles d'être libérés sur le long terme et permettent (i) d'anticiper l'évolution du pouvoir tampon du sol et (ii) d'avoir un premier aperçu de la stabilité du complexe argilo-humique (par le biais des liaisons avec les ions Ca^{2+}).

- **CaCO_3 actif**

Dans l'ensemble, les teneurs en CaCO_3 actif des modalités ont augmenté entre t_0 et t_3 (+ 33 g kg^{-1} dans T, + 19 g kg^{-1} dans TV, + 38 g kg^{-1} dans TB et + 43 g kg^{-1} dans TBV). Cet accroissement n'a été significatif que pour TV. Sans tenir compte de la présence des vers, les teneurs moyennes en CaCO_3 actif de T et TB sont restées stables entre les pas de temps t_0 et t_1 . À t_2 , ces valeurs ont été légèrement supérieures à celles de t_1 tandis qu'à t_3 , elles ont été comparables à t_2 pour l'ensemble des modalités. À t_2 , aucune différence significative n'a été observée entre les modalités avec ou sans bentonite bien que T et TV aient présenté des valeurs moyennes (respectivement $113 \pm 11 \text{ g kg}^{-1}$ et $107 \pm 2 \text{ g kg}^{-1}$) supérieures à celles de TB et TBV (respectivement $85 \pm 6 \text{ g kg}^{-1}$ et $78 \pm 6 \text{ g kg}^{-1}$). À t_3 , des différences ont été mises en évidence entre les modalités T et TB, avec des valeurs respectives de $103 \pm 24 \text{ g kg}^{-1}$ et $106 \pm 42 \text{ g kg}^{-1}$. Celles-ci sont attribuées à l'hétérogénéité des échantillons qui se traduit à travers les importants écarts-types observés. L'effet des vers sur ce paramètre n'est pas observé entre t_1 et t_3 . Globalement, les tendances évolutives des teneurs en CaCO_3 actif des modalités semblent suivre des directions opposées à celles de leurs teneurs en CaCO_3 total. Ce constat pourrait appuyer l'hypothèse selon laquelle les particules aux granulométries plus grossières (telles que les fractions sableuses du filler et de la bentonite) ont pu être altérées et transformées en particules plus fines, accroissant dès lors les teneurs en calcaire actif, au regard de leurs proportions plus importantes dans les formulations.

À t_3 , le rapport des teneurs en CaCO_3 actif par rapport au CaCO_3 total est de 19 % pour T, 24 % pour TV, 26 % pour TB et 14 % pour TBV. Si les teneurs en calcaire actif ne renseignent pas directement le degré de fertilité des sols, elles n'en restent pas moins élevées dans cette étude. Le calcaire actif correspond à la part de CaCO_3 renfermée par les particules plus fines du sol (type limon et argile). Celles-ci sont susceptibles de se transformer, pour partie, en calcium soluble et de libérer une importante quantité d'ions Ca^{2+} dans la solution du sol lors de leur modification chimique. Ces ions sont essentiels à la formation du complexe argilo-

humique et à sa stabilisation. En revanche, lorsque leur teneur est excédentaire, ils peuvent être à l'origine de multiples troubles au développement des cultures. Ils provoquent notamment de nombreux antagonismes par l'insolubilisation de certains éléments (e.g., potassium, phosphates). À titre d'exemple, des teneurs excédentaires en ions Ca^{2+} peuvent causer une chlorose ferrique par l'insolubilisation du fer et, de fait, limiter son absorption par les végétaux (Colomb, 2017). Ils peuvent également saturer le complexe argilo-humique au détriment d'autres cations essentiels au développement des cultures (Mg^{2+} , K^+). Il a aussi été observé des carences en P et N, ainsi qu'une mauvaise absorption du Mn induites par des teneurs trop élevées en Ca^{2+} .

- **Matière organique**

Les teneurs en MO sont restées relativement stables aux 4 pas de temps. Avec des valeurs moyennes de 4,3 % pour T, 4,2 % pour TV, 4,1 % pour TB et 4,0 % pour TBV, les teneurs en MO ont été proches de la valeur cible fixée à 5 % dès leur mise en place (t_0). Ces teneurs relativement élevées proviennent de l'intégration de matériaux organiques parents, de type résidus végétaux et déjections animales, qui appartiennent aux matières organiques fraîches facilement décomposables. À t_3 , avec des valeurs de 4,5 % pour T, 4,1 % pour TV, 4,0 % pour TB et 3,8 % pour TBV, les taux de MO mesurés ne présentaient pas de différence significative par rapport aux taux déterminés à t_0 . Au regard des tests statistiques, les teneurs en MO des modalités expérimentales sont restées similaires entre elles à chacun des pas de temps. Cette observation s'explique essentiellement par un procédé d'évolution des teneurs en carbone relativement lent. La présence ou l'absence de vers ne semblent pas avoir affecté les valeurs de ce paramètre. Les teneurs en MO ont eu tendance à diminuer entre t_0 et t_2 , ce qui pourrait traduire l'initiation de processus de dégradation et de minéralisation des matériaux organiques parents. Cette hypothèse avait d'ailleurs été appuyée par les importantes activités biologiques (respirométrie, activités enzymatiques et biomasse moléculaire fongique) observées à t_0 et à même de refléter la mise en place d'une minéralisation des matières organiques. Les diminutions des teneurs en MO peuvent également venir de leur prélèvement par les cultures implantées à ces périodes. À t_3 , les teneurs en MO ont été supérieures à celles de t_2 pour l'ensemble des modalités. Cette augmentation est à associer à l'apport d'amendements organiques à t_2 .

À t_3 , bien que les teneurs en MO des modalités n'atteignent pas la valeur guide, elles sont toutes supérieures à 3 %, ce qui correspond à la valeur pour laquelle la teneur en MO est caractérisée de très forte (Charman & Murphy, 2007). En conséquence, la valeur guide a été réévaluée à la baisse et la gamme de valeurs proposée est de 3 à 5 % de MO. Les modalités bénéficient ainsi d'une teneur en MO appropriée pour un usage en maraîchage.

- **N total**

Pour l'ensemble des modalités, les teneurs en N total ont eu tendance à diminuer entre t_0 et t_3 ($-0,38 \text{ g kg}^{-1}$ dans T, $-0,39 \text{ g kg}^{-1}$ dans TV, $-0,7 \text{ g kg}^{-1}$ dans TB et $-0,53 \text{ g kg}^{-1}$ dans TBV). Cette diminution a été significative pour TB dès t_2 . À t_0 , les teneurs de TB et TBV (respectivement $2,25 \pm 0,29 \text{ g kg}^{-1}$ et $2,10 \pm 0,58 \text{ g kg}^{-1}$) ont été légèrement supérieures à celles de T et TV (respectivement de $1,82 \pm 0,12 \text{ g kg}^{-1}$ et $1,84 \pm 0,32 \text{ g kg}^{-1}$). Cette tendance s'est atténuée au cours du temps. À t_3 , les teneurs ont été similaires pour chaque modalité ($1,44 \pm 0,60 \text{ g kg}^{-1}$ dans T, $1,45 \pm 0,06 \text{ g kg}^{-1}$ dans TV, $1,55 \pm 0,17 \text{ g kg}^{-1}$ dans TB et $1,57 \pm 0,27 \text{ g kg}^{-1}$ dans TBV). L'hétérogénéité des échantillons prélevés à t_0 a probablement induit de faibles écarts entre les modalités incluant ou non une part de bentonite à leur mise en place. La tendance à une diminution des teneurs en N total entre t_0 et t_2 est une conséquence directe des activités biologiques (animales et végétales). Les fortes activités biologiques à t_0 , présentées au chapitre 2, avaient d'ailleurs eu pour effet la baisse des teneurs en N total induite par la minéralisation et le prélèvement par les végétaux. Le cycle de l'azote semble ainsi s'être instauré dès la mise en place des modalités. À t_2 , les teneurs ont augmenté suite à l'apport d'amendements organiques. Les tests statistiques ne mettent pas en évidence de différence significative entre modalités à t_2 et t_3 au regard de ce paramètre. L'effet des vers dans TV et TBV ne semble pas avoir eu d'impact sur les teneurs en N total entre t_1 et t_3 .

Aucune valeur guide n'a été établie pour les teneurs en N total. Les données ont ainsi été confrontées à celles du sol maraîcher témoin. À t_3 , les teneurs en N total des modalités sont toutes inférieures à celles de ce sol ($3,93 \pm 0,09 \text{ g kg}^{-1}$).

Les teneurs en N total ne témoignent pas directement de l'état de fertilité des sols puisqu'elles n'illustrent pas les teneurs disponibles pour les végétaux. L'intérêt de la détermination du N total tient en sa confrontation aux teneurs en C organique total par le biais du ratio C/N, afin de retranscrire le degré de décomposition de la matière organique.

- **C/N**

Entre t_0 et t_3 , le rapport C/N des modalités est resté relativement stable. Comme pour les autres paramètres, les valeurs de ce ratio ont été légèrement plus élevées à t_1 qu'à t_0 , en association avec la mise en place des premiers processus pédogénétiques et l'homogénéisation des Technosols. À t_0 , TB et TBV s'inscrivaient dans la gamme de valeurs cibles (9 – 12) avec un C/N commun de 11. T et TV s'en approchaient, sans toutefois l'atteindre, avec des valeurs respectives de 14 et 13. L'azote progressant plus vite que le carbone dans la réalisation de son cycle biogéochimique, il est normal de constater une

augmentation du rapport C/N. Comparativement aux teneurs en N total, les teneurs en C organique ont très peu changé, si bien qu'avec des teneurs amoindries en N total et des teneurs plus stables en C organique total, la valeur du ratio C/N a augmenté aux pas de temps. Il n'est observé aucune différence significative entre les valeurs de ce ratio des modalités à chacun des pas de temps étudiés. À t_3 , seul le ratio C/N de TB a été significativement plus élevé qu'à t_0 ($10,5 \pm 0,9$ à t_0 et $14,8 \pm 1,2$ à t_3).

À t_3 , T a présenté un C/N moyen plus élevé ($22,6 \pm 15,3$) que les autres modalités ($16,2 \pm 0,6$ dans TV, $14,8 \pm 1,2$ dans TB et $14,1 \pm 0,7$ dans TBV). Une forte variabilité (écart-type élevé provenant vraisemblablement d'une erreur analytique) est observée pour T à t_3 .

Au bilan, le ratio C/N des modalités expérimentales est resté relativement stable dans le temps. À t_3 , les valeurs de ce paramètre ont été de 23 ± 15 pour T, 16 ± 1 pour TV, 15 ± 1 pour TB et 14 ± 1 pour TBV. Les tendances évolutives de ces valeurs retranscrivent parfaitement la mise en mélange de matériaux organiques parents de natures et de maturités différentes, qui ont assuré un approvisionnement en N total directement disponible pour les micro-organismes et végétaux, et une source de C disponible à plus long terme, au fur et à mesure de la décomposition de la matière organique. En renseignant le degré de décomposition de la matière organique, le ratio C/N reflète indirectement les activités biologiques. Des valeurs fortes de ce ratio indiquent une activité biologique réduite entraînant une décomposition lente de la MO, tandis que des valeurs plus faibles rendent compte d'une activité élevée qui assure une décomposition rapide de la MO. Au regard de l'évolution des activités biologiques (détaillées en 3.2.1.2), la progression du C/N des modalités est parfaitement expliquée par de fortes activités à t_0 qui ont eu tendance à s'atténuer au cours de l'année expérimentale.

- **CEC**

Les CEC des modalités n'ont pas présenté les mêmes variations aux pas de temps selon la formulation initiale (T ou TB). Pour rappel, à t_0 , la CEC de ces deux formulations différait significativement avec des valeurs de $2,94 \pm 3,07$ cmol+ kg⁻¹ pour T et TV (lesquels n'étaient pas différenciés à cette étape de l'expérimentation) et de $7,51 \pm 3,07$ cmol+ kg⁻¹ pour TB et TBV. Cette différence tenait en l'incorporation de bentonite, matériau au cortège argileux dominant. Ces valeurs faibles de CEC par rapport à la limite guide fixée au-delà de 20 cmol+ kg⁻¹ s'expliquaient, à ce pas de temps, par la mise en place récente des Technosols qui s'apparentaient alors à une juxtaposition de matériaux parents, sans qu'aucune liaison n'ait été créée entre eux. Cette hypothèse était d'ailleurs étayée par l'évolution positive des valeurs de ce paramètre à t_1 pour chaque modalité par rapport à t_0 . Bien que non significatives, ces

augmentations témoignaient de la structuration et de l'agrégation des particules parentales et de la formation du complexe argilo-humique des modalités. Les valeurs de CEC ont été comparables entre modalités depuis t_0 jusqu'à t_3 . Les faibles valeurs de CEC observées dans les modalités avec bentonite sont d'ailleurs très surprenantes. Pour comprendre ces résultats, le cortège argileux de la bentonite a été analysé par diffraction des rayons X à l'issue de l'expérimentation en mésocosmes. Contrairement aux informations communiquées par le fournisseur et sur lesquelles s'étaient appuyés les calculs relatifs à l'élaboration des formulations, le matériau présentait d'importants pics pour les kaolinites et illites et un pic très faible de montmorillonites confondu parmi celui des illites. Si l'analyse DRX ne permet pas de quantifier les composés cristallisés identifiés, le faible pic de montmorillonites, confondu parmi le pic important d'illites, mène à penser que cette fraction du cortège argileux était minoritaire et très faible. La CEC des argiles tient au nombre de substitutions qui affectent ses feuillets (Girard *et al.*, 2011). Plus les substitutions sont abondantes, plus la CEC est élevée. Pour les kaolinites et illites, les substitutions sont respectivement nulles et moyennes. Cette analyse permet de justifier la faible valeur de CEC de TB et TBV malgré l'incorporation d'un matériau parent au cortège argileux majoritaire.

Les CEC des modalités ont été relativement hétérogènes entre réplicats (en témoignent les valeurs de leurs écarts-types à chaque pas de temps). Des tendances à une augmentation ont toutefois été observées à t_1 (par rapport à t_0), à une diminution à t_2 (par rapport à t_1) et à une légère ré-augmentation à t_3 (par rapport à t_2). La CEC est corrélée positivement au pH. Entre t_0 et t_2 , le pH des modalités a eu tendance à s'acidifier. La baisse de pH entre t_0 et t_2 explique la tendance des CEC à s'appauvrir entre t_1 et t_2 (après qu'elles aient augmenté entre t_0 et t_1 suite à l'agrégation des fragments des matériaux parentaux). Les plus fortes valeurs observées à t_3 par rapport à t_2 , sont à imputer à l'apport d'amendements organiques à t_2 .

Au bilan, les CEC des modalités n'ont pas évolué significativement en un an. Elles sont restées faibles et éloignées de l'objectif guide (20 cmol+ kg^{-1}) avec des valeurs moyennes de $8,89 \pm 8,58 \text{ cmol+ kg}^{-1}$ pour T, $7,56 \pm 3,05 \text{ cmol+ kg}^{-1}$ pour TV, $11,54 \pm 4,56 \text{ cmol+ kg}^{-1}$ pour TB et $13,05 \pm 6,72 \text{ cmol+ kg}^{-1}$ pour TBV. La présence ou l'absence de vers n'a pas engendré de différence entre les valeurs de ce paramètre entre t_1 et t_3 . Ces résultats montrent un faible nombre de sites disponibles pour l'échange de cations qu'il convient d'analyser en association avec les cations échangeables pour évaluer l'aptitude des modalités à assurer la nutrition végétale. Il est à supposer qu'avec le temps, les CEC des modalités pourraient évoluer vers des valeurs plus élevées, notamment via l'apport de matières organiques dans le cadre du micro-maraîchage bio-intensif.

- **P₂O₅ assimilable**

À t₀, l'ensemble des modalités présentaient des teneurs en phosphore assimilable similaires proches de 0,50 g kg⁻¹, à l'exception de T, dont la teneur moyenne (0,34 ± 0,06 g kg⁻¹) était significativement inférieure à celles des autres modalités (0,48 ± 0,13 g kg⁻¹ dans TV, 0,51 ± 0,10 g kg⁻¹ dans TB et 0,50 ± 0,29 g kg⁻¹ dans TBV). Il est présumé que cette plus faible valeur provienne de l'hétérogénéité des échantillons prélevés à t₀. Ce postulat est d'ailleurs appuyé par le fait que T et TV ne différaient pas en termes de présence ou d'absence de vers à cette date et que leurs teneurs en P₂O₅ auraient ainsi dû être similaires à leur mise en place. Au regard des teneurs en P₂O₅ des modalités comparables à t₀, il est admis que le phosphore assimilable provient des matières organiques incorporées dans les mêmes proportions dans les deux formulations (avec et sans bentonite), plus particulièrement des fientes de volaille et du fumier de cheval composté. Bien qu'apporté en même quantité à l'origine, le phosphore assimilable n'a pas évolué de la même manière aux pas de temps selon les modalités. À t₁, les teneurs ont été légèrement plus élevées qu'à t₀ dans T, TB et TBV (respectivement + 0,15 g kg⁻¹, + 0,12 g kg⁻¹ et + 0,06 g kg⁻¹) tandis qu'elles ont été légèrement plus faibles dans TV (- 0,10 g kg⁻¹). Il est de nouveau remis en question l'homogénéité des échantillons prélevés à t₁ dans la mesure où T et TV n'étaient pas différenciés par la présence ou l'absence de vers à cette date et auraient dû évoluer de la même manière. Excepté pour TV, la tendance à la hausse des teneurs en P₂O₅ des modalités entre t₀ et t₁ semble traduire une minéralisation des matières organiques parentes et une libération de phosphore assimilable. Au regard des biomasses de phacélies significativement différentes sur les formulations incluant ou non une part de bentonite entre ces pas de temps, il aurait pu être observé une baisse plus importante de P₂O₅ assimilable dans TB et TBV. Néanmoins, il semble que les prélèvements effectués par les végétaux et les exportations de P à la récolte des cultures n'aient pas altéré les teneurs en P₂O₅ de ces modalités ; celles-ci ont été compensées par la libération de P à travers la minéralisation opérée. À t₁, bien que les différences entre les teneurs en P₂O₅ des modalités ne soient pas significatives, une tendance pour des teneurs plus élevées au sein de TB et TBV (respectivement 0,63 ± 0,15 g kg⁻¹ et 0,56 ± 0,04 g kg⁻¹) est observée par rapport à T et TV (respectivement 0,49 ± 0,03 g kg⁻¹ et 0,38 ± 0,10 g kg⁻¹). Cette différence pourrait être corrélée aux teneurs plus élevées en Ca²⁺ de T et TV, qui peuvent être à l'origine d'une insolubilisation du phosphore (Loué, 1987). Elles pourraient également provenir du nombre de sites d'adsorption plus faible (CEC) dans T et TV du fait de leur part moindre en argile par rapport à TB et TBV. Entre t₁ et t₂, période à laquelle ont été cultivées les premières cultures maraîchères, les formulations n'ont pas suivi les mêmes tendances évolutives au regard de leurs teneurs en P₂O₅. Ainsi, à t₂, les teneurs de TB ont été plus faibles qu'à t₁ (0,63 ± 0,15 g kg⁻¹ à t₁ et 0,48 ± 0,10 g kg⁻¹ à t₂), celles de TBV ont été proches (0,56 ±

0,04 g kg⁻¹ à t₁ et 0,50 ± 0,12 g kg⁻¹ à t₂) tandis que celles de T et TV ont été supérieures (pour T : 0,49 ± 0,03 g kg⁻¹ à t₁ et 0,52 ± 0,13 g kg⁻¹ à t₂ ; pour TV : 0,38 ± 0,10 g kg⁻¹ à t₁ et 0,56 ± 0,13 g kg⁻¹ à t₂). Plusieurs phénomènes sont susceptibles d'expliquer ces différences. D'abord, l'hétérogénéité des échantillons de TB prélevés à t₁ peut avoir engendré une moyenne des teneurs en P₂O₅ légèrement surestimée par rapport aux teneurs moyennes du profil. Ainsi, la tendance à la baisse de ce paramètre entre t₁ et t₂ pourrait en être faussée. En considérant que pour TB et TBV les teneurs en P₂O₅ n'ont globalement pas évolué et ont plutôt eu tendance à s'atténuer, il est envisagé que les exportations en P₂O₅ par les cultures ont excédé la production en cet élément (par la minéralisation des matières organiques). Cette hypothèse est corroborée par la baisse générale des activités biologiques (plus amplement détaillées en (3.2.1.2) à ces pas de temps pour l'ensemble des modalités. La baisse des teneurs en P₂O₅ est également à associer à l'augmentation des teneurs en Ca²⁺ (exprimées en CaO) aux mêmes pas de temps, et qui ont pu insolubiliser le phosphore assimilable. Les écarts-types importants des teneurs en P₂O₅ de T et TV entre t₁ et t₂ ne permettent de conclure à une véritable tendance évolutive inverse de ces deux modalités par rapport à TB et TBV à ces pas de temps. Il est plutôt envisagé que les teneurs en phosphore ont peu évolué à ces dates. À t₃, les teneurs en P₂O₅ de l'ensemble des modalités ont augmenté par rapport à t₂, sans que cette évolution soit significative. Cette élévation des teneurs en phosphore est attribuée à l'apport d'amendements organiques à t₂.

Au bilan, les teneurs en phosphore assimilable des quatre modalités ont toujours été supérieures à la limite guide – fixée pour atteindre des teneurs supérieures à 0,15 g kg⁻¹. L'évolution de ces teneurs n'est statistiquement pas significative entre t₀ et t₃ pour TV, TB et TBV mais l'est pour T. De la même manière, les valeurs de ce paramètre ont été comparables à chaque pas de temps entre les modalités. L'influence des vers sur ce paramètre n'est pas observée entre t₁ et t₃.

À t₃, les teneurs ont été de 0,77 ± 0,19 g kg⁻¹ pour T, 0,62 ± 0,10 g kg⁻¹ pour TV, 0,58 ± 0,19 g kg⁻¹ pour TB et 0,52 ± 0,13 g kg⁻¹ pour TBV. Bien que l'objectif soit atteint, ces teneurs sont bien au-delà de la limite et devront faire l'objet d'un suivi particulier pour des raisons environnementales. Ces teneurs excessives pourraient aussi inhiber la culture de certaines espèces de légumes (telles que la ciboulette, la laitue ou le radis) en provoquant une carence induite par une absorption limitée du magnésium et du calcium par les plantes (Ballot *et al.*, 2016). La composition minérale des cultures a donc été surveillée en tenant compte de ce risque potentiel.

- **K₂O**

En tenant compte de l'hétérogénéité des résultats obtenus (renseignée par les écarts-types élevés), les teneurs en K₂O des modalités sont restées relativement stables entre les pas de temps analytiques. À t₃, les modalités ont conservé des teneurs comparables à leurs valeurs initiales (+ 0,07 g kg⁻¹ dans T, - 0,46 g kg⁻¹ dans TV, - 0,27 g kg⁻¹ dans TB et - 0,31 g kg⁻¹ dans TBV). La comparaison des modalités aux différents pas de temps expérimentaux ne met pas en évidence de différence entre T, TV, TB et TBV. L'influence des vers n'a pas été observée entre t₁ et t₃.

Aux quatre pas de temps analytiques, les teneurs en K échangeable (exprimées en K₂O) des modalités sont restées largement supérieures à l'objectif guide fixé au-delà de 0,16 g kg⁻¹ avec des valeurs à t₃ de 1,62 ± 0,10 g kg⁻¹ pour T, 1,05 ± 0,37 g kg⁻¹ pour TV, 1,49 ± 0,13 g kg⁻¹ pour TB et 1,34 ± 0,08 g kg⁻¹ pour TBV. Si le potassium est essentiel au développement des productions végétales, des teneurs excédentaires en cet élément peuvent occasionner des dysfonctionnements dans les sols. Parmi les plus courants, sont souvent observées des formes d'antagonisme par concurrence ionique au détriment des ions Ca²⁺ et Mg²⁺ qui peuvent s'accompagner d'un appauvrissement du complexe argilo-humique, ou encore être combinées au phénomène d'absorption sélective des racines qui tendent à favoriser le prélèvement d'ions K⁺ face aux ions Ca²⁺. Un accroissement de phénomènes chlorotiques par le blocage du fer et du manganèse est également susceptible de survenir (Cochrane & Cochrane, 2009). Comme pour le phosphore, les teneurs en potassium ont ainsi fait l'objet d'une attention très particulière au sein de la composition minérale des végétaux pour s'assurer de l'absence de signes précurseurs ou témoins de ces phénomènes.

- **Na₂O**

À t₀, les teneurs en Na₂O des deux formulations initiales différaient significativement avec des valeurs moyennes supérieures pour les 6 réplicats qui constituaient TB et TBV (non dissociés à cette période) de 0,38 ± 0,06 g kg⁻¹ et des valeurs moyennes plus faibles pour les 6 réplicats qui constituaient T et TV de 0,28 ± 0,02 g kg⁻¹. Il est envisagé que la part d'argile apportée par la bentonite dans les mélanges pourrait avoir retenu une quantité plus importante de Na⁺ à la surface de ses feuillets lors de la mise en place des modalités. À t₁, les teneurs en Na₂O de l'ensemble des modalités ont été significativement plus faibles qu'à t₀ si bien que les teneurs moyennes de toutes les modalités confondues n'étaient plus que de 0,02 ± 0,00 g kg⁻¹. Les liaisons des ions Na⁺ étant les plus faibles au sein du complexe argilo-humique, il est probable que les ions prédominants (Ca²⁺, Mg²⁺) aux liaisons les plus fortes aient occupé les sites du complexe et entraîné la lixiviation des ions Na⁺ vers les horizons de

profondeur. À t_2 les teneurs sont restées faibles et ont été comparables aux teneurs des 4 modalités à t_1 (avec des valeurs moyennes de $0,02 \pm 0,00 \text{ g kg}^{-1}$ pour T, $0,02 \pm 0,01 \text{ g kg}^{-1}$ pour TV, $0,01 \pm 0,00 \text{ g kg}^{-1}$ pour TB et $0,01 \pm 0,02 \text{ g kg}^{-1}$ pour TBV à t_2). À t_3 , les teneurs en Na_2O des modalités ont été significativement supérieures à leurs teneurs à t_2 . L'augmentation significative des concentrations en Na_2O des modalités à ce pas de temps est à associer à l'apport d'amendements organiques à t_2 . Comme pour les autres paramètres analysés, l'influence des vers n'a pas été observée entre t_1 et t_3 .

- **MgO**

Les teneurs en magnésium échangeable (exprimées en MgO) ont eu tendance à augmenter pour l'ensemble des modalités entre t_0 et t_2 ($+ 0,83 \text{ g kg}^{-1}$ dans T, $+ 0,89 \text{ g kg}^{-1}$ dans TV, $+ 0,38 \text{ g kg}^{-1}$ dans TB et $+ 0,57 \text{ g kg}^{-1}$ dans TBV). À t_3 , les teneurs ont été similaires à celles de t_2 pour T et plus faibles pour les autres modalités ($- 0,35 \text{ g kg}^{-1}$ dans TV, $- 0,20 \text{ g kg}^{-1}$ dans TB et $- 0,25 \text{ g kg}^{-1}$ dans TBV). Les tests statistiques montrent que les variations des teneurs en MgO ont été significatives pour T et TV entre t_0 et t_1 et pour TB et TBV entre t_0 et t_2 puis que les teneurs n'ont plus évolué de manière significative aux pas de temps analytiques. Après un an, seules les teneurs en MgO de T et TV ont progressé significativement par rapport à t_0 ($+ 0,83 \text{ g kg}^{-1}$ dans T et $+ 0,54 \text{ g kg}^{-1}$ dans TV). La tendance à une évolution positive des teneurs en magnésium échangeable des 4 modalités entre t_0 et t_2 traduit vraisemblablement la minéralisation de la matière organique parentale. La diminution des teneurs en MgO de l'ensemble des modalités à t_3 peut, quant à elle, être attribuée aux prélèvements en cet élément par les légumes cultivés, ainsi que par un éventuel transfert vers les horizons de profondeur par lixiviation.

À t_3 , les teneurs en MgO étaient de $1,14 \pm 0,28 \text{ g kg}^{-1}$ pour T, $0,85 \pm 0,07 \text{ g kg}^{-1}$ pour TV, $1,12 \pm 0,03 \text{ g kg}^{-1}$ pour TB et $0,99 \pm 0,07 \text{ g kg}^{-1}$ pour TBV. Ces valeurs excèdent toutes largement la gamme de valeurs cibles établie entre $0,22$ et $0,52 \text{ g kg}^{-1}$ et pourraient représenter un frein aux prélèvements d'autres éléments majeurs et oligo-éléments de charges positives. En teneurs excédentaires, les ions Mg^{2+} peuvent notamment remplacer les ions Ca^{2+} au sein du complexe argilo-humique et altérer la stabilité structurale du système (Colomb, 2017).

- **CaO**

En un an, les teneurs en CaO des modalités n'ont pas évolué significativement. Aucune différence n'est observée pour une même modalité aux différents pas de temps (à l'exception de TBV dont les teneurs ont augmenté de $2,65 \text{ g kg}^{-1}$ à t_2 par rapport à t_1). Des tendances ont majoritairement été observées pour ce paramètre. Dans l'ensemble, à t_0 , les modalités T et TV présentaient des teneurs inférieures à celles de TB et TBV ($1,73 \pm 0,10 \text{ g kg}^{-1}$ pour T, $1,62 \pm 0,25 \text{ g kg}^{-1}$ pour TV, $2,84 \pm 0,21 \text{ g kg}^{-1}$ pour TB et $2,21 \pm 0,50 \text{ g kg}^{-1}$ pour TBV). Ces différences n'ont plus été observées à t_1 ($2,86 \pm 1,18 \text{ g kg}^{-1}$ dans T, $3,45 \pm 1,24 \text{ g kg}^{-1}$ dans TV, $3,36 \pm 1,22 \text{ g kg}^{-1}$ dans TB et $2,56 \pm 1,35 \text{ g kg}^{-1}$ dans TBV). Elles ont été de nouveau significatives à t_2 ($2,34 \pm 0,19 \text{ g kg}^{-1}$ dans T, $2,67 \pm 0,05 \text{ g kg}^{-1}$ dans TV, $4,64 \pm 0,26 \text{ g kg}^{-1}$ dans TB et $4,86 \pm 1,21 \text{ g kg}^{-1}$ dans TBV). À t_3 , aucune différence significative n'a été mise en évidence entre les teneurs en CaO des modalités, mais une tendance à des plus fortes teneurs a été observée dans TB et TBV ($2,71 \pm 0,17 \text{ g kg}^{-1}$ dans T, $2,26 \pm 0,29 \text{ g kg}^{-1}$ dans TV, $3,75 \pm 0,50 \text{ g kg}^{-1}$ dans TB et $4,01 \pm 0,59 \text{ g kg}^{-1}$ dans TBV). Ces tendances s'expliquent par la présence de bentonite de nature calcique, qui renferme une grande quantité de Ca. Par leurs écarts-types élevés, les résultats témoignent de la mise en place récente des modalités et de leur grande hétérogénéité. À t_1 , les teneurs en CaO de toutes les modalités ont progressé à la hausse par rapport à t_0 et ont montré la mise en place de la minéralisation des matières organiques parentes (parmi lesquelles les fientes de volailles sont supposées particulièrement chargées en cet élément). À t_2 , les modalités avec ou sans bentonite ont été différenciées au regard de leurs teneurs en CaO. Les valeurs ont été significativement plus élevées dans les modalités avec bentonite ($2,34 \pm 0,19 \text{ g kg}^{-1}$ dans T, $2,67 \pm 0,05 \text{ g kg}^{-1}$ dans TV, $4,64 \pm 0,26 \text{ g kg}^{-1}$ dans TB et $4,86 \pm 1,21 \text{ g kg}^{-1}$ dans TBV). Les teneurs en CaO de TB et TBV ont ainsi eu tendance à augmenter entre t_0 et t_2 tandis que celles de T et TV ont eu tendance à diminuer entre ces deux pas de temps. Plusieurs hypothèses sont avancées pour expliquer ces tendances inverses. D'abord, il est probable que, du fait de leurs CEC légèrement plus faibles et de leur moindre proportion d'argile, T et TV n'aient pas eu assez de sites porteurs (au sein de leurs complexes argilo-humiques) capables de maintenir la même quantité d'ions Ca^{2+} que les modalités avec bentonite. Il est également probable que les ions Ca^{2+} de T et TV aient été lixiviés vers leurs horizons profonds. Par ailleurs, il est connu que la baisse de pH peut entraîner des déséquilibres au sein des liaisons ioniques (Girard *et al.*, 2011). Ainsi, avec la diminution du pH de T et TV entre t_0 et t_1 , les ions Ca^{2+} ont pu être libérés par le complexe argilo-humique et remplacés, pour partie, par les ions H^+ en solution. Cette action pourrait d'ailleurs s'être combinée au prélèvement en Ca par les cultures maraîchères à cette période. Enfin, il est possible qu'une partie des fractions les plus fines de la bentonite ait été altérée et ait libéré des ions Ca^{2+} . À t_3 , les modalités ont présenté des teneurs moyennes en CaO inférieures à celles de t_2 ($-0,41 \text{ g kg}^{-1}$ dans TV, $-0,89 \text{ g kg}^{-1}$ dans

TB et $-0,85 \text{ g kg}^{-1}$ dans TBV), excepté pour T dont la teneur a été légèrement plus élevée ($+0,37 \text{ g kg}^{-1}$). Pour TV, TB et TBV, cette tendance à une diminution progressive est à attribuer aux prélèvements par les cultures ainsi qu'à une éventuelle lixiviation vers les horizons profonds.

À t_3 , les modalités ont des teneurs en CaO de $2,71 \pm 0,17 \text{ g kg}^{-1}$ pour T, $2,26 \pm 0,29 \text{ g kg}^{-1}$ pour TV, $3,75 \pm 0,50 \text{ g kg}^{-1}$ pour TB et $4,01 \pm 0,59 \text{ g kg}^{-1}$ pour TBV. Ces valeurs s'inscrivent dans la gamme de valeur guide fixée entre 2,5 et $4,38 \text{ g kg}^{-1}$ pour T, TB et TBV et en sont très proches pour TV.

3.2.1.2. Activités biologiques

Les paramètres biologiques (i.e. respirométrie, activités enzymatiques et biomasse moléculaire fongique) ont été analysés et sont présentés dans la figure 19. Comme pour les paramètres physico-chimiques, la description des résultats s'articule autour des grandes tendances (toutes modalités confondues), puis compare les données des modalités T et TB. L'effet des vers sur les modalités TV et TBV par rapport à T et TB est analysée avant de détailler les résultats à t_3 .

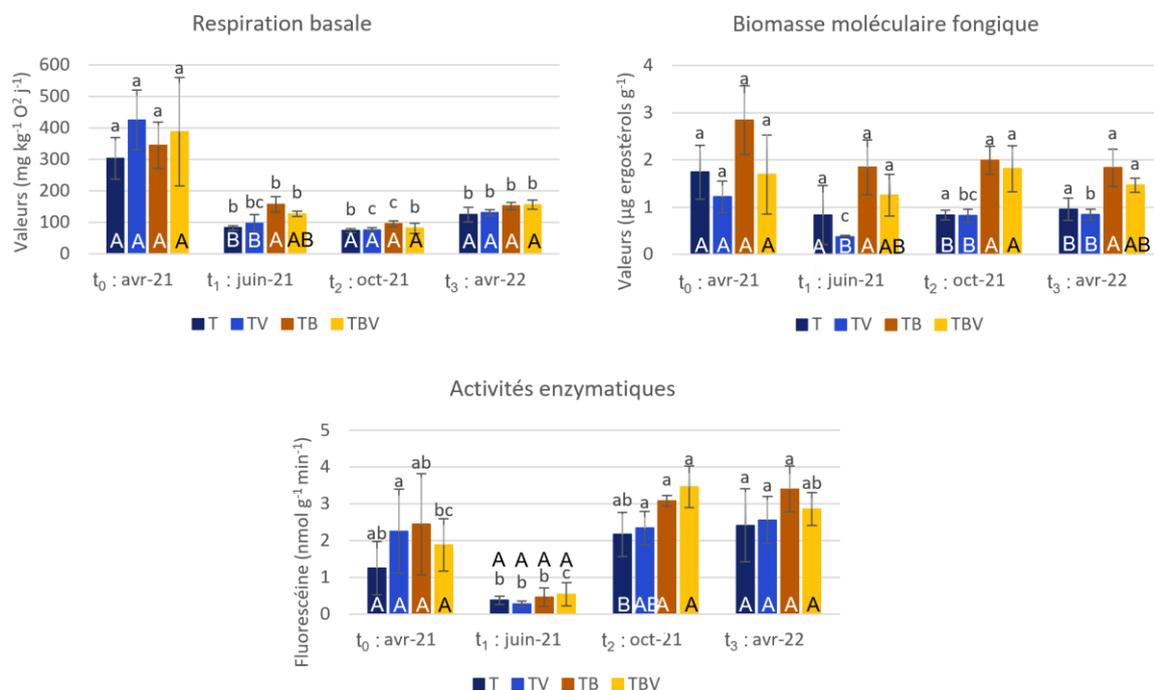


Figure 19 : Paramètres biologiques des couches supérieures des modalités aux différents pas de temps. TB, avec bentonite ; TBV, avec bentonite et vers (*L. terrestris*) ; T, sans bentonite ; TV, sans bentonite et avec vers (*L. terrestris*) (moyenne \pm ET ; n = 3).

Les lettres minuscules indiquent une différence significative pour une même modalité aux différents pas de temps. Les lettres majuscules montrent une différence significative entre les 4 modalités pour un même pas de temps.

- **Respirométrie**

Les respirations basales des modalités ont suivi les mêmes variations selon les pas de temps. Globalement, à t_1 , les valeurs ont été significativement inférieures à celles de t_0 . À t_2 , les valeurs de respirométrie de T, TV et TBV ont été comparables à leurs valeurs à t_1 alors qu'elles ont été significativement plus basses pour TB. À t_3 , les valeurs de respirométrie des modalités ont été supérieures à leurs valeurs à t_2 . Pour TV et TB, ces différences ont été significatives. À t_0 , les valeurs moyennes de ce paramètre étaient de $303 \pm 66 \text{ mg kg}^{-1} \text{ O}_2 \text{ j}^{-1}$ pour T, $425 \pm 94 \text{ mg kg}^{-1} \text{ O}_2 \text{ j}^{-1}$ pour TV, $345 \pm 75 \text{ mg kg}^{-1} \text{ O}_2 \text{ j}^{-1}$ pour TB et $388 \pm 172 \text{ mg kg}^{-1} \text{ O}_2 \text{ j}^{-1}$ pour TBV. À l'instar d'autres paramètres (e.g. CE, CaCO_3 actif, CEC, P_2O_5 assimilable, K_2O), les écarts-types élevés des valeurs de respirométrie pour une même modalité attestent de la mise en œuvre récente des sols et de leur grande hétérogénéité à t_0 . À t_1 , la respirométrie des modalités a diminué de manière significative. Les valeurs étaient alors de $82 \pm 7 \text{ mg kg}^{-1} \text{ O}_2 \text{ j}^{-1}$ pour T, $97 \pm 27 \text{ mg kg}^{-1} \text{ O}_2 \text{ j}^{-1}$ pour TV, $157 \pm 25 \text{ mg kg}^{-1} \text{ O}_2 \text{ j}^{-1}$ pour TB et $126 \pm 8 \text{ mg kg}^{-1} \text{ O}_2 \text{ j}^{-1}$ pour TBV. Si aucune différence significative n'a été constatée pour les valeurs de ce paramètre entre les modalités à t_0 , t_2 et t_3 , il est à souligner des valeurs qui tendaient à être supérieures au sein des formulations intégrant de la bentonite.

À t_2 , les valeurs de respiration basale des modalités ont atteint leurs niveaux les plus bas avec des valeurs de $73 \pm 7 \text{ mg kg}^{-1} \text{ O}_2 \text{ j}^{-1}$ pour T, $76 \pm 7 \text{ mg kg}^{-1} \text{ O}_2 \text{ j}^{-1}$ pour TV, $95 \pm 10 \text{ mg kg}^{-1} \text{ O}_2 \text{ j}^{-1}$ pour TB et $81 \pm 16 \text{ mg kg}^{-1} \text{ O}_2 \text{ j}^{-1}$ pour TBV et ont été significativement inférieures à leurs valeurs à t_0 . Avec l'apport d'amendements organiques à t_2 , les respirations basales des modalités ont été supérieures à t_3 . Elles ont atteint des valeurs de $125 \pm 23 \text{ mg kg}^{-1} \text{ O}_2 \text{ j}^{-1}$ pour T, $130 \pm 10 \text{ mg kg}^{-1} \text{ O}_2 \text{ j}^{-1}$ pour TV, $151 \pm 12 \text{ mg kg}^{-1} \text{ O}_2 \text{ j}^{-1}$ pour TB et $156 \pm 14 \text{ mg kg}^{-1} \text{ O}_2 \text{ j}^{-1}$ pour TBV. Cette évolution à la hausse traduit la capacité des organismes à opérer une minéralisation rapide de la matière organique nouvellement introduite dans les modalités. À t_3 , les respirations basales de TB et TBV étaient supérieures à celles de T et TV. Bien que la différence ne soit pas significative, il semble que la présence de bentonite ait favorisé les activités biologiques. À t_3 , les valeurs de respiration basale des modalités ont été confrontées à celle du sol témoin ainsi qu'à la valeur moyenne de ce paramètre pour les sols cultivés français (établie dans le cadre du projet Bioindicateurs mené par l'ADEME). Il en ressort que ces valeurs étaient inférieures à celle du sol témoin ($232 \pm 21 \text{ mg kg}^{-1} \text{ O}_2 \text{ j}^{-1}$) et à la moyenne des sols cultivés français ($487 \pm 252 \text{ mg kg}^{-1} \text{ O}_2 \text{ j}^{-1}$). Ces résultats mettent en évidence une plus faible activité des micro-organismes dans les modalités à t_3 .

Au bilan, les variations des valeurs de respirométrie des modalités aux pas de temps montrent l'instauration d'une communauté de micro-organismes capables de minéraliser les matières organiques apportées aux modalités. Par rapport aux valeurs de ce paramètre à t_0 ,

et comparées au sol témoin, les respirations basales des quatre modalités sont globalement plus faibles et pourraient mettre en évidence la présence de facteurs limitants tels que le pH (Yang *et al.*, 2022) ou encore un tassement trop important (Jensen *et al.*, 1996 ; Weisskopf *et al.*, 2010). Ces résultats sont à associer à la mise en place récente des modalités dans des conditions qui limitent l'implantation de nouvelles communautés microbiennes (multiplicité de barrières à franchir telles que la toile de paillage au sol, la serre expérimentale et les mésocosmes). Les pratiques maraîchères bio-intensives visent à (i) restituer les résidus culturels (ii) limiter le travail du sol et (iii) apporter différentes sources de matières organiques suivant les saisons (matières carbonées en automne et azotées à la sortie de l'hiver, pour favoriser l'éveil des micro-organismes). Le respect de ces pratiques pourrait inoculer régulièrement de nouvelles communautés et augmenter les activités biologiques et la respiration basale.

- **Biomasses moléculaires fongiques**

Les biomasses moléculaires fongiques n'ont pas suivi les mêmes variations selon les modalités. À t_0 , aucune différence significative n'a été mise en évidence entre les modalités (avec des valeurs de $1,74 \pm 0,57 \mu\text{g ergostérols g}^{-1}$ pour T, $1,22 \pm 0,34 \mu\text{g ergostérols g}^{-1}$ pour TV, $2,84 \pm 0,73 \mu\text{g ergostérols g}^{-1}$ pour TB et $1,69 \pm 0,83 \mu\text{g ergostérols g}^{-1}$ pour TBV). À t_1 , les valeurs étaient toutes inférieures à t_0 ($-0,9 \mu\text{g ergostérols g}^{-1}$ pour T, $-0,85 \mu\text{g ergostérols g}^{-1}$ pour TV, $-1 \mu\text{g ergostérols g}^{-1}$ pour TB et $-0,44 \mu\text{g ergostérols g}^{-1}$ pour TBV). Seules les valeurs de biomasses moléculaires fongiques de TV ont été significativement plus faibles à t_1 qu'à t_0 . À t_2 , les biomasses moléculaires fongiques de T et TB ont été assez proches de leurs valeurs à t_1 ($0,83 \pm 0,10 \mu\text{g ergostérols g}^{-1}$ pour T et $1,99 \pm 0,30 \mu\text{g ergostérols g}^{-1}$ pour TB). Pour TV et TBV, ces valeurs ont été légèrement plus élevées à t_2 qu'à t_1 ($0,82 \pm 0,14 \mu\text{g ergostérols g}^{-1}$ pour TV et $1,82 \pm 0,49 \mu\text{g ergostérols g}^{-1}$ pour TBV). À t_3 , les biomasses moléculaires fongiques des 4 modalités ont été proches de leurs valeurs à t_2 ($0,95 \pm 0,24 \mu\text{g ergostérols g}^{-1}$ pour T, $0,84 \pm 0,11 \mu\text{g ergostérols g}^{-1}$ pour TV, $1,83 \pm 0,39 \mu\text{g ergostérols g}^{-1}$ pour TB et $1,47 \pm 0,15 \mu\text{g ergostérols g}^{-1}$ pour TBV). À partir de t_2 , des différences significatives ont été mises en évidence entre les biomasses moléculaires fongiques des modalités, avec des valeurs significativement plus faibles dans T et TV et plus élevées dans TB et TBV. Comme pour la respirométrie, ces tendances évolutives mettent en évidence une importante activité des champignons à l'installation des modalités (du fait de l'incorporation de matières organiques fraîches et de leur brassage) ; celle-ci s'est atténuée au cours du temps pour atteindre une certaine stabilité après un an.

L'effet des vers n'est statistiquement pas prouvé entre t_1 et t_3 . Néanmoins, les modalités avec vers semblent présenter des valeurs légèrement plus faibles pour ce paramètre.

À t_3 , les biomasses moléculaires fongiques de T, TV, TB et TBV étaient relativement proches de celle du sol maraîcher témoin $1,08 \pm 0,14 \mu\text{g g}^{-1}$ et inférieures à celle des sols cultivés français ($2,71 \pm 1,68 \mu\text{g ergostérols g}^{-1}$, dont l'importance des écart-types traduit une grande hétérogénéité). Ainsi, au regard des résultats, les biomasses moléculaires fongiques des modalités semblent avoir évolué favorablement et traduire un état fonctionnel de ces sols pour un usage en maraîchage.

L'hypothèse émise lors de l'analyse du pH, selon laquelle la divergence observée entre l'évolution des pH des modalités entre t_1 et t_2 pourrait provenir des activités biologiques, est corroborée par les différences significatives observées pour les valeurs de respiration basale et de biomasse moléculaire fongique entre T/TV et TB/TBV à t_1 . Bien qu'elles ne diffèrent pas significativement entre les modalités, les valeurs de CEC couplées aux valeurs de respirométrie et de biomasse moléculaire fongique pourraient témoigner de l'initiation de la formation d'un complexe argilo-humique plus stable au sein de TB et TBV que dans T et TV et justifier de ce fait la moindre dilution des ions H^+ de ces modalités par rapport à celles sans bentonite. Cette hypothèse est d'ailleurs appuyée par les activités biologiques plus élevées dans TB et TBV qui ont pu aboutir à la formation de liaisons plus stables du complexe par la libération d'exsudats polysaccharidiques (Girard *et al.*, 2011).

- **Activités enzymatiques**

À t_0 , les activités enzymatiques des modalités étaient comparables entre elles et supérieures au sol maraîcher témoin ($1,25 \pm 0,72 \text{ nmol g}^{-1} \text{ min}^{-1}$ dans T, $2,25 \pm 1,14 \text{ nmol g}^{-1} \text{ min}^{-1}$ dans TV, $2,44 \pm 1,38 \text{ nmol g}^{-1} \text{ min}^{-1}$ dans TB, $1,88 \pm 0,71 \text{ nmol g}^{-1} \text{ min}^{-1}$ dans TBV et $1,19 \pm 0,23 \text{ nmol g}^{-1} \text{ min}^{-1}$ dans le témoin). Comme pour la respirométrie et la biomasse moléculaire fongique, les activités enzymatiques ont été significativement plus faibles à t_1 qu'à t_0 pour l'ensemble des modalités ($- 0,88 \text{ nmol g}^{-1} \text{ min}^{-1}$ pour T, $- 1,98 \text{ nmol g}^{-1} \text{ min}^{-1}$ pour TV, $- 1,99 \text{ nmol g}^{-1} \text{ min}^{-1}$ pour TB et $- 1,34 \text{ nmol g}^{-1} \text{ min}^{-1}$ pour TBV). À t_2 , les valeurs ont été supérieures à celles de t_1 (de manière significative pour TV, TB et TBV). Cette augmentation est principalement attribuée à la hausse des températures à cette période qui ont favorisé la reprise des activités biologiques en général. À t_2 , des différences significatives ont également été mises en évidence entre T, TB et TBV, avec des valeurs significativement supérieures dans TB et TBV. Dans l'ensemble, une tendance à de plus fortes valeurs d'activités enzymatiques a été observée dans les modalités avec bentonite à partir de t_2 . Cette tendance a persisté à t_3 . La tendance à une stabilisation de ce paramètre entre t_2 et t_3 peut également être imputée à

la saisonnalité. En effet, avec l'arrivée de l'automne, les activités biologiques ont tendance à diminuer. Il est supposé que leur maintien, voire leur légère hausse, proviendrait de l'apport d'amendements organiques entre ces deux pas de temps. À t_3 , les valeurs de ce paramètre ont été de $2,41 \pm 1,00 \text{ nmol g}^{-1} \text{ min}^{-1}$ pour T, $2,56 \pm 0,64 \text{ nmol g}^{-1} \text{ min}^{-1}$ pour TV, $3,40 \pm 0,63 \text{ nmol g}^{-1} \text{ min}^{-1}$ pour TB et $2,86 \pm 0,45 \text{ nmol g}^{-1} \text{ min}^{-1}$ pour TBV. Ces valeurs étaient proches de celles de t_2 pour l'ensemble des modalités. Par rapport au sol maraîcher témoin, les valeurs des activités enzymatiques des modalités à t_3 ont été légèrement supérieures.

De plus faibles valeurs de ce bioindicateur par rapport à un sol de référence peuvent traduire une perturbation du milieu (Dick & Kandeler, 2005). Au regard des résultats, les modalités semblent bénéficier d'activités biologiques fonctionnelles pour un usage en maraîchage. Les valeurs s'inscrivent également dans la gamme des sols cultivés français (comprise entre 0 et $110 \text{ nmol min}^{-1} \text{ g}^{-1}$).

3.2.2. Couches minérales

À l'issue de l'expérimentation (t_3), les mésocosmes ont été sciés de manière verticale de sorte à observer les profils et à échantillonner leurs couches de profondeurs. Les échantillons prélevés ont été analysés pour les mêmes paramètres qu'à t_0 . Les valeurs ont été confrontées de sorte à évaluer l'évolution des caractéristiques des horizons profonds en un an. Les résultats sont présentés dans le tableau 26.

Tableau 26 : Valeurs des paramètres chimiques associés à la fertilité des couches minérales des modalités à leur mise en place (t_0) et après 1 an (t_3) (moyenne \pm ET ; $n = 3$)

	T		TV		TB		TBV	
	t_0	t_3	t_0	t_3	t_0	t_3	t_0	t_3
pH	$8,81 \pm 0,09$ (a)	$8,01 \pm 0,09$ (b) (A)	$8,81 \pm 0,09$ (a)	$7,96 \pm 0,08$ (b) (AB)	$8,80 \pm 0,06$ (a)	$7,83 \pm 0,04$ (b) (B)	$8,80 \pm 0,06$ (a)	$7,80 \pm 0,04$ (b) (B)
CE ($\mu\text{S cm}^{-1}$)	262 ± 15 (b)	1170 ± 63 (a)	262 ± 15 (b)	1238 ± 247 (a)	244 ± 15 (b)	1352 ± 48 (a)	244 ± 15 (b)	1371 ± 112 (a)
CaCO ₃ total (g kg^{-1})	791 ± 17 (a) (A)	651 ± 2 (b) (A)	791 ± 17 (a) (A)	624 ± 21 (b) (A)	657 ± 16 (a) (B)	490 ± 34 (b) (B)	657 ± 16 (a) (B)	467 ± 32 (b) (B)
CaCO ₃ actif (g kg^{-1})	76 ± 9 (A)	110 ± 21 (A)	76 ± 9 (A)	109 ± 16 (A)	52 ± 5 (B)	61 ± 9 (B)	52 ± 5 (B)	65 ± 15 (B)
CEC ($\text{cmol}^+ \text{kg}^{-1}$)	$13,49 \pm 2,01$ (B)	$13,39 \pm 3,30$ (B)	$13,49 \pm 2,01$ (B)	$17,09 \pm 4,09$ (AB)	$19,81 \pm 1,72$ (A)	$20,46 \pm 4,19$ (AB)	$19,81 \pm 1,72$ (A)	$23,99 \pm 1,64$ (A)
K ₂ O (g kg^{-1})	$0,15 \pm 0,00$ (b) (B)	$0,43 \pm 0,07$ (a) (AB)	$0,15 \pm 0,00$ (b) (B)	$0,39 \pm 0,05$ (a) (B)	$0,31 \pm 0,03$ (A)	$0,37 \pm 0,01$ (B)	$0,31 \pm 0,03$ (b) (A)	$0,52 \pm 0,03$ (a) (A)
MgO (g kg^{-1})	$0,64 \pm 0,03$ (B)	$0,72 \pm 0,08$ (B)	$0,64 \pm 0,03$ (B)	$0,78 \pm 0,11$ (B)	$1,04 \pm 0,07$ (A)	$1,24 \pm 0,25$ (A)	$1,04 \pm 0,07$ (b) (A)	$1,41 \pm 0,15$ (a) (A)
Na ₂ O (g kg^{-1})	$0,06 \pm 0,00$ (B)	$0,12 \pm 0,02$	$0,06 \pm 0,00$ (B)	$0,13 \pm 0,08$	$0,15 \pm 0,01$ (A)	$0,26 \pm 0,08$	$0,15 \pm 0,01$ (A)	$0,24 \pm 0,05$
CaO (g kg^{-1})	$23,73 \pm 3,28$ (a)	$1,36 \pm 0,04$ (b) (A)	$23,73 \pm 3,28$ (a)	$1,31 \pm 0,05$ (b) (A)	$18,35 \pm 3,40$ (a)	$0,84 \pm 0,08$ (b) (B)	$18,35 \pm 3,40$ (a)	$0,77 \pm 0,02$ (b) (B)

T, sans bentonite, TV, avec bentonite et vers (*L. terrestris*), TB, avec bentonite, TBV, avec bentonite et vers (*L. terrestris*). Les lettres minuscules indiquent une différence significative pour une même modalité à t_0 et à t_3 . Les lettres majuscules montrent une différence significative entre les 4 modalités pour un même pas de temps.

Les pH des couches minérales ont diminué significativement entre t_0 et t_3 pour l'ensemble des modalités : de 0,80 unités pour T, 0,85 unités pour TV, 0,97 unités pour TB et

1 unité pour TBV. À t_3 , les pH des modalités avec bentonite ont été inférieures à celles sans bentonite (de manière significative par rapport à T).

La diminution des pH des horizons profonds est à associer à leurs teneurs en CaCO_3 total qui ont significativement diminué entre t_0 et t_3 pour l'ensemble des modalités. Pour expliquer la nature de ces variations, il est supposé que le CaCO_3 total des particules les plus fines des modalités ait été libéré sous forme de CaCO_3 actif. Cette hypothèse est d'ailleurs partiellement validée par les évolutions positives des teneurs en CaCO_3 actif de l'ensemble des horizons profonds des modalités. Bien qu'atténuées, les teneurs en CaCO_3 total des horizons profonds des modalités demeurent très fortement calcaires (selon le système de classification proposé par Baize (2018)) pour T et TV avec des valeurs supérieures à 50 % et fortement calcaires pour TB et TBV avec des valeurs comprises entre 25 et 50 % après un an.

Les pH plus faibles des horizons profonds des modalités ont également eu un impact sur leurs CE qui ont augmenté significativement à t_3 par rapport à t_0 . À l'issue de l'expérimentation, les CE des modalités étaient de $1170 \mu\text{S cm}^{-1}$ pour T, $1238 \mu\text{S cm}^{-1}$ pour TV, $1352 \mu\text{S cm}^{-1}$ pour TB et $1371 \mu\text{S cm}^{-1}$ pour TBV. Aucune différence significative n'a été mise en évidence entre les modalités à t_3 . Sur le plan agronomique, les CE des horizons profonds des modalités élaborées à partir de bentonite ont tendance à être plus élevées que celles des modalités sans bentonite. À t_3 , les CE des horizons profonds sont très proches de celles des horizons de surface des Technosols. L'augmentation des valeurs de CE est étroitement corrélée à la CEC et aux cations échangeables, plus particulièrement à leurs teneurs en Na^{2+} (exprimées en Na_2O). Elle dépend en effet de la concentration ionique du sol et est d'autant plus importante que la solution du sol est chargée en sels. Avec des CEC légèrement plus importantes, les modalités élaborées avec de la bentonite ont une capacité à retenir une plus grande quantité de cations échangeables, expliquant les valeurs de CE légèrement plus élevées que celles des modalités n'en incluant pas.

Globalement les CEC des horizons profonds des modalités sont restées relativement stables. Elles n'ont que peu évolué pour T (de $13,49 \pm 2,01$ à $13,39 \pm 3,30 \text{ cmol+ kg}^{-1}$) et TB (de $19,81 \pm 1,72$ à $20,46 \pm 4,19 \text{ cmol+ kg}^{-1}$) et ont plutôt eu tendance à augmenter pour TV (de $13,49 \pm 2,01$ à $17,09 \pm 4,09 \text{ cmol+ kg}^{-1}$) et TBV (de $19,81 \pm 1,72$ à $23,99 \pm 1,64 \text{ cmol+ kg}^{-1}$). Bien que les tests statistiques ne mettent pas en évidence de différence significative, deux constats sont à effectuer. D'abord, les horizons profonds constitués à partir de bentonite présentent, dès leur mise en place, des valeurs de CEC supérieures à celles des horizons profonds des modalités sans bentonite. Ensuite, l'action de bioturbation des vers semble avoir favorisé l'augmentation des valeurs de CEC des horizons profonds. Pour appuyer ce constat, soulignons que la majorité des vers a été retrouvée à t_3 dans les horizons profonds des modalités dans

lesquels ils avaient été inoculés et que seule une faible partie d'entre eux a été retrouvée en surface.

Les teneurs en CaO ont diminué significativement pour l'ensemble des modalités. À t_3 , des différences significatives entre modalités avec et sans bentonite ont été mises en évidence avec des teneurs significativement plus élevées dans T et TV (respectivement $1,36 \pm 0,04$ g kg⁻¹ et $1,31 \pm 0,05$ g kg⁻¹) que dans TB et TBV (respectivement $0,84 \pm 0,08$ g kg⁻¹ et $0,77 \pm 0,02$ g kg⁻¹).

Contrairement aux teneurs en CaO, les teneurs en K₂O, MgO et Na₂O ont augmenté (significativement pour K₂O dans T, TV et TBV et pour MgO uniquement dans TBV) pour l'ensemble des modalités. L'augmentation de ces teneurs peut résulter de la diffusion de ces éléments depuis les horizons de surface vers les horizons profonds. La présence des vers et leur activité de bioturbation semblent avoir joué un rôle positif au regard des teneurs en K₂O, MgO et CaO des horizons profonds de TV et TBV. À t_3 , les teneurs en K₂O ont été significativement plus élevées dans TBV que dans TV. Des teneurs intermédiaires ont été observées dans T et TB. Par ailleurs, à t_3 , les teneurs en MgO ont été significativement plus élevées dans TB et TBV que dans T et TV. Cette différence avait déjà été observée à t_0 et a donc persisté dans le temps. En revanche, aucune différence significative n'a été mise en évidence entre les teneurs en Na₂O des modalités à t_3 alors qu'elles différaient à t_0 , avec des valeurs significativement plus élevées dans TB et TBV.

Au bilan, les paramètres physico-chimiques des horizons profonds des modalités ont évolué en un an et des différences tendent à se dessiner entre les formulations incluant de la bentonite et celles en étant exemptes.

3.2.3. Profils des Technosols construits après 1 an

Les Technosols ont été classés parmi les Technosols Isolatic (définis comme des Technosols sans contact avec un autre sol) au moyen du système de classification international érigé par l'IUSS Working Group WRB 2014. Le travail a ensuite porté sur l'observation des profils au sein des mésocosmes afin d'examiner l'enracinement des cultures, l'épaisseur des horizons, leurs limites, la classe de texture, la structure, l'humidité, la friabilité et la compacité (tableau 27). Les figures 20 et 21 illustrent respectivement les profils des modalités dans leur ensemble et les éléments de détails observés lors de leur description.

Tableau 27 : Synthèse de l'observation des profils des modalités expérimentales.

	T	TV	TB	TBV
Enracinement				
Profondeur moyenne	41 cm	34 cm	47 cm	48 cm
Abondance des racines	8 – 16/dm ²	8 – 16/dm ²	8 – 16/dm ²	8 – 16/dm ²
Distribution des racines - Orientation	Verticale régulière	Verticale régulière	Verticale régulière	Verticale régulière
Dimension	Fines	Très fines	Très fines à fines	Très fines
Pénétration	Non déviées	Non déviées	Non déviées	Non déviées
Aspect sanitaire	Saines	Saines	Saines	Saines
Horizons				
Nombre total d'horizons	3	3	3	3
Nature et régularité des limites	Horizons juxtaposés Limites régulières	Horizons juxtaposés Limites régulières	Horizons juxtaposés Limites régulières	Horizons juxtaposés Limites régulières
Description de l'horizon 1	Épaisseur : 4,7 cm Couleur (Munsell) : 7.5YR 4/2 – Brun Structure : grumeleuse Netteté des structures : modérée Friabilité : très friable Compacité : meuble Humidité : frais Texture : LS	Épaisseur : 5 cm Couleur (Munsell) : 7.5YR 3/2 – Brun foncé Structure : grumeleuse Netteté des structures : modérée Friabilité : très friable Compacité : meuble Humidité : frais Texture : LS	Épaisseur : 6 cm Couleur (Munsell) : 7.5YR 4/2 – Brun Structure : grumeleuse Netteté des structures : modérée Friabilité : très friable Compacité : meuble Humidité : frais Texture : LS	Épaisseur : 6 cm Couleur (Munsell) : 7.5YR 3/2 – Brun foncé Structure : grumeleuse Netteté des structures : forte Friabilité : très friable Compacité : meuble Humidité : frais Texture : LS
Description de l'horizon 2	Épaisseur : 15,3 cm Couleur (Munsell) : 7.5YR 4/2 – Brun Structure : polyédriques Netteté des structures : modérée Friabilité : friable Compacité : peu compact Humidité : frais Texture : LS à SL	Épaisseur : 15 cm Couleur (Munsell) : 7.5YR 3/2 – Brun foncé Structure : polyédriques subanguleuses Netteté des structures : modérée Friabilité : friable Compacité : peu compact Humidité : frais Texture : LS à SL	Épaisseur : 15 cm Couleur (Munsell) : 7.5YR 4/2 – Brun Structure : polyédriques Netteté des structures : modérée Friabilité : friable Compacité : peu compact à meuble Humidité : frais Texture : LSA	Épaisseur : 17 cm Couleur (Munsell) : 7.5YR 3/2 – Brun foncé Structure : polyédriques subanguleuses Netteté des structures : modérée Friabilité : friable Compacité : peu compact Humidité : frais Texture : LSA
Description de l'horizon 3	Épaisseur : 21 cm Couleur (Munsell) : 7.5YR 3/2 – Brun foncé Structure : polyédriques Netteté des structures : modérée Friabilité : friable Compacité : compact à très compact Humidité : frais Texture : SL	Épaisseur : 22 cm Couleur (Munsell) : 7.5YR 3/2 – Brun foncé Structure : polyédriques Netteté des structures : modérée Friabilité : friable Compacité : compact Humidité : frais Texture : SL	Épaisseur : 26 cm Couleur (Munsell) : 7.5YR 4/2 – Brun Structure : polyédriques Netteté des structures : modérée Friabilité : friable Compacité : compact Humidité : frais Texture : LAS	Épaisseur : 26 cm Couleur (Munsell) : 7.5YR 4/2 – Brun Structure : polyédriques Netteté des structures : modérée Friabilité : friable Compacité : compact Humidité : frais Texture : LAS

T, sans bentonite, TV, sans bentonite avec vers (*L. terrestris*), TB, avec bentonite, TBV, avec bentonite et vers (*L. terrestris*)

Le premier élément notable a concerné la formation, en surface, d'un horizon organo-minéral superficiel, d'une épaisseur moyenne de 5 à 6 cm dans chacun des Technosols. Cet horizon était constitué d'un mélange de débris et de résidus culturaux avec la couche organo-minérale de surface des Technosols construits. La formation de cet horizon résulte vraisemblablement du travail superficiel du sol réalisé au moyen d'une griffe à l'issue des récoltes, avant l'implantation d'autres cultures. Pour chaque Technosol, il s'agit d'un horizon meuble, très friable, de texture limono-sableuse, frais et à structures grumeleuses. Seule la couleur de cet horizon a permis de discriminer les modalités entre elles. À cet égard, les modalités sans vers (T et TB) présentaient une couleur brune tandis que celles inoculées (TV

et TBV) affichaient une couleur plus sombre (brun foncé). Cette différence de couleur provient probablement du brassage effectué par les vers dans les Technosols inoculés. Dans l'ensemble, les caractéristiques de cet horizon sont particulièrement favorables pour leur usage en maraîchage puisqu'elles correspondent à la profondeur moyenne à laquelle sont réalisés les semis et la majorité des repiquages de plants en plaques alvéolées, et que leur compacité (meuble) ne constitue pas une barrière pour la reprise racinaire ou la germination des graines.

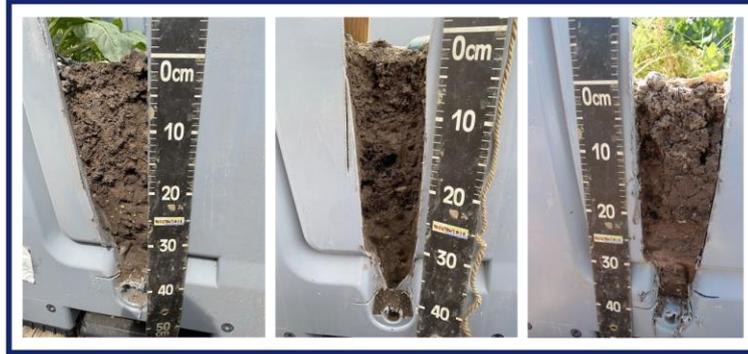
L'horizon sous-jacent à l'horizon 1 (horizon A) était d'une épaisseur moyenne très proche pour l'ensemble des modalités (de 15 à 17 cm). Comme pour l'horizon superficiel, cet horizon était de couleur brune pour les modalités sans vers et brun foncé pour celles inoculées. De la même manière, cette variation de couleur pourrait témoigner des actions de bioturbation opérée par *L. terrestris* dans les Technosols inoculés. Cette hypothèse est d'ailleurs à associer à la différence observée entre modalités inoculées ou non au regard de leurs structures. En effet, ces dernières correspondaient à des structures polyédriques pour les Technosols sans vers et polyédriques subanguleuses pour les Technosols inoculés (figure 21, H). L'action des vers est connue pour favoriser la formation de structures pédiques dites arrondies (Baize *et al.*, 2013). Ces structures à agrégats peuvent également être formées en présence d'une importante quantité de matière organique ou de la présence d'ions Ca^{2+} sur le complexe adsorbant. À l'inverse, la formation des structures polyédriques est généralement régie par des phénomènes de dessiccation/humectation en l'absence d'activité biologique (*ibid*). La netteté des structures était modérée et révélait une faible stabilité des agrégats. Les Technosols ont aussi été différenciés selon la texture de leur horizon A. Les horizons du Technosol sans bentonite (T et TV) étaient de texture limono-sableuse à sablo-limoneuse tandis que ceux du Technosol avec bentonite (TB et TBV) étaient de type limon sablo-argileux. Cette distinction ne peut qu'être attribuée à la différence de composition initiale des deux Technosols. Bien qu'il ne s'agisse que d'une appréciation de l'opérateur et qu'elle ne se substitue pas à l'analyse granulométrique des Technosols, l'hypothèse émise précédemment (cf. 3.2.1.1.) selon laquelle une partie des particules de TB et TBV avait pu être altérée en des fractions plus fines pourrait être appuyée puisque TB et TBV avaient, pour rappel, une texture sablo argilo limoneuse à leur mise en place, et que cette dernière semble avoir évolué. Les horizons A des Technosols n'ont pas différencié pour les autres caractéristiques observées. Ils partageaient ainsi une faible compacité, étaient friables et relativement frais. Après un an, ces horizons ont conservé une hétérogénéité visible. Ont notamment été observés des amas de sablon et de matières organiques (figure 21, D et E). La temporalité de l'expérimentation en mésocosmes a été de courte durée et a combiné différents freins à une évolution de ces

horizons (notamment la multiplicité de barrières limitant la colonisation spontanée par des organismes susceptibles d'intervenir dans la pédogénèse des Technosols).

La limite entre les horizons A et B des Technosols a été marquée par la présence de l'accumulation d'amas de matières organiques non homogénéisés à la couche organo-minérale à la limite basse de l'horizon A et par l'absence totale de matière organique dans l'horizon B. L'épaisseur moyenne des horizons B de TB et TBV (26 cm) était légèrement supérieure à celle de T et TV (21 – 22 cm). Cette différence d'épaisseur est à mettre en lien avec le tassement plus important des modalités sans bentonite. Les Technosols ont également été discernés par leur couleur – qui était plus claire pour TB et TBV – ainsi que par leur texture (sablo-limoneuse pour T et TV et limono argilo sableuse pour TB et TBV). Ces différences sont à attribuer à la seule présence ou absence de bentonite dans les formulations initiales qui a influencé, par sa couleur claire, les nuances entre Technosols et par sa teneur majoritaire en argile, la texture des horizons. Outre ces différences, les horizons profonds des Technosols ont partagé plusieurs caractéristiques communes. Parmi celles-ci ont été recensées leurs humidité, compacité et friabilité ainsi que la présence de structures polyédriques modérées. Ces structures sont généralement observées dans les horizons profonds de sol où les processus de structuration correspondent essentiellement à des phénomènes physico-chimiques. Ces structures proviennent ainsi certainement des cycles d'humectation/dessiccation qu'ont subi les Technosols au cours de l'année expérimentale. Comme les horizons A, les horizons B des Technosols construits présentent une hétérogénéité due à la mauvaise association du sablon en mélange. La compacité des horizons B des Technosols n'a pas représenté une limite à l'enracinement des végétaux puisque l'intégralité du volume de sol a été explorée par les racines des cultures. Le nombre de racines observées était de 8 à 16 par dm². Elles étaient très fines à fines dans l'ensemble, saines d'aspect, d'orientation verticale régulière et non déviées.

L'activité des vers a pu être observée dans les Technosols inoculés par la présence de conduits. Ceux-ci n'étaient ni colmatés, ni revêtus. Ils étaient d'orientation horizontale et verticale en surface et verticale en profondeur.

T



TV



TB



TBV

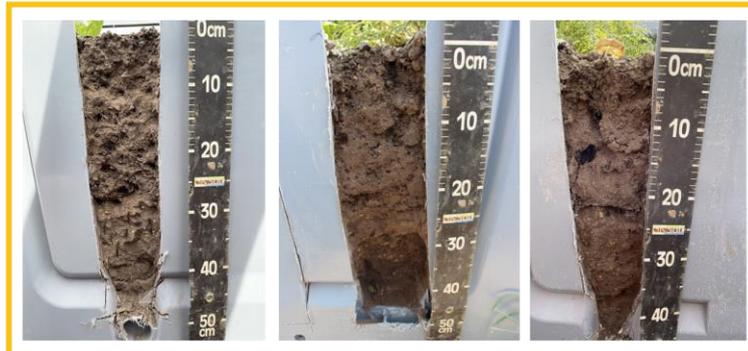


Figure 20 : Photographies des profils des Technosols construits au terme de l'expérimentation *ex situ* d'une durée d'un an. T, sans bentonite, TV, sans bentonite avec vers (*L. terrestris*), TB, avec bentonite, TBV, avec bentonite et vers (*L. terrestris*)

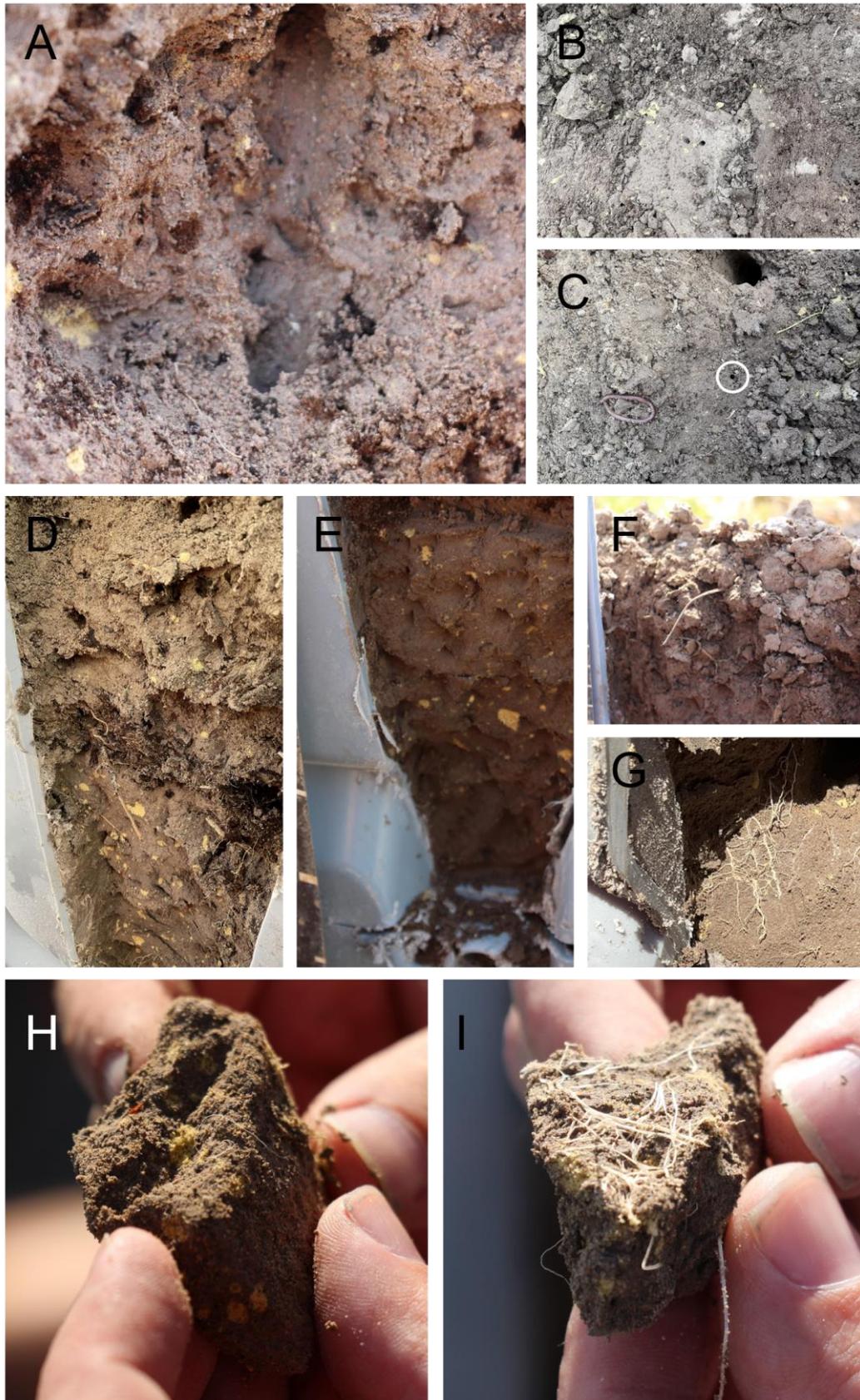


Figure 21 : Photographies des observations réalisées lors de la description des profils des Technosols construits à l'issue de l'expérimentation *ex situ* (t_3). (A, B et C) galeries verticales de *L. terrestris*, (D) présence de MO peu décomposée à la limite entre les horizons A et B, (E) hétérogénéité d'un horizon B dû à la présence distincte de l'agglomération de particules de sablon, (F) structures d'un horizon A, (G) racines observées dans la partie la plus profonde d'un horizon B, (H) structure polyédrique subanguleuse hétérogène, (I) stabilisation d'une structure sous l'effet de la colonisation racinaire

3.2.4. Potentiel de *Lumbricus terrestris* dans l'amélioration de la stabilité structurale des Technosols construits au sein des microcosmes

Les tests réalisés en mésocosmes ont été complétés par des expérimentations en microcosmes dans le but d'évaluer l'influence de l'intégration de vers (*L. terrestris*) dans les modalités sur l'amélioration de leur stabilité structurale. Ces essais visaient plus particulièrement à déterminer les diamètres moyens pondérés (MWD) de chaque modalité après une évolution de 6 mois, ceci en vue de leur attribuer une classe de stabilité. Deux traitements ont été appliqués et consistaient en (i) la simulation de conditions extrêmes (inondations ou fortes pluies) et (ii) la reproduction de conditions susceptibles d'affecter les modalités au quotidien (pluies modérées ou irrigation). Les MWD des modalités ont été calculés en fonction des traitements appliqués et sont présentés dans le tableau 28.

Tableau 28 : Diamètre moyen pondéré (MWD) des modalités soumises à deux traitements, par humectation rapide en immersion dans l'eau et par humectation lente par capillarité (moyenne \pm ET, n = 3)

Traitement 1 : Fortes pluies, orages ou inondations				
	T	TV	TB	TBV
MWD (mm) couche de surface	0,72 \pm 0,04 (a) Instable	0,54 \pm 0,02 (ab) Instable	0,65 \pm 0,22 (ab) Instable	0,38 \pm 0,03 (b) Très instable
MWD (mm) couche de profondeur	0,33 \pm 0,06 (ab) Très instable	0,26 \pm 0,07 (b) Très instable	0,55 \pm 0,23 (ab) Instable	1,61 \pm 1,00 (a) Stable
Traitement 2 : Pluies modérées ou irrigation				
	T	TV	TB	TBV
MWD (mm) couche de surface	1,48 \pm 0,19 (a) Stable	1,73 \pm 0,68 (a) Stable	1,25 \pm 0,18 (a) Moyennement stable	1,41 \pm 0,54 (a) Stable
MWD (mm) couche de profondeur	0,62 \pm 0,43 (a) Instable	1,27 \pm 0,46 (a) Moyennement stable	0,74 \pm 0,35 (a) Instable	1,11 \pm 0,24 (a) Moyennement stable

T, sans bentonite, TV, sans bentonite avec vers (*L. terrestris*), TB, avec bentonite, TBV, avec bentonite et avec vers (*L. terrestris*). Les lettres indiquent une différence significative entre les modalités.

Pour le traitement 1 (inondation), des différences significatives ont été mises en évidence entre les modalités selon les couches étudiées. Excepté pour la couche de profondeur de TBV, l'ensemble des couches des modalités a été évalué instable à très instable au moyen du premier traitement. La comparaison des modalités a mis en évidence que le MWD de la couche de surface de T (0,72 \pm 0,04 mm) était significativement supérieur à celui de la couche de surface de TBV (0,38 \pm 0,03 mm), tandis que des valeurs intermédiaires de ce paramètre étaient observées pour les couches de surface de TV et TB (respectivement 0,54 \pm 0,02 mm et 0,65 \pm 0,22 mm). L'effet des vers sur la stabilité structurale des couches de surface n'a donc pas été mis en évidence au moyen de ce traitement. À l'inverse, le MWD moyen de la couche de profondeur de TBV a été le plus élevé lors de ce traitement (1,61 \pm 1,00 mm). Des valeurs intermédiaires ont été observées dans les couches de profondeur de T et TB (respectivement 0,33 \pm 0,06 mm et 0,55 \pm 0,23 mm) tandis que la valeur la plus faible a été atteinte dans la couche profonde de TV (0,26 \pm 0,07 mm). De nouveau, l'effet des vers n'a pas été mis en évidence au regard des tests statistiques. À l'ouverture des microcosmes, les vers ont essentiellement été retrouvés dans les horizons profonds des modalités inoculées. Si les organismes sont restés majoritairement en profondeur lors de l'expérimentation, leur effet

pourrait être plus prononcé dans les couches profondes et pourrait expliquer la valeur moyenne du MWD de la couche profonde de TBV. Les valeurs des MWD des modalités inoculées sont éloignées de celles observées par Deeb *et al.* (2017) lorsqu'ils ont appliqué le traitement 1 sur un Technosol construit à partir d'horizons profonds excavés et de compost de déchets verts après 5 mois (2,0 mm en présence du ver). Les MWD moyens observés dans les couches de surface et de profondeur des modalités, lors du traitement 2, ont été supérieurs à ceux calculés lors du 1^{er} traitement. Ces résultats montrent que les agrégats sont plus stables face à des pluies modérées (ou à un système d'irrigation) qu'ils ne le sont face à de fortes pluies ou inondations. Pour le traitement 2, aucune différence significative n'a été mise en évidence entre modalités inoculées ou non dans les couches de surface comme de profondeur. Néanmoins, des tendances ont été observées avec de plus fortes valeurs de MWD des modalités inoculées parmi les deux couches. Ces tendances ont d'ailleurs été plus prononcées dans les couches de profondeur et corroborent l'hypothèse selon laquelle les vers ont principalement agi en profondeur au cours de l'expérimentation. Les valeurs des MWD des modalités inoculées sont, cette fois, proches de celles observées par Deeb *et al.* (2017) lorsqu'ils ont appliqué le traitement 2 sur leur Technosol d'essai ($1,6 \pm 0,1$ mm en présence du ver *A. caliginosa*).

Deux constats principaux ressortent de cette expérimentation. Le premier est qu'en 6 mois, l'action combinée des vers et de l'eau a permis la formation d'agrégats relativement stables aux effets de pluies modérées ou d'un système d'irrigation déployé sur un sol maraîcher. Dans le cas de TBV, les agrégats des couches profondes sont également résistants à de plus fortes pluies. Le deuxième constat concerne les formulations des modalités et confirme que malgré l'incorporation d'argile (bentonite) pour améliorer, entre autres, la structure des modalités, le cortège argileux de la bentonite, qui ne comporte qu'une infime partie de smectites, n'a pas permis d'obtenir une meilleure stabilité structurale par rapport aux modalités sans bentonite. Différents auteurs se sont intéressés aux processus qui régissent l'agrégation des Technosols. Jangorzo *et al.* (2018) ont proposé un modèle conceptuel de formation des agrégats sous l'influence de facteurs environnementaux et biologiques, qui regroupe trois étapes successives. La première étape repose sur les procédés de gonflement et de retrait associés à l'humectation et à la dessiccation des sols. Selon les auteurs, cette première phase est un facteur limitant le développement des organismes biologiques, qui conditionne la réalisation des deux autres étapes. La seconde phase concerne la prospection racinaire et la synthèse d'exsudats racinaires qui interviennent dans la continuité des premiers processus et contribuent à former de nouveaux agrégats plus résistants. La troisième et dernière étape concerne l'action des vers. D'après les auteurs, les vers empruntent les pédostructures élaborées par les deux premiers facteurs (afin de réduire

leur dépense énergétique nécessaire au creusement de leur galerie) et augmentent la stabilité structurale des sols par le biais de leurs turrículos. Bien qu'ils interviennent dans la continuité des deux premières phases, l'action des vers a un impact supérieur à celui des deux premiers agents. D'après Fonte *et al.* (2012), même si l'effet des vers sur l'agrégation des sols a été prouvée, leur influence sur la stabilité des agrégats n'est pas établie sans que leur action ne soit combinée à celle des végétaux. Les résultats de la présente étude tendent à montrer que contrairement au postulat des auteurs, les vers ont eu un effet, en l'absence de végétaux, perceptible seulement après plusieurs mois. Vidal-Beaudet *et al.* (2018) soulignent par ailleurs le rôle du facteur humain dans l'amélioration de la stabilité structurale des Technosols construits à travers la sélection de leurs matériaux parents. D'après les auteurs, la sélection de matières organiques immatures (au C/N élevé) tend à favoriser les activités biologiques et à améliorer la stabilité structurale. Dans la présente étude, les modalités ont été élaborées à partir des mêmes matières organiques, incorporées dans les mêmes proportions. Rappelons que le micro-maraîchage bio-intensif vise à restituer les résidus culturaux et à apporter différents amendements organiques selon les saisons et que ces pratiques pourraient améliorer considérablement la stabilité des agrégats dans le temps. Fonte *et al.* (2012) rappellent aussi que la stabilité des turrículos des vers dépend de la teneur en C organique et insistent sur le rôle majeur des MO dans l'amélioration de la stabilité structurale des agrégats puisqu'elles forment la base des agents de liaison stables qui les maintiennent ensemble. Au regard de leurs teneurs plus élevées en Ca^{2+} , il aurait pu être observé une meilleure stabilité structurale des modalités avec bentonite. Ce n'est toutefois pas le cas. Au bilan, les vers ont contribué à améliorer la stabilité structurale des modalités inoculées, particulièrement en profondeur. Au regard des hypothèses émises par les autres auteurs, l'action de ces organismes alliée à celle des végétaux, sur des sols cultivés en maraîchage, pourrait être plus forte. Néanmoins, cette observation n'a pu être vérifiée dans le cadre de la thèse puisque l'objectif initial était d'apprécier la seule influence de *L. terrestris* sur l'amélioration de la stabilité structurale des Technosols construits.

3.3. ÉVALUATION DU POTENTIEL AGRONOMIQUE DES MODALITES AU REGARD DES CULTURES MARAICHÈRES

Parallèlement à l'analyse des paramètres physiques, chimiques et biologiques des modalités, la démarche expérimentale a porté sur l'analyse des cultures maraîchères sur deux périodes culturales (printemps et hiver) (figure 22). Rappelons que la méthodologie a été adaptée au cours de l'expérimentation et que, contrairement aux cultures de printemps, les légumes d'hiver ont aussi été cultivés sur le sol témoin, ceci en vue de bénéficier de données comparatives qui n'étaient pas disponibles pour les cultures précédentes. Le potentiel agronomique des 4 modalités (T, TV, TB et TBV) mises en place en mésocosmes a été évalué

par l'analyse des denrées produites en termes de biomasse, d'activité photosynthétique et de diagnostic de nutrition végétale. Dans cette partie, les résultats sont d'abord présentés un à un avant de les discuter dans leur ensemble au regard des paramètres physiques, chimiques et biologiques.



Figure 22 : Photographies des biomasses maraîchères de printemps et d'hiver cultivées et récoltées parmi les Technosols construits (A) persil, (B) ensemble des cultures d'hiver, (C) mesclun, (D) céleri-rave, (E) tomates, (F) plant de tomates

3.3.1. Potentiel agronomique des Technosols pour les cultures maraîchères de printemps

3.3.1.1. Evaluation des biomasses des cultures

Les biomasses fraîches des légumes de printemps (i.e. persil, tomates, cébettes, céleri-rave et laitue) cultivés sur les 4 modalités sont présentées dans le tableau 29.

Tableau 29 : Biomasses fraîches (g) des légumes de printemps cultivés sur les 4 modalités expérimentales (moyenne \pm ET ; n = 3)

	T	TV	TB	TBV
Persil	159 \pm 18 (a)	286 \pm 88 (a)	238 \pm 17 (a)	442 \pm 214 (a)
Tomates	1243 \pm 250 (a)	1286 \pm 431 (a)	802 \pm 141 (a)	944 \pm 149 (a)
Cébettes	55 \pm 44 (a)	76 \pm 39 (a)	185 \pm 43 (a)	172 \pm 87 (a)
Céleri-rave	299 \pm 129 (a)	273 \pm 83 (a)	459 \pm 210 (a)	469 \pm 204 (a)
Laitue feuille de chêne	9 \pm 9 (a)	18 \pm 14 (a)	54 \pm 60 (a)	65 \pm 87 (a)

T, sans bentonite, TV, sans bentonite avec vers (*L. terrestris*), TB, avec bentonite, TBV, avec bentonite avec vers (*L. terrestris*). Les lettres indiquent une différence significative entre biomasses issues des modalités.

En raison d'une très forte hétérogénéité entre les réplicats pour chaque modalité, aucune différence significative n'a été mise en évidence entre les biomasses quelles que soient la culture et la modalité. Des tendances ont toutefois été observées avec de meilleures biomasses en persil, cébettes, céleri-rave et laitue feuille de chêne dans TB et TBV, tandis que T et TV ont permis d'obtenir de meilleures biomasses pour les tomates. Des biomasses plus

élevées ont aussi été observées dans les modalités inoculées. Ces observations ont été assez nettes pour les cultures de persil, tomates et laitue feuille de chêne et moins prononcées pour les cultures de cébettes et de céleri-rave.

Dans l'ensemble, les modalités expérimentales ont permis la production de différentes cultures de printemps. TBV semble être la modalité la plus productive, suivie de TB et TV. La modalité la moins intéressante en termes de biomasses a été T.

3.3.1.2. Indicateurs d'efficacité photosynthétique et de compositions physico-chimiques des cultures de printemps

Les valeurs des indicateurs d'efficacité de l'activité photosynthétique (ratio Fv/Fm) et de composition physico-chimique des cultures de printemps (i.e. teneurs en chlorophylle a, anthocyanes, flavonols et score NBI) sont présentés dans le tableau 30. Les valeurs de ces indicateurs ont été déterminées avant de procéder à la récolte des cultures et ont permis d'identifier d'éventuels déficits ou carences en un élément. Il s'agit d'indicateurs qu'il convient de compléter par l'analyse de la composition minérale des végétaux.

Tableau 30 : Valeurs des indicateurs d'efficacité photosynthétique et de composition physico-chimique des cultures maraîchères de printemps (moyenne \pm ET ; pour Fv/Fm : n = 15 ; pour les autres indicateurs : n = 60)

		T	TV	TB	TBV
Persil	Fv/Fm	0,83 \pm 0,01 (a)	0,82 \pm 0,01 (a)	0,83 \pm 0,01 (a)	0,83 \pm 0,01 (a)
	Chlorophylle a ($\mu\text{g cm}^{-2}$)	25,5 \pm 7,0 (b)	27,1 \pm 7,6 (ab)	27,0 \pm 6,7 (ab)	28,9 \pm 6,9 (a)
	Anthocyanes (A)	0,057 \pm 0,019 (bc)	0,048 \pm 0,023 (c)	0,069 \pm 0,021 (a)	0,058 \pm 0,020 (b)
	Flavonols (A)	1,24 \pm 0,16 (c)	1,27 \pm 0,18 (bc)	1,35 \pm 0,30 (ab)	1,40 \pm 0,17 (a)
	NBI	21 \pm 7 (a)	22 \pm 7 (a)	21 \pm 7 (a)	21 \pm 5 (a)
Tomates	Fv/Fm	0,83 \pm 0,00 (a)	0,83 \pm 0,01 (a)	0,84 \pm 0,00 (a)	0,84 \pm 0,01 (a)
	Chlorophylle a ($\mu\text{g cm}^{-2}$)	43,2 \pm 4,7 (a)	43,2 \pm 5,7 (a)	40,3 \pm 7,8 (a)	40,1 \pm 7,8 (a)
	Anthocyanes (A)	0,019 \pm 0,017 (bc)	0,018 \pm 0,016 (c)	0,029 \pm 0,020 (a)	0,026 \pm 0,018 (ab)
	Flavonols (A)	0,70 \pm 0,06 (ab)	0,68 \pm 0,06 (b)	0,72 \pm 0,16 (a)	0,68 \pm 0,08 (ab)
	NBI	62 \pm 9 (ab)	65 \pm 10 (a)	57 \pm 13 (b)	61 \pm 19 (ab)
Céleri-rave	Fv/Fm	0,84 \pm 0,00 (a)	0,84 \pm 0,00 (a)	0,83 \pm 0,01 (a)	0,84 \pm 0,01 (a)
	Chlorophylle a ($\mu\text{g cm}^{-2}$)	46,0 \pm 10,3 (ab)	45,1 \pm 7,6 (b)	46,4 \pm 7,4 (ab)	48,9 \pm 4,8 (a)
	Anthocyanes (A)	0,021 \pm 0,020 (a)	0,023 \pm 0,018 (a)	0,026 \pm 0,020 (a)	0,019 \pm 0,018 (a)
	Flavonols (A)	0,87 \pm 0,14 (a)	0,84 \pm 0,16 (a)	0,78 \pm 0,13 (a)	0,83 \pm 0,16 (a)
	NBI	54 \pm 15 (b)	56 \pm 13 (b)	61 \pm 13 (a)	61 \pm 11 (a)
Laitue feuille de chêne	Fv/Fm	0,78 \pm 0,22 (a)	0,84 \pm 0,01 (a)	0,83 \pm 0,01 (a)	0,84 \pm 0,01 (a)
	Chlorophylle a ($\mu\text{g cm}^{-2}$)	9,6 \pm 2,5 (b)	10,1 \pm 2,1 (b)	9,7 \pm 3,4 (b)	13,8 \pm 3,8 (a)
	Anthocyanes (A)	0,20 \pm 0,02 (a)	0,20 \pm 0,02 (a)	0,21 \pm 0,03 (a)	0,17 \pm 0,03 (b)
	Flavonols (A)	0,43 \pm 0,07 (bc)	0,43 \pm 0,08 (b)	0,39 \pm 0,07 (c)	0,51 \pm 0,09 (a)
	NBI	23 \pm 4 (b)	24 \pm 5 (b)	25 \pm 8 (ab)	27 \pm 6 (a)

T, sans bentonite, TV, sans bentonite avec vers (*L. terrestris*), TB, avec bentonite, TBV, avec bentonite avec vers (*L. terrestris*). Les lettres indiquent une différence significative entre les modalités au regard de l'indicateur considéré.

Contrairement aux autres cultures, les cébettes ne comportent pas de feuilles, si bien que les indicateurs d'efficacité photosynthétique et de composition physico-chimique n'ont pu être analysés.

- **Ratio Fv/Fm :**

En moyenne, pour l'ensemble des cultures et des modalités, le ratio Fv/Fm est compris entre 0,78 et 0,84. Ce ratio permet d'apprécier la capacité du photosystème II à exploiter la

lumière pour assurer l'activité photosynthétique. Des valeurs proches de 0,8 indiquent que le végétal n'a pas rencontré de frein à la réalisation de la phase claire de la photosynthèse et du flux électronique, tandis que des valeurs plus faibles peuvent révéler un stress (e.g. déficit hydrique). Dans l'ensemble, les résultats montrent une efficacité comparable des PSII des cultures de printemps à exploiter la lumière selon la modalité sur laquelle elles avaient été implantées.

- **Évaluation du statut azoté des cultures à travers leurs teneurs en chlorophylle a, flavonols et scores NBI :**

Les teneurs en chlorophylle a, anthocyanes, flavonols et les scores NBI des cultures de printemps ont été observées et ont différencié selon la modalité sur laquelle elles s'étaient développées. Pour rappel, les teneurs en chlorophylle a et flavonols renseignent chacune indirectement sur le statut azoté des cultures. En effet, les deux pigments répondent de manière opposée à la concentration en N des végétaux (Cartelat *et al.*, 2005). Ainsi, plus les teneurs en chlorophylle sont élevées, plus les teneurs en N sont importantes et plus les flavonols sont faibles. Pour obtenir un indicateur plus fiable du statut azoté des productions, il convient donc de combiner les valeurs de ces deux pigments. Le score NBI, qui correspond au ratio des teneurs en chlorophylle a par rapport aux teneurs en flavonols, constitue ainsi un indicateur plus précis du statut azoté des cultures (Cartelat *et al.*, 2005). En complément, les teneurs en anthocyanes peuvent permettre d'identifier des déficits en N ou en P des cultures. Dans cette partie, seul le score NBI des cultures et leurs teneurs en anthocyanes sont présentés.

Les valeurs du score NBI des cultures de printemps sont comprises entre 21 et 65. Les valeurs de ce score s'inscrivent plus précisément entre 21 et 22 pour le persil, entre 57 et 65 pour les tomates, entre 54 et 61 pour le céleri-rave et entre 23 et 27 pour la laitue feuille de chêne. Elles n'ont pas différencié significativement pour les cultures de persil, ce qui laisse supposer que quelle que soit la modalité support, les persils n'ont pas dû souffrir d'un déficit en azote. En revanche, les tests statistiques ont mis en évidence des différences significatives entre les scores des cultures de tomates, céleris-raves et laitue issues des quatre modalités. Pour les tomates, ce score attribue la valeur la plus haute aux plants cultivés sur TV (62 ± 9) et la plus basse à ceux cultivés sur TB (57 ± 13). Les plants développés sur T et TBV ne présentent aucune différence significative avec les plants des deux autres modalités (avec des scores respectifs de 62 ± 9 et 61 ± 19). Ces résultats pourraient indiquer un statut azoté plus faible des tomates de TB par rapport à celles de T. Pour les céleris-raves, les scores les plus élevés ont été atteints dans les feuilles de céleris produits sur TB et TBV (respectivement 61 ± 13 et 61 ± 11) et les plus faibles ont été observés dans les céleris cultivés sur T et TV (respectivement 54 ± 15 et 56 ± 13). Ces résultats pourraient indiquer une moindre assimilation en N des céleris

cultivés sur T et TV par rapport à ceux cultivés sur TB et TBV. Enfin, pour les laitues feuille de chêne, le score NBI a été significativement plus élevé dans les laitues produites sur TBV (27 ± 6) ; les scores des cultures produites sur T, TV et TB n'ont pas été différenciés au moyen des tests statistiques mais ont été classés avec les scores les plus hauts atteints dans les laitues cultivées dans TB (25 ± 8) puis dans celles issues de TV (24 ± 5) et de T (23 ± 4). Ces résultats pourraient montrer un meilleur statut azoté des productions issues de TB et TBV par rapport à celles de T et TV.

Dans l'ensemble, à l'exception des tomates, les scores des cultures produites dans TB et TBV semblent indiquer un meilleur statut azoté des cultures par rapport à celles produites sur T et TV.

- **Teneurs en anthocyanes :**

En moyenne, pour l'ensemble des cultures et des modalités, les teneurs en anthocyanes s'inscrivent entre 0,018 et 0,21. Plus particulièrement, ces teneurs sont comprises entre 0,048 et 0,069 pour les cultures de persil, 0,018 et 0,029 pour les tomates, 0,019 et 0,026 pour les céleris-raves et 0,17 et 0,21 pour les laitues feuille de chêne. Les tests statistiques ont mis en évidence des différences significatives entre les teneurs en anthocyanes des cultures de persil, tomate et laitue selon les modalités dont elles étaient issues. En revanche, les teneurs en anthocyanes des céleris-raves ont été comparables quel que soit le sol dont ils étaient issus. Ces résultats supposent que les céleris ont dû assimiler de mêmes quantités de N et/ou P.

Pour le persil, les teneurs ont été significativement plus élevées dans les plants produits dans TB ($0,069 \pm 0,021$). Les cultures issues de T et TBV ont présenté des teneurs comparables avec des valeurs respectives de $0,057 \pm 0,019$ et $0,058 \pm 0,020$. Celles produites sur TV ($0,048 \pm 0,023$) ont présenté des teneurs significativement inférieures aux persils de TB et TBV mais ne présentent pas de différence significative avec ceux de T. Théoriquement, les teneurs en anthocyanes diminuent à mesure que les teneurs en chlorophylle augmentent pendant la croissance foliaire (Moore, 1965). Les teneurs plus élevées en anthocyanes d'une culture d'essai par rapport à une culture témoin peuvent également indiquer un déficit en N ou P (Liang & He, 2018). Ainsi, les résultats pourraient signifier une meilleure assimilation en N et/ou P du persil produit dans TV par rapport aux plants issus de TB et TBV.

Les cultures de tomates ont différencié significativement au regard de leurs teneurs en anthocyanes selon la modalité sur laquelle elles s'étaient développées. Les teneurs les plus élevées ont été observées parmi les feuilles des plants cultivés sur TB avec des valeurs de $0,029 \pm 0,020$ A. Ces valeurs étaient significativement supérieures à celles des plants développés sur T ($0,019 \pm 0,017$) et TV ($0,018 \pm 0,016$) mais pas à ceux cultivés sur TBV ($0,026$

± 0,018). Les valeurs des feuilles de tomates de TV étaient les plus faibles et étaient significativement inférieures à celles de TB et TBV tandis que celles de T étaient comparables à celles de TV et TBV. Ces résultats pourraient indiquer une meilleure assimilation en N et/ou P des plants cultivés sur T et TV.

Les teneurs en anthocyanes des laitues ont également différé avec des teneurs significativement supérieures dans les laitues cultivées sur T, TV et TB (respectivement $0,20 \pm 0,02$, $0,20 \pm 0,02$ et $0,21 \pm 0,03$) par rapport à celles issues de TBV ($0,17 \pm 0,03$). Ces résultats pourraient indiquer un déficit en N ou P des laitues de T, TV et TB par rapport à celles de TBV.

3.3.1.3. Détermination des teneurs en éléments majeurs dans les cultures de printemps

La composition minérale des cultures maraîchères de printemps a été analysée en vue d'identifier d'éventuels déficits en nutriments. L'ensemble des résultats relatifs aux teneurs en éléments majeurs est présenté dans la figure 23.

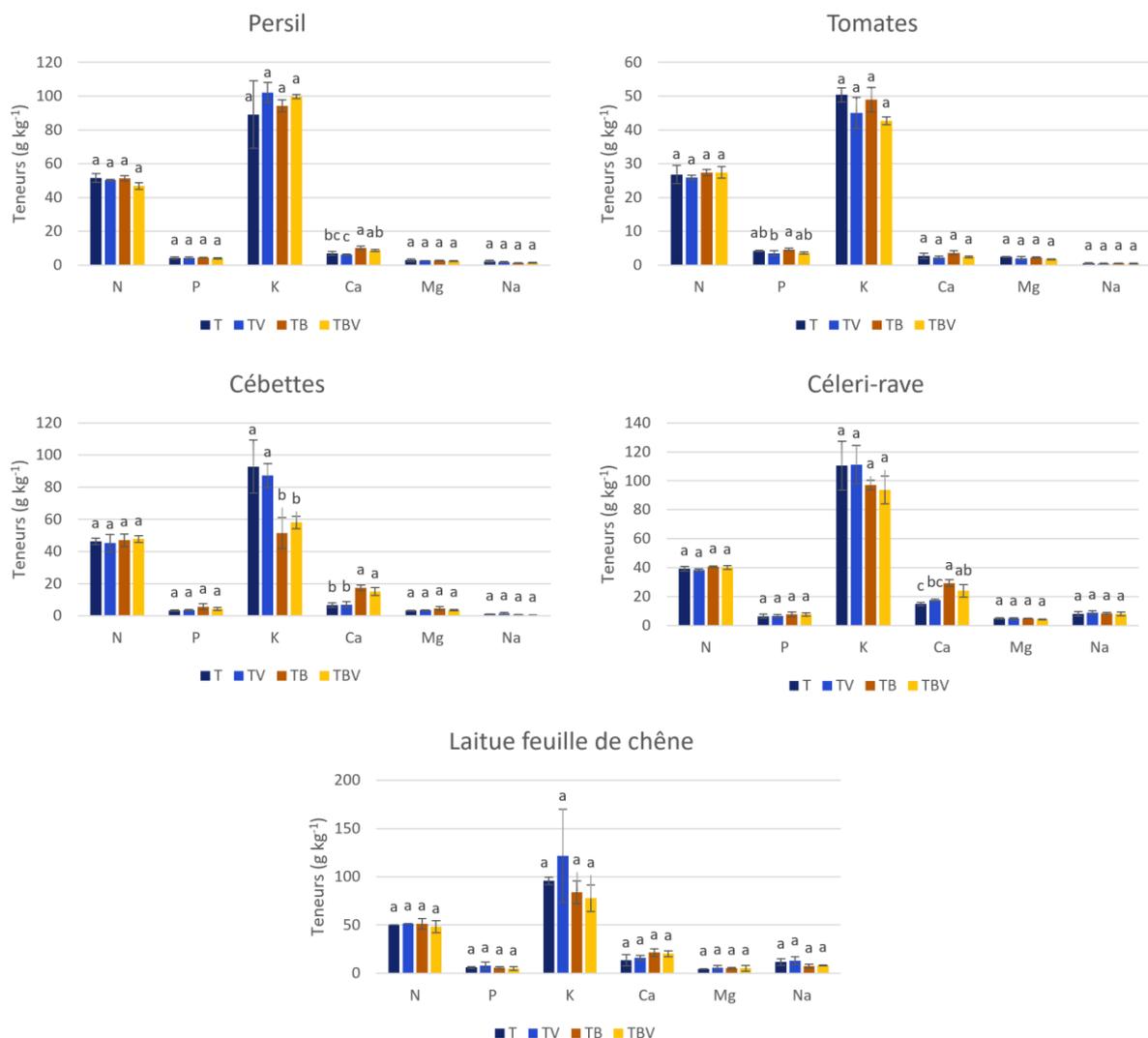


Figure 23 : Teneurs (PS) en éléments majeurs des cultures de printemps (moyenne ± ET ; n = 3). T, sans bentonite, TV, sans bentonite avec vers (*L. terrestris*), TB, avec bentonite, TBV, avec bentonite avec vers (*L. terrestris*)

Dans l'ensemble, les teneurs en N des cultures sont comprises entre 25,9 et 51,6 g kg⁻¹ PS selon les modalités dont elles sont issues ; les teneurs en P sont comprises entre 3,3 et 7,9 g kg⁻¹ PS ; celles en K, entre 42,7 et 121,8 g kg⁻¹ PS ; celles en Ca, entre 2,2 et 29,4 g kg⁻¹ PS ; celles en Mg, entre 1,7 et 5,9 g kg⁻¹ PS et celles en Na, entre 0,4 et 13,1 g kg⁻¹ PS.

Les tests statistiques n'ont pas mis en évidence de différence significative entre les teneurs en N, Mg et Na des cultures de printemps des 4 modalités. En ce qui concerne les teneurs en P, seules les tomates ont présenté des différences significatives selon les modalités dont elles étaient issues. Les tomates produites sur TB et TV ont ainsi été différenciées avec les valeurs les plus élevées dans les tomates issues de TB ($4,6 \pm 0,4$ g kg⁻¹) et les plus faibles dans celles cultivées sur TV ($3,5 \pm 0,7$ g kg⁻¹). Des teneurs intermédiaires ont été observées dans les tomates produites sur T et TBV avec des valeurs respectives de $4,2 \pm 0,2$ g kg⁻¹ et $3,6 \pm 0,3$ g kg⁻¹. En confrontant les valeurs des compositions en éléments majeurs des cébettes, il ressort que celles produites dans T et TV présentent des teneurs en K significativement supérieures à celles cultivées dans TB et TBV (respectivement $92,8 \pm 16,5$ g kg⁻¹ et $87,3 \pm 7,4$ g kg⁻¹ dans les cébettes produites sur T et TV et $51,5 \pm 9,7$ g kg⁻¹ et $58,1 \pm 3,9$ g kg⁻¹ dans celles cultivées sur TB et TBV). Les cultures de persil, cébettes et céleri-rave ont assimilé du Ca dans des proportions significativement différentes selon les modalités dont elles étaient issues. Les plants de persil développés sur TB ont présenté des teneurs significativement supérieures à ceux cultivés sur T et TV (respectivement $10,1 \pm 1,0$ g kg⁻¹, $6,9 \pm 1,1$ g kg⁻¹ et $6,2 \pm 0,4$ g kg⁻¹). Le persil produit sur TV a assimilé des teneurs significativement plus faibles que celui cultivé sur TBV ($8,5 \pm 0,6$ g kg⁻¹). Les cébettes produites sur T et TV ont présenté des teneurs en Ca significativement plus faibles que celles cultivées sur TB et TBV ($6,6 \pm 1,5$ g kg⁻¹ dans les cébettes de T, $7,0 \pm 1,8$ g kg⁻¹ dans celles issues de TV, $17,5 \pm 1,7$ g kg⁻¹ dans celles issues de TB et $15,1 \pm 2,5$ g kg⁻¹ dans celles produites sur TBV). À l'instar des persils et cébettes, les céleris-raves ont présenté des différences significatives au regard de leurs teneurs en Ca. Les teneurs les plus élevées ont été observées dans TB et TBV (respectivement $29,4 \pm 2,3$ g kg⁻¹ et $24,0 \pm 4,3$ g kg⁻¹) et les plus faibles dans T et TV (respectivement $14,9 \pm 1,1$ g kg⁻¹ et $17,6 \pm 0,7$ g kg⁻¹).

Les teneurs en K, Ca, Mg et Na des cultures des modalités (i.e. T, TV, TB et TBV) ont été également exprimées en poids frais afin de les comparer, à titre indicatif, aux teneurs moyennes en minéraux estimées dans les légumes (hors pomme de terre) fournies par l'Anses lors de l'étude de l'alimentation totale française EAT2 (Anses, 2011). Les résultats sont présentés dans le tableau 31. Dans l'ensemble, les cultures de printemps présentent des teneurs en K, Ca et Mg supérieures à celles des légumes analysés dans le programme EAT 2 (à l'exception des teneurs en Ca et Mg des tomates qui sont inférieures). Leurs teneurs

moyennes en Na sont en revanche inférieures à celles du programme, à l'exception des teneurs en Na des céleris-raves qui en sont très proches.

Tableau 31 : Teneurs en éléments majeurs (exprimées en g kg⁻¹ de poids frais PF) des cultures de printemps produites dans T, TV, TB et TBV en comparaison des teneurs mesurés dans les légumes du programme EAT 2 (Anses, 2011)

	K	Ca	Mg	Na
Cébettes (g kg ⁻¹ PF)	5,15 – 9,28	0,660 – 1,750	0,320 – 0,450	0,05 – 0,14
Céleris-raves (g kg ⁻¹ PF)	2,10 – 4,12	2,090 – 4,120	0,602 – 0,686	1,12 – 1,26
Laitue (g kg ⁻¹ PF)	7,77 – 12,18	1,340 – 2,140	0,460 – 0,590	0,74 – 1,31
Persil (g kg ⁻¹ PF)	8,91 – 10,22	0,620 – 1,010	0,240 – 0,290	0,13 – 0,21
Tomates (g kg ⁻¹ PF)	2,14 – 2,52	0,110 – 0,180	0,085 – 0,120	0,02 – 0,03
Légumes analysés dans le cadre du programme EAT 2 (g kg ⁻¹ PF)	2,52	0,313	0,186	1,20

3.3.1.4. Détermination des teneurs en oligo-éléments dans les cultures de printemps

L'analyse de la composition en éléments majeurs a été complétée par la détermination des teneurs en oligo-éléments des cultures. L'ensemble des résultats est présenté dans la figure 24.

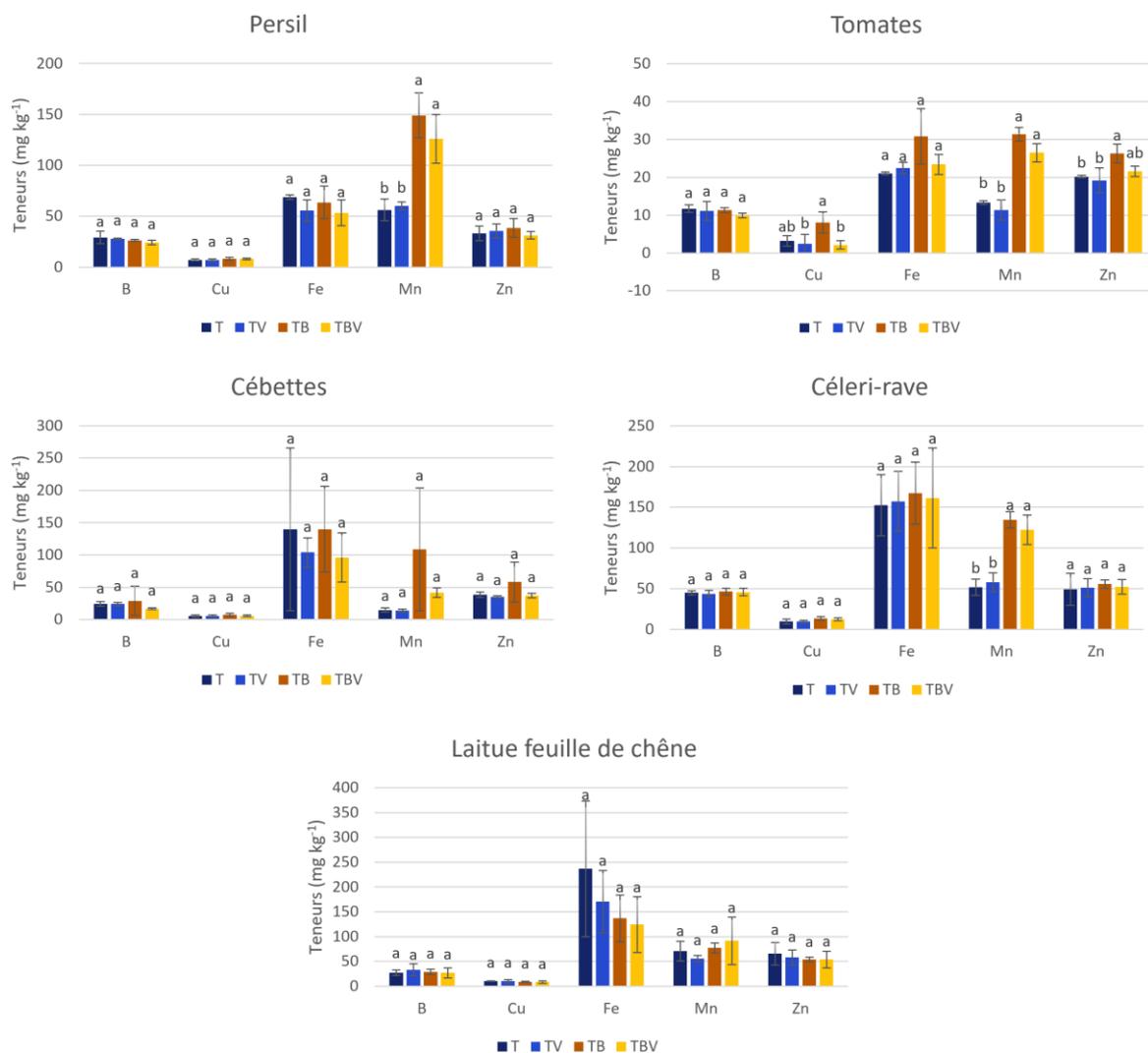


Figure 24 : Teneurs (PS) en oligo – éléments des cultures de printemps (moyenne ± ET ; n = 3). T, sans bentonite, TV, sans bentonite avec vers (*L. terrestris*), TB, avec bentonite, TBV, avec bentonite avec vers (*L. terrestris*)

Dans l'ensemble, les teneurs en B des cultures sont comprises entre 9,9 et 46,4 mg kg⁻¹ PS selon les modalités dont elles sont issues ; les teneurs en Cu sont comprises entre 2,1 et 13,5 mg kg⁻¹ PS ; celles en Fe, entre 21,0 et 236,5 mg kg⁻¹ PS ; celles en Mn, entre 11,3 et 149,0 mg kg⁻¹ PS et celles en Zn, entre 19,2 et 65,6 mg kg⁻¹ PS.

Les teneurs en B et Fe des cultures de printemps ont été comparables quelle que soit la modalité dont elles étaient issues. Les tomates des 4 modalités ont été différenciées selon leurs teneurs en Cu. Les valeurs ont été significativement supérieures dans les tomates cultivées sur TB (8,0 ± 2,8 mg kg⁻¹) et significativement inférieures pour les tomates cultivées sur TV et TBV (respectivement 2,4 ± 2,5 g kg⁻¹ et 2,1 ± 1,1 mg kg⁻¹). Des teneurs intermédiaires ont été atteintes dans les tomates issues de T (3,2 ± 1,4 mg kg⁻¹). Les teneurs en Mn des cultures de persil, de tomates et de céleri-rave ont été significativement plus élevées dans les légumes issus de TB et TBV. Si aucune différence significative n'a été mise en évidence au regard des teneurs en cet élément pour les cultures de cébettes et de laitue feuille de chêne, les mêmes tendances sont observées. Les tomates produites sur T et TV ont assimilé moins de Zn que celles de TB et TBV (20,2 ± 0,3 mg kg⁻¹ dans les tomates de T, 19,2 ± 3,3 mg kg⁻¹ dans celles de TV, 26,3 ± 2,5 mg kg⁻¹ dans celles de TB et 21,6 ± 1,4 mg kg⁻¹ dans celles de TBV). Les teneurs les plus élevées significativement ont été atteintes dans les tomates de TB.

Comme pour les teneurs d'une partie des éléments majeurs (i.e. K, Ca, Mg et Na), les teneurs en Cu, Fe, Mn et Zn des cultures des modalités ont été converties en poids frais afin de les comparer aux valeurs des légumes analysés dans le programme EAT 2. Les résultats sont présentés dans le tableau 32. Globalement, les teneurs en Cu des cébettes et des laitues sont proches des valeurs du programme alors que les teneurs des céleris-raves sont largement supérieures et celles des tomates inférieures aux valeurs observées dans le programme. À l'exception des tomates, les teneurs en Fe, Mn et Zn des cultures de printemps sont toutes supérieures à la moyenne de l'EAT 2.

Tableau 32 : Teneurs en oligo-éléments (exprimées en mg kg⁻¹ de poids frais PF) des cultures de printemps produites dans T, TV, TB et TBV en comparaison des teneurs mesurées dans les légumes analysés dans le cadre du programme EAT 2 (Anses, 2011)

	Cu	Fe	Mn	Zn
Cébettes (mg kg ⁻¹ PF)	0,53 – 0,75	9,6 – 14,0	1,41 – 10,87	3,55 – 5,82
Céleris-raves (mg kg ⁻¹ PF)	1,34 – 1,89	21,4 – 23,4	7,25 – 18,86	6,92 – 7,78
Laitue (mg kg ⁻¹ PF)	0,83 – 1,07	12,4 – 23,7	5,60 – 9,14	5,36 – 6,56
Persil (mg kg ⁻¹ PF)	0,68 – 0,83	5,3 – 6,9	5,62 – 14,90	3,12 – 3,84
Tomates (mg kg ⁻¹ PF)	0,11 – 0,40	1,1 – 1,5	0,57 – 1,57	0,96 – 1,32
Légumes du programme EAT 2 (mg kg ⁻¹ PF)	0,66	4,6	1,34	2,34

3.3.1.5. Cultures infructueuses

Certaines cultures ont été infructueuses, notamment deux cultures semées (betteraves et carottes) et deux cultures repiquées (basilic et mesclun). Pour les cultures de

betteraves et de carottes, seule une faible partie des semis s'est développée. Plus spécifiquement pour la betterave, seules deux graines ont germé au sein d'un réplicat de TB. Pour les carottes, les résultats sont légèrement différents puisque les semis se sont développés dans chacun des Technosols, mais leurs calibres sont restés réduits tout au long de leur cycle cultural par rapport à un cycle standard. Ainsi ces cultures n'ont pas abouti au terme de leur saison culturale. Pour ces deux légumes, l'absence totale ou la faible germination semblent suivre les mêmes tendances que celles observées lors des tests de germination (Chapitre 2, 2.6.2.). Le faible taux de germination au sein des Technosols construits semble étroitement lié à la compacité de ces sols, laquelle inhibe le développement des cultures à leurs stades les plus précoces.

Pour les cultures repiquées, lors de l'implantation des plants de basilic, ont été observées des taches brunes sur les feuilles, lesquelles ont été apparentées à une attaque de fusariose. La prolifération de ce pathogène est rapide dans un environnement humide puisqu'il s'agit d'un champignon (Dossa *et al.*, 2019). Il est probable que la fusariose ait été contractée par les plants de basilic dès leur germination en plaques alvéolées et que l'importante humidité des Technosols ait seulement contribué à sa prolifération. Ainsi, la qualité des Technosols pour la production de basilic n'est pas remise en cause sur la base des données disponibles. De même, les plants de mesclun se sont développés correctement dans les Technosols dès leur implantation. Ils ont cependant subi une attaque de pucerons au cours de leur culture et leur production s'en est retrouvée stérile. Il n'est ainsi pas possible d'imputer l'absence de récolte aux seules caractéristiques des Technosols.

3.3.1.6. Bilan relatif aux potentialités agronomiques des Technosols construits pour les cultures de printemps

Pour expliquer les tendances observées sur les légumes de printemps, leurs données ont été confrontées aux paramètres physiques, chimiques et biologiques des modalités dont les cultures étaient issues à t_1 (date de leur implantation) et t_2 (date de leur récolte). Les résultats des analyses en composantes principales sont présentés dans la figure 25. Ces analyses ont permis de discriminer les modalités avec et sans bentonite le long de l'axe 1 (36 % à t_1 et 45 % à t_2). Il est aussi ressorti que les biomasses des cultures de persil, de cébettes et de céleri-rave étaient corrélées positivement aux valeurs de CEC (à t_1 et à t_2) plus élevées de TB et TBV (lesquelles montrent une plus grande capacité de ces sols à échanger les cations essentiels au développement des cultures) et à leurs plus fortes teneurs en Ca^{2+} à t_2 (exprimées en CaO dans la figure 25) ; et négativement aux teneurs en carbonates et au pH (à t_1 et à t_2) des modalités.

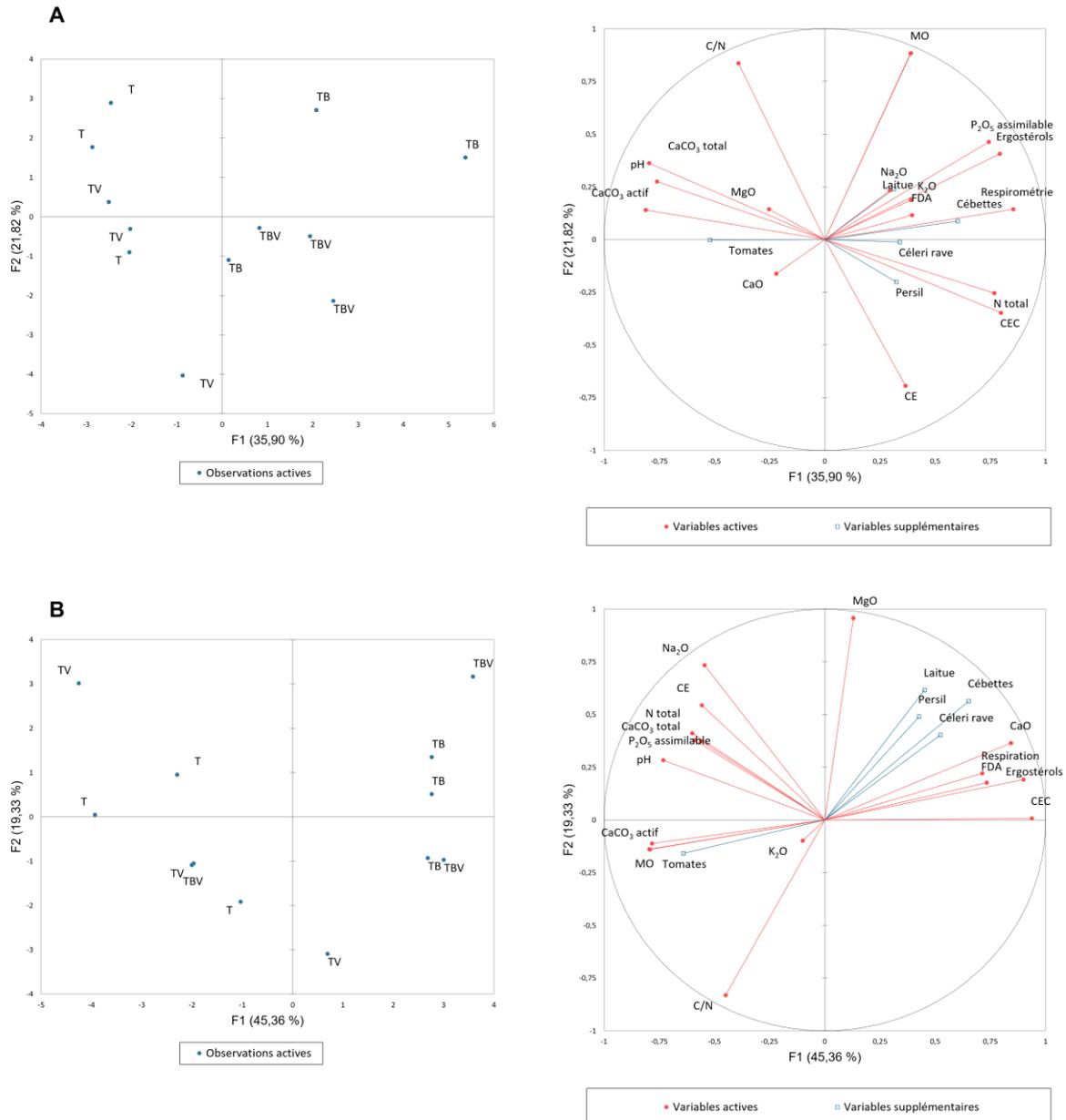


Figure 25 : Analyse en composantes principales des 8 modalités testées (T, TV, TB et TBV à (A) t₁ et (B) t₂) sur la base de 16 de leurs paramètres physico-chimiques (pH, CE, CaCO₃ total et actif, MO, N total, C/N, CEC et P₂O₅ assimilable, K₂O, MgO, Na₂O, CaO, respirométrie, ergostérols et FDA) et des biomasses des cultures de printemps à l'issue de la première mise en culture des modalités des Technosols construits. (A) À t₁, axe 1 = 36 %, axe 2 = 22 % ; à t₂, axe 1 = 45 %, axe 2 = 19 %.

Il est probable que les teneurs en carbonates particulièrement élevées dans T et TV aient contribué à augmenter le pH de ces sols, ce qui aurait limité la biodisponibilité des nutriments essentiels à la croissance des végétaux (Liu & Hanlon, 2012). Parmi ces nutriments, le calcium est indispensable aux cultures pour assurer, entre autres, la structuration de leur squelette pariétal. Les plus faibles teneurs en Ca²⁺ (exprimées en CaO) observées dans T et TV ont pu limiter le développement de ces cultures par rapport à celles produites sur TB et TBV. Cette hypothèse est d'ailleurs appuyée par les teneurs inférieures en Ca dans les cultures de persil, les cébettes et les céleris-raves de T et TV par rapport à ceux de TB et TBV. Les plus

faibles teneurs en Ca des cébettes et céleris-raves cultivés sur T et TV pourraient également être associées à leurs teneurs plus fortes en K. En effet, les racines des végétaux semblent appliquer une absorption sélective en faveur des ions K^+ face aux ions Ca^{2+} (Kirkby & Pilbeam, 1984). En tenant compte des valeurs de CEC inférieures de T et TV, il est possible qu'une concentration plus importante en K^+ en solution ait joué en faveur d'une moins bonne assimilation en ions Ca^{2+} . Notons que dans la mesure où seules les cébettes présentent une différence significative au regard de leurs teneurs en K, il ne peut être considéré que l'offre en potassium de T et TV soit supérieure à celle de TB et TBV. D'ailleurs, les teneurs en K_2O des modalités ont été comparables à chaque pas de temps. En revanche, les cébettes et céleris cultivés sur TB et TBV ont pu souffrir d'un déficit en K^+ inhérent à un phénomène d'antagonisme généré par les plus fortes teneurs en Ca^{2+} de ces modalités. Bien que les résultats soient moins prononcés pour les cultures de laitue, les mêmes tendances sont observées. En excès, le potassium peut également limiter l'absorption de Mg. Ainsi les teneurs en K plus élevées des cébettes cultivées sur T et TV ont très certainement induit une assimilation légèrement plus faible en Mg de ces cultures. Le potassium peut également accentuer les phénomènes chlorotiques et limiter la disponibilité du fer et du manganèse (Çelik *et al.*, 2010 ; Lindner & Harley, 1944). Si ce constat n'est pas avéré pour les teneurs en fer des cultures, il semble l'être pour les teneurs en manganèse.

Indirectement, les plus fortes teneurs en Ca^{2+} dans TB et TBV ont également pu, à une échelle microscopique (non perceptible lors de l'analyse des profils à l'œil nu), améliorer la structuration des modalités par leur action de floculation et favoriser le développement des cultures (Colomb, 2017). À l'inverse, les biomasses des cultures de tomates étaient corrélées négativement aux teneurs en CaO des modalités. Les plus fortes teneurs dans TB et TBV ont pu générer des phénomènes d'antagonismes et limiter la biodisponibilité de certains nutriments (e.g. K, Mg ou encore Mn) (*ibid.*). Cette hypothèse est toutefois infirmée puisqu'aucune différence significative n'a été mise en évidence au regard des teneurs en ces éléments dans les tomates des quatre modalités. Les meilleures biomasses en tomates dans T et TV pourraient également être attribuées à leurs texture et capacité de rétention en eau plus adaptées.

Les teneurs inférieures en Zn des tomates issues de T et TV pourraient résulter des valeurs de pH plus élevées de ces sols combinées à leurs teneurs légèrement plus importantes en P_2O_5 assimilable. L'association de ces deux facteurs peut en effet limiter la fraction en Zn disponible pour les végétaux (Colomb, 2017).

Les cébettes sont des cultures sensibles aux carences en zinc, molybdène et magnésium et très sensibles aux carences en cuivre et manganèse (Jobbé-Duval, 2017). Les tendances à

de plus faibles biomasses dans T et TV par rapport à TB et TBV ne peuvent toutefois pas être attribuées à un déficit en l'un de ces éléments puisque les tests statistiques n'ont pas mis en évidence de différence significative entre les éléments des cultures. Les cébettes s'accommodent de sols silico-argileux à structure stable (Jobbé-Duval, 2017). Les tendances aux meilleures biomasses dans TB et TBV pourraient ainsi résulter de la différence de texture et de stabilité des modalités.

L'association des biomasses de la laitue feuille de chêne aux paramètres physiques, chimiques et biologiques des modalités n'a pas permis d'isoler de facteur explicatif. Par ailleurs, les valeurs de leur ratio F_v/F_m (proche de 0,8) montrent que les faibles biomasses obtenues ne peuvent être attribuées à un dysfonctionnement de leur activité photosynthétique. De ce fait, les plus faibles biomasses de laitues sont attribuées à des paramètres physiques qui n'ont pas fait l'objet d'un suivi dans les modalités. Les sols les plus propices à la culture de laitue sont décrits comme stables, avec une bonne capacité de rétention en eau (Jobbé-Duval 2017). Les sols légers peuvent favoriser une bonne précocité des cultures mais conduisent, à terme, à l'obtention de plus faibles rendements (ibid). Ces caractéristiques expliqueraient pourquoi les biomasses ont été légèrement meilleures dans TB et TBV puisque les capacités de rétention en eau de ces modalités sont supérieures à celles de T et TV. Par ailleurs, la plus forte proportion d'argile dans TB et TBV pourrait être à l'origine de structures plus stables, bénéfiques à la laitue.

L'outil utilisé pour la détermination des scores NBI et des teneurs en anthocyanes des cultures a permis d'émettre des hypothèses sur le statut azoté et les teneurs en phosphore des cultures. Au regard des scores NBI, il a été fait l'hypothèse que (i) les cultures de persil n'ont pas souffert d'un déficit azoté, (ii) les tomates cultivées sur TB aient souffert d'un déficit en azote par rapport à celles cultivées sur T, (iii) les céleris issus de T et TV aient assimilé des teneurs plus faibles en N par rapport à ceux produits sur TB et TBV et que (iv) les laitues de TB et TBV aient bénéficié d'un meilleur statut azoté que celles de T et TV. L'analyse des teneurs en anthocyanes a permis d'affiner les interprétations et a mené à (i) envisager de plus faibles teneurs en N et/ou P dans les plants de persil de TB et TBV par rapport à ceux de TV, (ii) écarter la possibilité d'un déficit en N des tomates produites sur TB et TBV mais appuyer la possibilité d'une moindre assimilation en P de ces cultures par rapport à celles de TB et TBV et (iii) soupçonner un déficit en N et/ou P des laitues cultivées sur T, TV et TB par rapport à celles produites sur TBV. Hormis la première hypothèse (selon laquelle les plants de persil n'ont pas souffert d'un déficit en azote), les hypothèses formulées ne sont pas validées dans le contexte de l'étude, ce qui ouvre la question de la remise en cause de l'outil utilisé.

Au bilan, la combinaison des résultats de biomasse, d'activité photosynthétique et de composition minérale des cultures maraîchères de printemps mène à envisager l'établissement d'un classement des modalités selon leur fonctionnalité pour un usage en maraîchage. Selon ce classement, les Technosols sans bentonite auraient une fonction de support de production alimentaire inférieure à ceux élaborés à partir de bentonite. L'inoculation de vers dans ces sols permettrait toutefois d'atteindre de meilleurs rendements. Par ailleurs, les végétaux les plus sains sont souvent décrits comme ceux qui concentrent le plus d'éléments majeurs et oligo-éléments. La comparaison des résultats de composition minérale des cultures de cette étude aux légumes analysés dans l'EAT 2 montre que les cultures de printemps sont de meilleure qualité dans l'ensemble.

3.3.2. Potentiel agronomique des Technosols pour les cultures maraîchères d'hiver

Les analyses des légumes de printemps ont été reproduites sur les légumes d'hiver (i.e. blettes, épinards, mâche, navets, pourpier d'hiver et roquette). Cette partie est consacrée à leur description et est agencée de la même manière que la partie relative aux légumes de printemps : les résultats sont d'abord présentés un à un avant de les discuter ensemble.

3.3.2.1. Evaluation des biomasses des cultures

Les résultats des biomasses des cultures d'hiver sont synthétisés dans le tableau 33.

Tableau 33 : Biomasses fraîches (g) des légumes d'hiver cultivés sur les 4 modalités expérimentales (moyenne \pm ET ; n = 3)

	T	TV	TB	TBV	Témoin
Blettes	727 \pm 265 (a)	1080 \pm 536 (a)	838 \pm 210 (a)	811 \pm 133 (a)	607 (a)
Épinards	114 \pm 33 (ab)	96 \pm 16 (b)	178 \pm 33 (a)	128 \pm 26 (ab)	62 (b)
Mâche	23 \pm 9 (a)	26 \pm 3 (a)	36 \pm 16 (a)	46 \pm 4 (a)	44 (a)
Navets	1130 \pm 949 (a)	925 \pm 342 (a)	1569 \pm 1312 (a)	1520 \pm 1075 (a)	872 (a)
Pourpier d'hiver (Claytone de Cuba)	153 \pm 34 (ab)	111 \pm 342 (b)	225 \pm 28 (a)	235 \pm 27 (a)	281 (a)
Roquette	37 \pm 45 (a)	41 \pm 28 (a)	149 \pm 33 (a)	117 \pm 30 (a)	151 (a)

T, sans bentonite, TV, sans bentonite avec vers (*L. terrestris*), TB, avec bentonite, TBV, avec bentonite avec vers (*L. terrestris*). Les lettres indiquent une différence significative entre biomasses issues des modalités.

Contrairement aux cultures de printemps pour lesquelles aucune différence significative n'avait été mise en évidence, des résultats se dégagent pour les cultures d'hiver. Des différences significatives sont notamment observées pour les biomasses en épinards, et pourpier d'hiver. Dans l'ensemble, les biomasses sont plus importantes dans les modalités avec bentonite que dans celles qui en sont exemptes. La présence de vers ne semble pas avoir d'effet notable sur ce paramètre pour les cultures de blettes, mâche, navet, pourpier d'hiver et roquette. En revanche, un effet négatif de leur présence est observé au regard des biomasses en épinards. À l'exception des biomasses de pourpier de TV, l'ensemble des cultures produites sur les modalités ont présenté des biomasses comparables à celles du sol témoin.

3.3.2.2. Indicateurs d'efficacité photosynthétique et des compositions physico-chimiques des cultures d'hiver

Les analyses de biomasses ont été complétées par la détermination des indicateurs d'efficacité photosynthétique et de composition physico-chimique des cultures dont les résultats sont présentés dans le tableau 34.

Tableau 34 : Valeurs des indicateurs d'efficacité photosynthétique et de composition physico-chimique des cultures maraîchères de printemps (moyenne \pm ET ; pour Fv/Fm : n = 15 ; pour les autres indicateurs : n = 60)

		T	TV	TB	TBV	Témoïn
Blettes	Fv/Fm	0,75 \pm 0,20 (a)	0,70 \pm 0,21 (a)	0,81 \pm 0,18 (a)	0,82 \pm 0,17 (a)	0,64 \pm 0,16 (a)
	Chlorophylle a ($\mu\text{g cm}^{-2}$)	22,5 \pm 5,9 (a)	24,7 \pm 4,1 (a)	24,2 \pm 5,2 (a)	23,7 \pm 4,7 (a)	17,0 \pm 2,3 (b)
	Anthocyanes (A)	0,12 \pm 0,03 (cd)	0,14 \pm 0,02 (ab)	0,11 \pm 0,02 (d)	0,13 \pm 0,03 (bc)	0,15 \pm 0,02 (a)
	Flavonols (A)	0,75 \pm 0,12 (bc)	0,69 \pm 0,16 (c)	0,78 \pm 0,12 (b)	0,72 \pm 0,16 (bc)	1,18 \pm 0,22 (a)
	NBI	31 \pm 10 (b)	38 \pm 11 (a)	32 \pm 13 (ab)	35 \pm 11 (ab)	15 \pm 3 (c)
Épinards	Fv/Fm	0,83 \pm 0,01 (a)	0,83 \pm 0,01 (a)	0,83 \pm 0,01 (a)	0,83 \pm 0,00 (a)	0,34 \pm 0,03 (b)
	Chlorophylle a ($\mu\text{g cm}^{-2}$)	45,4 \pm 5,6 (b)	46,0 \pm 4,2 (b)	47,5 \pm 3,8 (ab)	49,3 \pm 5,3 (ab)	40,8 \pm 12,2 (c)
	Anthocyanes (A)	0,04 \pm 0,02 (ab)	0,04 \pm 0,02 (a)	0,03 \pm 0,01 (b)	0,03 \pm 0,02 (b)	0,04 \pm 0,03 (a)
	Flavonols (A)	0,66 \pm 0,12 (b)	0,57 \pm 0,08 (c)	0,66 \pm 0,11 (b)	0,66 \pm 0,13 (b)	1,02 \pm 0,17 (a)
	NBI	71 \pm 15 (b)	82 \pm 13 (a)	74 \pm 16 (ab)	78 \pm 18 (ab)	42 \pm 15 (c)
Mâche	Fv/Fm	0,80 \pm 0,09 (a)	0,82 \pm 0,01 (a)	0,83 \pm 0,01 (a)	0,83 \pm 0,00 (a)	0,46 \pm 0,02 (b)
	Chlorophylle a ($\mu\text{g cm}^{-2}$)	44,2 \pm 10,1 (ab)	47,1 \pm 6,9 (a)	45,9 \pm 7,8 (a)	46,6 \pm 5,2 (a)	39,6 \pm 3,5 (b)
	Anthocyanes (A)	0,09 \pm 0,02 (ab)	0,08 \pm 0,02 (b)	0,08 \pm 0,03 (ab)	0,08 \pm 0,02 (b)	0,10 \pm 0,02 (a)
	Flavonols (A)	0,53 \pm 0,11 (b)	0,47 \pm 0,09 (c)	0,53 \pm 0,12 (bc)	0,54 \pm 0,09 (b)	0,80 \pm 0,17 (a)
	NBI	87 \pm 25 (b)	103 \pm 20 (a)	91 \pm 22 (b)	89 \pm 17 (b)	52 \pm 13 (c)
Navets	Fv/Fm	0,84 \pm 0,01 (a)	0,84 \pm 0,01 (a)	0,82 \pm 0,07 (a)	0,83 \pm 0,01 (a)	0,82 \pm 0,01 (a)
	Chlorophylle a ($\mu\text{g cm}^{-2}$)	34,3 \pm 4,3 (ab)	33,9 \pm 7,3 (ab)	31,5 \pm 4,2 (b)	36,2 \pm 7,5 (a)	24,2 \pm 5,4 (c)
	Anthocyanes (A)	0,10 \pm 0,02 (a)	0,10 \pm 0,02 (a)	0,10 \pm 0,02 (a)	0,10 \pm 0,03 (a)	0,11 \pm 0,03 (a)
	Flavonols (A)	0,77 \pm 0,19 (b)	0,65 \pm 0,15 (c)	0,75 \pm 0,16 (bc)	0,77 \pm 0,21 (b)	1,04 \pm 0,16 (a)
	NBI	47 \pm 13 (b)	55 \pm 17 (a)	44 \pm 13 (b)	50 \pm 13 (b)	24 \pm 5 (c)
Pourpier d'hiver	Fv/Fm	0,81 \pm 0,01 (a)	0,81 \pm 0,01 (a)	0,79 \pm 0,01 (a)	0,78 \pm 0,01 (a)	0,79 \pm 0,02 (a)
	Chlorophylle a ($\mu\text{g cm}^{-2}$)	21,3 \pm 2,9 (a)	20,7 \pm 3,4 (a)	21,4 \pm 3,6 (a)	21,0 \pm 5,6 (a)	20,1 \pm 2,4 (a)
	Anthocyanes (A)	0,16 \pm 0,01 (b)	0,16 \pm 0,02 (b)	0,16 \pm 0,02 (b)	0,16 \pm 0,02 (b)	0,18 \pm 0,01 (a)
	Flavonols (A)	0,18 \pm 0,01 (c)	0,19 \pm 0,02 (bc)	0,19 \pm 0,02 (b)	0,19 \pm 0,03 (b)	0,24 \pm 0,03 (a)
	NBI	116 \pm 14 (a)	108 \pm 19 (a)	111 \pm 18 (a)	110 \pm 29 (a)	86 \pm 16 (b)
Roquette	Fv/Fm	0,53 \pm 0,03 (a)	0,52 \pm 0,03 (a)	0,50 \pm 0,03 (a)	0,50 \pm 0,03 (a)	0,53 \pm 0,02 (a)
	Chlorophylle a ($\mu\text{g cm}^{-2}$)	20,5 \pm 4,6 (b)	20,4 \pm 4,5 (b)	24,3 \pm 6,2 (a)	23,2 \pm 2,5 (a)	20,2 \pm 4,7 (b)
	Anthocyanes (A)	0,11 \pm 0,02 (b)	0,11 \pm 0,01 (b)	0,10 \pm 0,02 (c)	0,10 \pm 0,01 (bc)	0,12 \pm 0,02 (a)
	Flavonols (A)	0,78 \pm 0,15 (b)	0,70 \pm 0,11 (c)	0,79 \pm 0,11 (b)	0,79 \pm 0,10 (b)	0,87 \pm 0,11 (a)
	NBI	27 \pm 7 (bc)	30 \pm 8 (ab)	31 \pm 9 (a)	30 \pm 4 (ab)	23 \pm 6 (c)

T, sans bentonite, TV, sans bentonite avec vers (*L. terrestris*), TB, avec bentonite, TBV, avec bentonite avec vers (*L. terrestris*). Les lettres indiquent une différence significative entre les modalités au regard de l'indicateur considéré.

De nouveau, d'un point de vue physiologique, des différences significatives ont été mises en évidence entre les différents indicateurs observés pour les cultures d'hiver.

- **Ratios Fv/Fm :**

En moyenne, pour l'ensemble des cultures et des sols d'essai, le ratio Fv/Fm est compris entre 0,34 et 0,84. Les valeurs de ce ratio ont été proches de 0,8 pour les cultures de blettes, épinards, mâche, navets et pourpier d'hiver produites sur les modalités. Ces résultats montrent que les cultures n'ont pas dû souffrir d'un stress susceptible d'affecter leur photosynthèse. En revanche, le ratio Fv/Fm des roquettes des sols d'essai a été inférieur à cette valeur. Ces résultats pourraient témoigner d'une moindre efficacité du PSII des cultures à exploiter la lumière pour la réalisation de la conversion photochimique. Aucune différence

significative n'a été mise en évidence entre les modalités avec ou sans bentonite au regard de ce ratio. De la même manière, l'effet des vers sur ce paramètre n'est pas observé. Les valeurs de ce ratio pour les cultures des modalités sont systématiquement comparables voire supérieures à celles des cultures du témoin. Les valeurs significativement plus faibles du ratio Fv/Fm des cultures d'épinards et de mâche produites sur le sol témoin montrent que ces cultures n'ont pas présenté la même efficacité de leur PSII à exploiter la lumière pour assurer leur photosynthèse et pourraient renseigner un stress résultant d'un déficit ou d'une carence de ce sol en un élément.

- **Évaluation du statut azoté des cultures à travers leurs teneurs en chlorophylle a, flavonols et scores NBI :**

Les teneurs en chlorophylle a, flavonols et les scores NBI des cultures d'hiver ont différencié significativement selon le sol sur lequel elles s'étaient développées. Pour les mêmes raisons que celles exposées dans la partie relative aux cultures de printemps, l'analyse s'est exclusivement focalisée sur le score NBI qui combine directement les renseignements des teneurs en chlorophylle a et flavonols des cultures.

Les valeurs du score NBI des cultures d'hiver sont comprises entre 15 et 116. Elles s'inscrivent plus précisément entre 15 et 38 pour les blettes, entre 42 et 82 pour les épinards, entre 52 et 103 pour la mâche, entre 24 et 55 pour les navets, entre 86 et 116 pour le pourpier d'hiver et entre 23 et 31 pour la roquette.

Dans l'ensemble, les scores NBI des cultures d'hiver ne diffèrent pas significativement selon la présence ou l'absence de bentonite dans la modalité dont elles sont issues. L'influence des vers sur ce paramètre n'est pas mise en évidence au moyen des tests statistiques. Néanmoins, leur présence semble très légèrement améliorer les scores des légumes, notamment pour les cultures de blettes, d'épinards et de navets. Les scores NBI des cultures des modalités sont systématiquement supérieurs significativement à ceux des cultures du témoin. Ces résultats pourraient témoigner d'un meilleur statut azoté des cultures des modalités par rapport à celles du témoin.

- **Teneurs en anthocyanes :**

Les teneurs en anthocyanes de l'ensemble des cultures des sol d'essai sont comprises entre 0,03 et 0,18. Ces teneurs s'inscrivent plus particulièrement entre 0,11 et 0,15 pour les blettes, entre 0,03 et 0,04 pour les épinards, entre 0,08 et 0,10 pour la mâche, entre 0,10 et 0,11 pour les navets, entre 0,16 et 0,18 pour le pourpier d'hiver et entre 0,10 et 0,12 pour la roquette. La présence ou l'absence de bentonite ne semble pas influencer les valeurs de ce paramètre. L'inoculation des modalités en vers a augmenté significativement les teneurs en

anthocyanes des blettes. De légères tendances sont également observées pour de plus fortes teneurs en anthocyanes dans les épinards de TV par rapport à ceux de T et dans les roquettes de TBV par rapport à celles de TB. Les cultures du sol témoin ont toujours présenté des teneurs en anthocyanes supérieures à celles des modalités, à l'exception des épinards pour lesquels elles ont présenté des teneurs égales. Ces résultats sont en cohérence avec les premières observations effectuées à partir des scores NBI des cultures et pourraient témoigner d'une moindre assimilation en N et/ou P des cultures du sol témoin (à l'exception des navets) par rapport aux cultures des modalités.

3.3.2.3. Détermination des teneurs en éléments majeurs dans les cultures d'hiver

L'analyse de la composition minérale des cultures a mis en évidence des différences significatives pour au moins un élément majeur selon le sol support (figure 26).

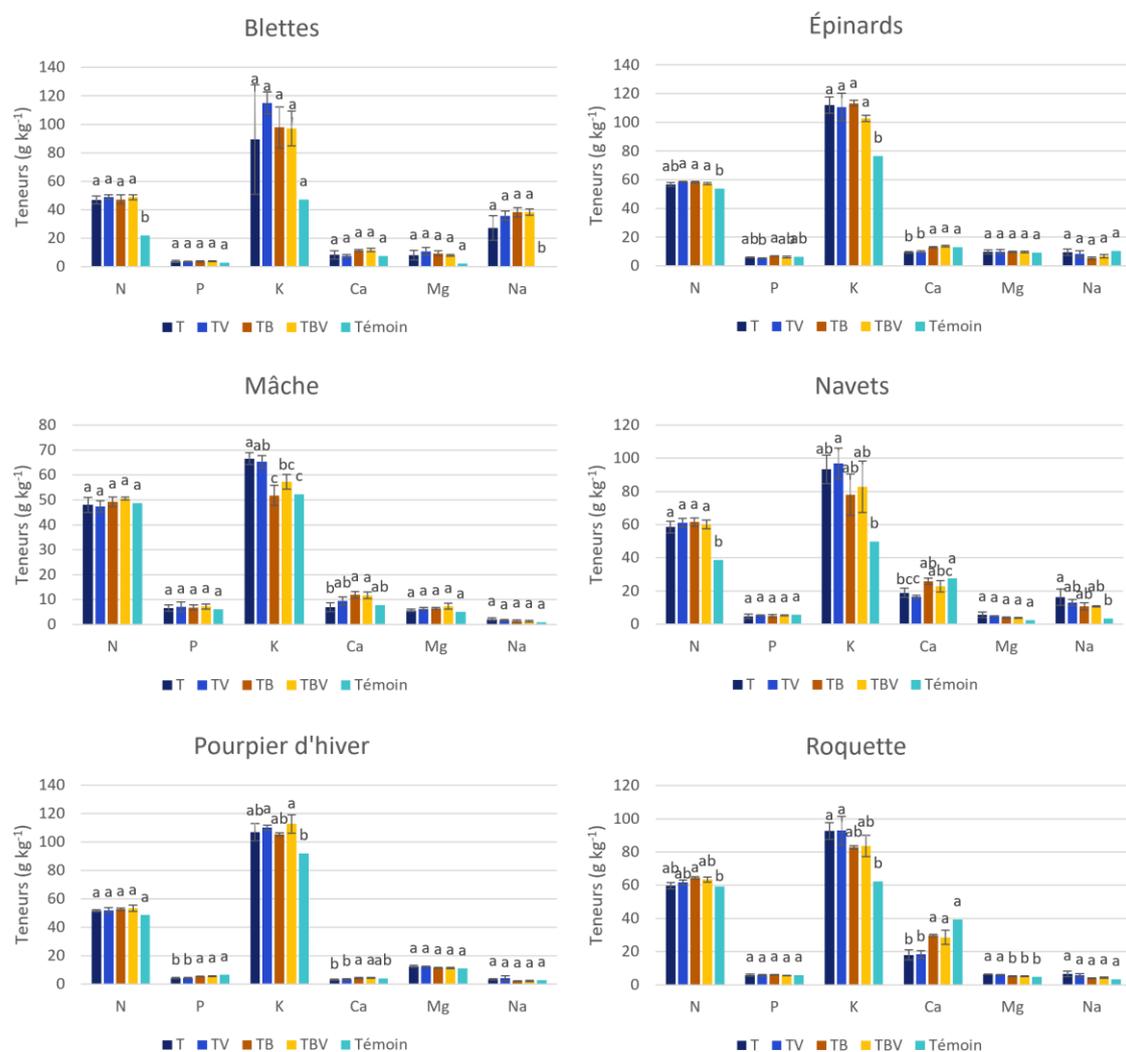


Figure 26 : Teneurs (PS) en éléments majeurs des cultures d'hiver (moyenne ± ET ; n = 3). T, sans bentonite, TV, sans bentonite avec vers (*L. terrestris*), TB, avec bentonite, TBV, avec bentonite avec vers (*L. terrestris*), Témoin, sol maraîcher témoin

Dans l'ensemble, les teneurs en N des cultures sont comprises entre 21,8 et 64,4 g kg⁻¹ PS selon les sols d'essai dont elles sont issues ; les teneurs en P sont comprises entre 2,7 et 7,2 g kg⁻¹ PS ; celles en K, entre 47,1 et 115,0 g kg⁻¹ PS ; celles en Ca, entre 3,3 et 39,4 g kg⁻¹ PS ; celles en Mg, entre 2,3 et 12,6 g kg⁻¹ PS et celles en Na, entre 0,3 et 38,4 g kg⁻¹ PS.

Aucune différence significative n'a été mise en évidence au regard des teneurs en N des cultures d'hiver produites sur les quatre modalités. De ce fait, la présence ou l'absence de bentonite et de vers ne semble pas avoir influencé l'assimilation des cultures en cet élément. Les teneurs en N des blettes, épinards, navets et de la roquette sont significativement inférieures dans les cultures issues du sol témoin. Aucune différence significative n'a été mise en évidence pour les teneurs en N des autres cultures d'hiver (i.e. mâche et pourpier d'hiver). Néanmoins, si elles ne diffèrent pas significativement des modalités, les teneurs en N des mâches du témoin tendent à être inférieures à celles des modalités. Plus spécifiquement, pour les blettes et les navets, les teneurs ont été significativement plus faibles dans les cultures produites sur le sol témoin tandis que des teneurs comparables ont été observées pour les blettes des 4 modalités expérimentales. Les teneurs en N des épinards cultivés sur TV, TB et TBV ont été significativement supérieures à celles des épinards issus du sol témoin. Des teneurs intermédiaires en cet élément ont été atteintes dans les épinards de T.

À l'exception des épinards et des pourpiers, les teneurs en P des cultures maraîchères d'hiver ont été comparables quel que soit le sol dont elles provenaient. Ces résultats indiquent que les cultures des modalités n'ont pas souffert d'un déficit en phosphore par rapport à celles du témoin. Seuls les épinards produits sur TV et le témoin et les pourpiers produits sur T et TV ont présenté une moindre assimilation en cet élément. Les résultats montrent par ailleurs que la bentonite et les vers n'ont pas eu d'effet quant à l'assimilation des cultures en P. L'observation plus fine des résultats montre que les épinards et les pourpiers ont différé significativement au regard de leurs teneurs en P suivant le sol où ils avaient été produits. Des différences significatives ont été mises en évidence entre les teneurs en P des épinards issus de TV et TB avec des valeurs plus élevées dans les épinards produits sur TB. Les épinards cultivés sur T, TBV et le témoin ont présenté des teneurs en P intermédiaires qui ne diffèrent pas de celles des épinards de TV et TB. Les teneurs en P ont été significativement plus faibles dans les pourpiers produits sur T et TV alors que les teneurs en P des pourpiers issus de TB, TBV et du témoin ont été comparables. Bien qu'il n'ait pas été mis en évidence de différence significative pour les teneurs en P des blettes, des tendances ont été observées avec de plus fortes teneurs en P dans les blettes cultivées sur les modalités que dans celles issues du sol témoin. De la même manière, les mâches cultivées sur les modalités expérimentales ont présenté une absorption légèrement plus importante en P que celles du témoin. Ces plus

fortes teneurs en phosphore pourraient avoir limité l'assimilation en Fe et Zn des cultures par rapport à celles du témoin.

Hormis pour les blettes, l'ensemble des cultures maraîchères d'hiver ont été différenciées selon leurs teneurs en K. De manière générale, de plus fortes teneurs ont été assimilées dans les cultures produites sur T et TV, des teneurs intermédiaires ont été observées dans les cultures issues de TB et TBV tandis que les teneurs les plus faibles ont été atteintes dans les cultures produites sur le témoin. Cette tendance est également observée pour les blettes malgré l'absence de différence significative. Ces résultats pourraient montrer une meilleure disposition des végétaux à assimiler du potassium dans les modalités sans bentonite. Ils indiquent par ailleurs que la présence de vers n'a pas eu d'effet sur l'absorption en K par les cultures. Dans la mesure où les teneurs en K moyennes des cultures des modalités ont été supérieures à celles du témoin, il semble qu'elles n'aient pas souffert d'un déficit en cet élément. Plus précisément, les épinards issus des 4 modalités expérimentales ont assimilé plus de K que ceux cultivés sur le sol témoin. Les teneurs en K ont été significativement plus élevées dans les mâches cultivées sur T et TV. Des teneurs intermédiaires ont été observées dans les mâches issues de TBV tandis que les teneurs les plus faibles ont été atteintes dans les mâches de TB et du sol témoin. Dans l'ensemble, les teneurs moyennes en K des roquettes des 4 modalités sont également supérieures à celles des roquettes produites sur le sol témoin. Les teneurs en K des navets de TV ont été significativement supérieures à celles des navets du témoin. Des teneurs intermédiaires en cet élément ont été observées dans les navets de T, TB et TBV. Une tendance à de plus fortes teneurs en K des navets cultivés sur les modalités sans bentonite a aussi été observée. Les teneurs en K ont été significativement supérieures dans les pourpiers cultivés sur TV et TBV que dans ceux issus du témoin. Des teneurs intermédiaires ont été atteintes dans les pourpiers produits sur T et TBV. Une moindre assimilation en Mg des cultures présentant de plus fortes teneurs en K est possible. En effet, en excès le potassium peut réduire l'absorption en Mg par les cultures. Les meilleurs prélèvements en K peuvent aussi avoir limité l'absorption en Fe des cultures.

Comme pour les teneurs en K, hormis les blettes, toutes les cultures maraîchères d'hiver ont différencié significativement selon leurs teneurs en Ca. Parmi les cultures produites dans les modalités, celles cultivées sur TB et TBV ont eu tendance à assimiler plus de Ca que celles produites sur T et TV. Ces résultats montrent que la présence de bentonite pourrait influencer favorablement l'assimilation en Ca par les cultures. Ils indiquent par ailleurs que la présence de vers n'a de nouveau pas eu d'effet sur l'absorption en cet élément par les cultures. Plus précisément, les épinards issus de T et TV ont présenté des teneurs significativement plus faibles à ceux produits sur TB, TBV et le sol témoin. Pour les cultures de mâche, les teneurs les plus élevées significativement ont été atteintes dans les mâches de TB et TBV et les plus faibles

dans celles de T. Des teneurs intermédiaires ont été observées dans les mâches produites sur TV et le témoin. Pour les navets, les teneurs moyennes en Ca ont été supérieures dans les cultures du témoin, de TB et TBV tandis que les plus faibles ont été observées dans les navets de T et TV. Des observations proches ont été faites quant aux productions de pourpier d’hiver et de roquettes avec, pour les pourpiers, les teneurs les plus élevées dans les productions issues de TB et TBV, des teneurs intermédiaires dans les pourpiers du témoin et les teneurs les plus faibles dans les pourpiers de T et TV. Pour les roquettes, les teneurs les plus élevées ont été atteintes dans les productions issues de TB, TBV et du témoin tandis que les teneurs les plus faibles ont été assimilées par les roquettes de T et TV. Des tendances à une assimilation plus importante en Ca ont été observées dans les blettes cultivées sur TB et TBV.

Seules des différences significatives des teneurs en Mg des roquettes ont été mises en évidence. Les roquettes cultivées sur T et TV ont assimilé de plus fortes teneurs en Mg que celles cultivées sur TB, TBV et le témoin. Ces résultats traduisent une meilleure propension des cultures de roquette à prélever du Mg en l’absence de bentonite.

Les teneurs en Na des blettes et navets ont différencié significativement selon le sol dont ils étaient issus. Les teneurs en Na des cultures issues des 4 modalités expérimentales ont été comparables entre elles et significativement plus élevées que celle produites sur le sol témoin. Les mêmes tendances sont observées pour les cultures de mâche et de roquette.

Les teneurs en éléments majeurs ont varié selon les cultures et les sols sur lesquelles elles avaient été cultivées. Comme pour les cultures de printemps, les teneurs en K, Ca, Mg et Na des cultures d’hiver ont été exprimées en poids frais en vue de les comparer aux données du programme EAT 2. Les résultats sont présentés dans le tableau 35.

Tableau 35 : Teneurs en éléments majeurs (exprimées en g kg⁻¹ de poids frais PF) des cultures d’hiver produites dans T, TV, TB, TBV et le témoin en comparaison des teneurs dans les légumes analysés dans le cadre du programme EAT 2 (Anses, 2011)

	K	Ca	Mg	Na
Blettes (g kg ⁻¹ PF)	4,71 – 11,50	0,740 – 1,170	0,230 – 1,070	0,03 – 3,80
Épinards (g kg ⁻¹ PF)	7,64 – 11,33	0,940 – 1,380	0,920 – 0,990	0,53 – 1,03
Mâche (g kg ⁻¹ PF)	5,18 – 6,66	0,690 – 1,190	0,510 – 0,730	0,09 – 0,21
Navets (g kg ⁻¹ PF)	6,99 – 13,55	2,310 – 3,864	0,350 – 0,798	0,48 – 2,28
Pourpier d’hiver (g kg ⁻¹ PF)	9,19 – 11,27	0,300 – 0,450	1,100 – 1,260	0,23 – 0,43
Roquette (g kg ⁻¹ PF)	6,23 – 9,29	1,800 – 3,940	0,470 – 0,640	0,34 – 0,66
Légumes du programme EAT 2 (g kg ⁻¹ PF)	2,52	0,313	0,186	1,20

À l’exception des teneurs en Na des cultures des sols d’essai, les cultures maraîchères d’hiver présentent systématiquement des teneurs supérieures à celles des légumes étudiés dans le cadre du programme EAT 2. Ces résultats montrent que les cultures n’ont globalement pas souffert d’un déficit en un élément lors de leur développement parmi les sols d’essai.

3.3.2.4. Détermination des teneurs en oligo-éléments dans les cultures d'hiver

L'analyse des teneurs en éléments majeurs des cultures d'hiver a été complétée par l'étude de leurs teneurs en oligo-éléments. Les résultats de ces déterminations analytiques sont synthétisés dans la figure 27.

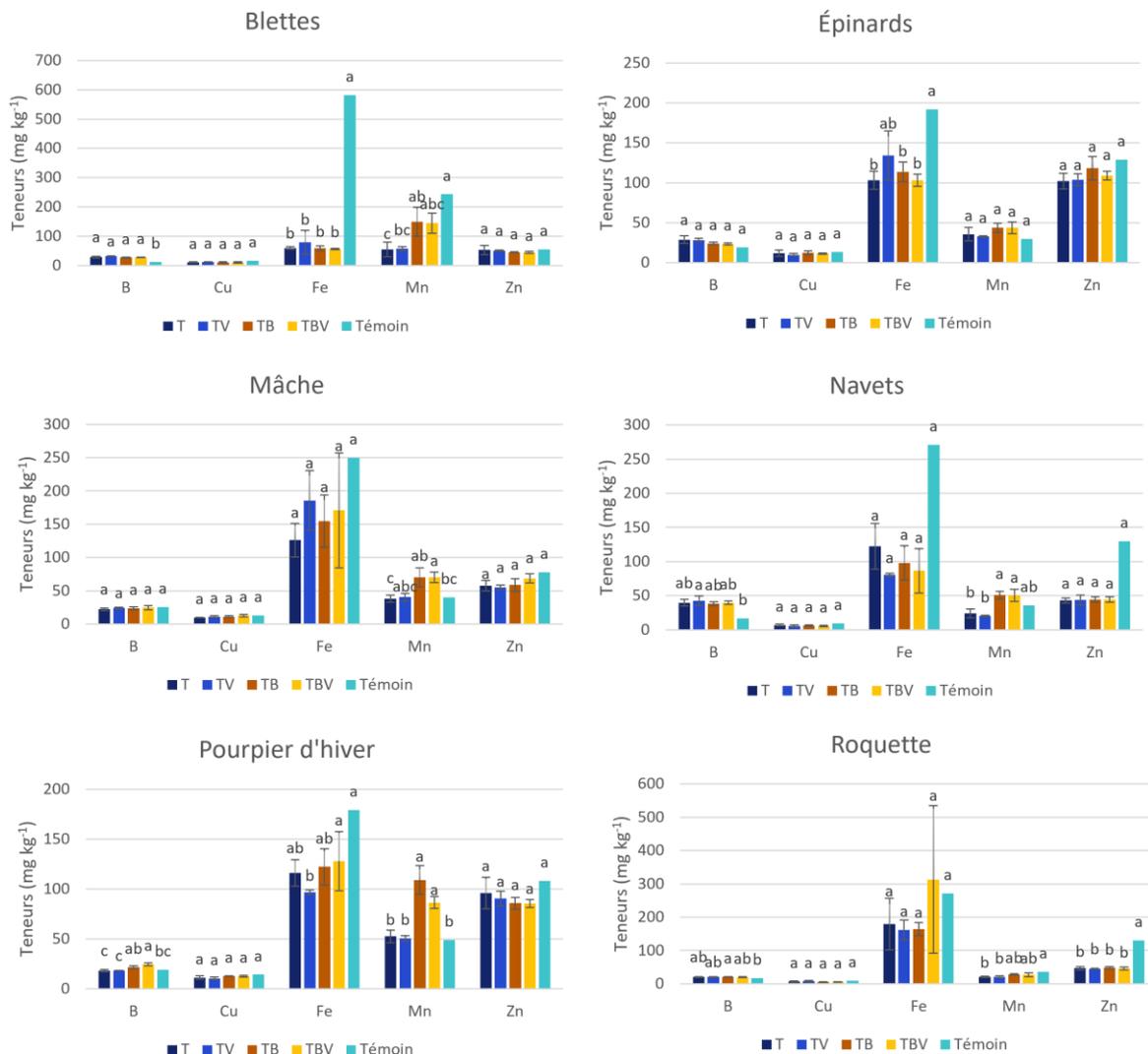


Figure 27 : Teneurs (PS) en oligo – éléments des cultures d'hiver (moyenne ± ET ; n = 3). T, sans bentonite, TV, sans bentonite avec vers (*L. terrestris*), TB, avec bentonite, TBV, avec bentonite avec vers (*L. terrestris*), Témoin, sol maraîcher témoin

Dans l'ensemble, les teneurs en B des cultures sont comprises entre 11,9 et 42,7 mg kg⁻¹ PS selon les modalités dont elles sont issues ; les teneurs en Cu sont comprises entre 5,5 et 15,9 mg kg⁻¹ PS ; celles en Fe, entre 56,0 et 582,0 mg kg⁻¹ PS ; celles en Mn, entre 20,6 et 243,0 mg kg⁻¹ PS et celles en Zn, entre 42,3 et 130,0 mg kg⁻¹ PS.

Les teneurs en B des blettes, navets, pourpiers et roquettes ont différencié selon les sols sur lesquels ils avaient été cultivés. Dans l'ensemble, les teneurs en B des blettes et des navets des modalités ont été supérieures à celles du sol témoin. Pour les blettes, ces différences ont été significatives. Les teneurs en B ont été significativement plus élevées dans les pourpiers

de TB et TBV que dans ceux de T et TV. Des teneurs intermédiaires ont été observées dans les pourpiers produits sur le sol témoin. Ces résultats peuvent témoigner d'une meilleure capacité des cultures à prélever du B en présence de bentonite. Parmi les roquettes, seules celles récoltées dans TB ont présenté des teneurs significativement supérieures en B par rapport au sol témoin. Les teneurs moyennes en B des roquettes cultivées dans T, TV et TBV ont été supérieures à celle des roquettes produites sur le sol témoin, sans que ces différences soient significatives. Dans l'ensemble, les roquettes produites sur les modalités ont ainsi mieux assimilé le bore que celles cultivées sur le sol témoin. Les mêmes tendances ont été observées pour les cultures d'épinards.

Aucune différence significative n'a été mise en évidence pour les teneurs en Cu des cultures maraîchères d'hiver. En prenant les cultures produites sur le sol témoin comme référence, il peut être considéré que les légumes cultivés sur les 4 modalités n'ont pas souffert d'un déficit en Cu.

Des différences significatives entre les teneurs en Fe des blettes, épinards et pourpiers ont été mises en évidence selon le sol sur lequel ils avaient été récoltés. Pour l'ensemble de ces cultures, les teneurs les plus élevées ont systématiquement été atteintes dans les cultures produites sur le témoin. Les teneurs en Fe des blettes et épinards des quatre modalités ont été comparables. À l'inverse, parmi les pourpiers cultivés au sein des quatre modalités expérimentales, seules les teneurs des cultures issues de TV et TBV ont été différenciées avec une assimilation plus importante en Fe des pourpiers de TBV. Les mâches, les navets et les roquettes n'ont pas été différenciés selon leurs teneurs en Fe. Néanmoins, les teneurs en Fe de ces cultures suivent les mêmes tendances que pour les blettes, épinards et pourpiers, avec de plus fortes teneurs en Fe des cultures issues du témoin.

À l'exception des épinards dont les teneurs en Mn ont été comparables quel que soit le sol dont les cultures étaient issues, toutes les autres cultures d'hiver ont été différenciées selon leurs assimilation en cet élément. Pour les mâches, navets et pourpiers, les teneurs moyennes les plus élevées ont été observées dans les cultures issues de TB et TBV, des teneurs intermédiaires ont été assimilées dans les cultures produites sur le témoin et de plus faibles teneurs ont été atteintes dans les cultures issues de T et TV. Les mêmes tendances ont été observées pour les épinards. Pour les blettes et les roquettes, de plus fortes teneurs ont été atteintes dans les cultures du témoin tandis que les cultures issues de TB et TBV ont eu tendance à assimiler des teneurs légèrement plus élevées que celles issues de T et TV. Ces résultats pourraient indiquer la plus forte concentration de Mn en solution dans TB et TBV.

Seules les roquettes cultivées sur les 5 sols d'essai ont présenté des concentrations en Zn significativement différentes. Les concentrations ont été significativement plus élevées

dans les roquettes produites sur le sol témoin tandis qu'elles ont été comparables dans les roquettes cultivées sur les modalités expérimentales. Les mêmes tendances ont été observées pour les concentrations en Zn des épinards et des pourpiers d'hiver.

Les teneurs en Cu, Fe, Mn et Zn des cultures d'hiver des cinq sols d'essai ont été exprimées en poids frais afin de les comparer aux teneurs des légumes analysés dans le programme EAT 2. Les résultats sont synthétisés dans le tableau 36.

Tableau 36 : Teneurs en oligo-éléments (exprimées en mg kg⁻¹ de poids frais PF) des cultures d'hiver produites dans T, TV, TB, TBV et le témoin et des légumes analysés dans le cadre du programme EAT 2 (Anses, 2011)

	Cu	Fe	Mn	Zn
Blettes (mg kg ⁻¹ PF)	1,02 – 1,59	5,6 – 5,9	5,44 – 24,3	4,49 – 5,50
Épinards (mg kg ⁻¹ PF)	0,99 – 1,36	10,3 – 19,2	2,99 – 4,37	10,21 – 12,90
Mâche (mg kg ⁻¹ PF)	0,98 – 1,32	12,6 – 25,0	3,80 – 7,03	5,52 – 7,77
Navet (mg kg ⁻¹ PF)	0,78 – 1,01	11,3 – 17,1	2,88 – 7,15	5,92 – 6,22
Pourpier d'hiver (mg kg ⁻¹ PF)	1,05 – 1,44	9,7 – 17,9	6,92 – 10,91	8,56 – 10,80
Roquette (mg kg ⁻¹ PF)	0,55 – 0,93	16,2 – 31,3	2,07 – 3,60	4,49 – 13,00
Légumes du programme EAT 2 (mg kg ⁻¹ PF)	0,66	4,6	1,34	2,34

Les teneurs en oligo-éléments des cultures maraîchères sont systématiquement supérieures à celles des légumes analysés dans le cadre de l'EAT 2 et montrent que les cultures n'ont *a priori* pas souffert d'un déficit en un élément lors de leur développement.

3.3.2.5. Bilan relatif aux potentialités agronomiques des Technosols construits pour les cultures d'hiver

L'ensemble des données obtenues sur les cultures d'hiver a été confronté aux paramètres physiques, chimiques et biologiques des sols sur lesquelles elles s'étaient développées à t₂ (date de leur implantation) et à t₃ (date de leur récolte). Les résultats des analyses en composantes principales sont présentés dans la figure 28.

Ces analyses ont permis de discriminer les modalités du sol témoin le long de l'axe 1 (55 % à t₂ et 45 % à t₃) et les modalités avec et sans bentonite le long de l'axe 2 (18 % à t₂ et 19 % à t₃). Des corrélations positives ont été établies entre les teneurs en Ca²⁺ (exprimées en CaO dans la figure 28) des sols et les plus fortes biomasses (notamment pour les cultures de mâche, pourpier et roquette). Comme pour la plupart des observations réalisées sur les autres cultures, il est possible que la nature très fortement carbonatée et les pH élevés de T et TV aient pu limiter la disponibilité d'éléments nécessaires au développement des cultures. Si ces hypothèses sont vérifiées en observant les cultures des modalités, elles ne le sont pas en confrontant les biomasses des modalités à celles du témoin puisque les biomasses des modalités ont globalement été comparables voire supérieures à celles du témoin malgré la nature calcaire et le pH alcalin de ces sols. L'analyse des teneurs en P des épinards des modalités tend à confirmer l'hypothèse selon laquelle les plus fortes teneurs en carbonates de T et TV ont pu bloquer l'assimilation en nutriment des cultures et de surcroît limiter leur biomasse. En effet, la différence de teneurs en P observées parmi les épinards suit les mêmes

tendances que celle de leurs biomasses. Les plus faibles teneurs en P des végétaux produits dans les modalités sans bentonite pourraient ainsi provenir de leurs très fortes teneurs en carbonates à l'origine du blocage de la biodisponibilité du phosphore (Colomb, 2017).

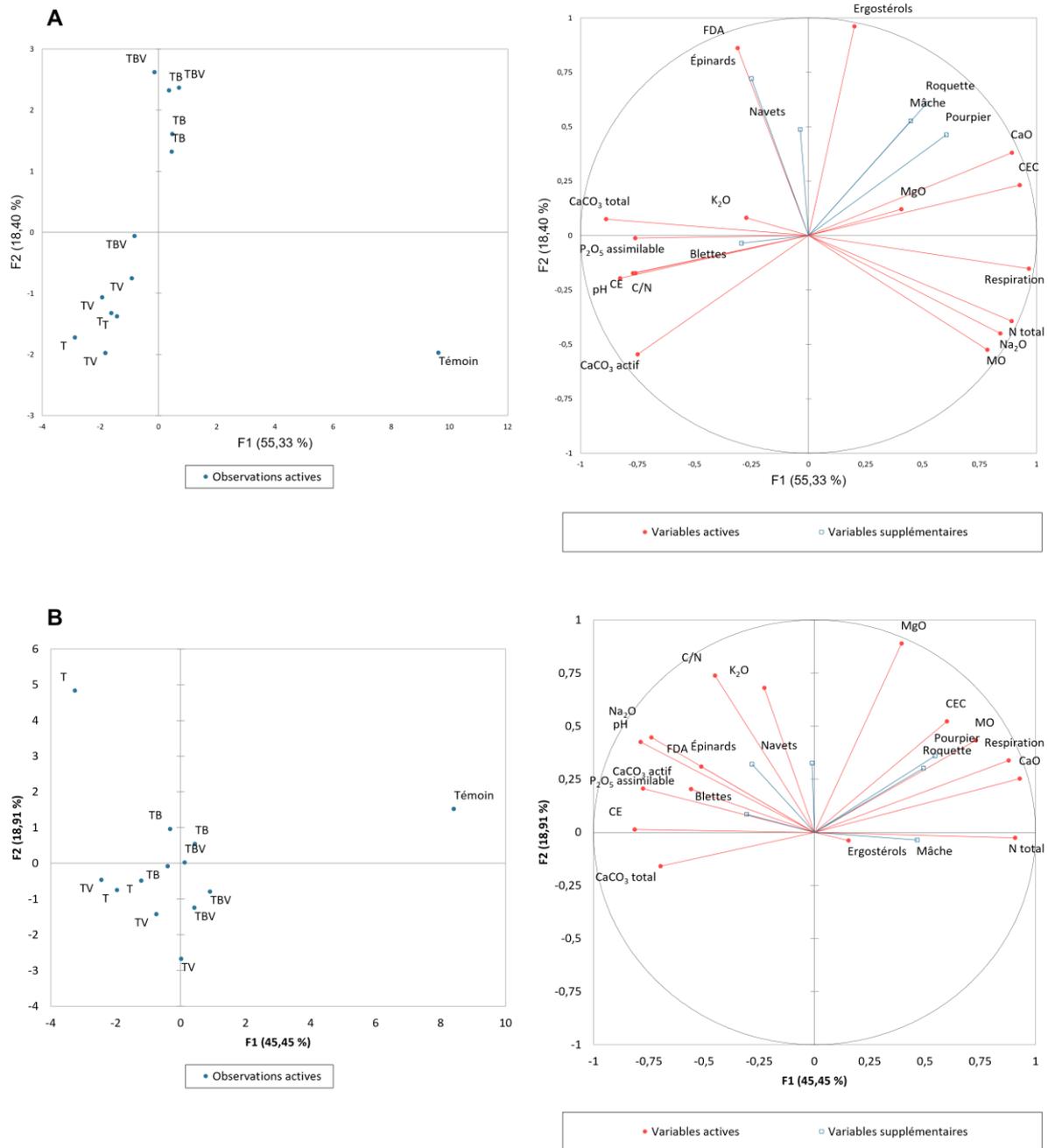


Figure 28 : Analyse en composantes principales des 9 modalités testées (T, TV, TB et TBV à (A) t1 et (B) t2) et du sol témoin sur la base de 16 de leurs paramètres physico-chimiques (pH, CE, CaCO_3 total et actif, MO, N total, C/N, CEC et P_2O_5 assimilable, K_2O , MgO, Na_2O , CaO, respirométrie, ergostérols et FDA) et des biomasses des cultures d'hiver à l'issue de la deuxième mise en culture des modalités des Technosols construits. (A) À t1, axe 1 = 55 %, axe 2 = 18 % ; à t2, axe 1 = 45 %, axe 2 = 19 %.

Parmi les cultures d'hiver, les roquettes sont les seules à avoir été semées et ont permis d'examiner dans quelle mesure le pouvoir germinatif des modalités avait évolué entre les deux saisons culturales. Pour rappel, malgré l'absence de différence significative entre les

biomasses des cultures, des tendances ont été observées avec de meilleures biomasses dans les modalités avec bentonite. La présence ou l'absence de vers ne semble pas avoir influencé les biomasses de ces cultures. Deux hypothèses ont été formulées pour expliquer les biomasses plus faibles de T et TV. La première suppose que parmi le semis réalisé, un nombre plus faible de graines aurait germé. Lors du suivi cultural, le taux de couverture de la placette dédiée à la culture de roquette était en effet plus faible dans T et TV que dans TB et TBV. La deuxième hypothèse est la même que celle formulée pour les cultures maraîchères de printemps et tient compte d'une possible limite en l'assimilation en nutriments essentiels au développement des cultures dans T et TV en raison de leurs pH plus élevés.

Bien que les vers n'aient pas eu d'effet majeur sur les biomasses, de plus faibles valeurs ont été observées dans les modalités inoculées pour les cultures d'épinards. L'incidence de la présence de *L. terrestris* sur l'appauvrissement des biomasses d'épinards récoltées a déjà été observée par Devliegher et Verstraete (1997). D'après les auteurs, l'action des vers peut provoquer une réduction de la disponibilité en N du sol et entraîner une baisse de biomasses. Au regard des valeurs des teneurs en N comparables des épinards des quatre modalités, cette hypothèse est rejetée. Les auteurs soulignent aussi que l'activité des vers est susceptible de diminuer les activités microbiennes. Ainsi, il est plutôt envisagé qu'avec des activités réduites, la biodisponibilité de certains nutriments ait pu être amoindrie, ce qui aurait légèrement impacté les biomasses en épinards des modalités inoculées. À ce titre, il est supposé qu'avec la plus faible activité microbienne engendrée par l'action des vers, la minéralisation des amendements apportés à t_2 ait pu être altérée dans les modalités inoculées et que les épinards de TV et TBV aient disposé de P disponible en moins grande quantité que dans T et TB. Soulignons que malgré ces observations, l'ensemble des valeurs de biomasses des cultures d'épinards des modalités était supérieur à celle obtenue dans le sol maraîcher témoin. De ce fait, les tendances observées ne constituent pas un frein pour une production maraîchère professionnelle.

Dans l'ensemble, les biomasses des cultures dépendent de leur capacité à assimiler les différents nutriments nécessaires à leur développement. L'absorption des éléments par les végétaux dépend directement des compositions des sols et des équilibres entre les éléments en solution. Les déséquilibres sont à l'origine de différents antagonismes. Ainsi, en teneurs excédentaires, (i) P peut réduire la biodisponibilité en Fe (et inversement), (ii) K peut limiter l'assimilation en Ca et Mn des cultures, (iii) B peut réduire la disponibilité de Fe et Cu et (iv) Mn peut induire une plus faible disponibilité en Fe.

Au regard des résultats et de leur association aux phénomènes d'antagonismes décrits dans la littérature, divers mécanismes ont pu se produire dans les modalités. Par exemple, les

moindres teneurs en P des blettes issues du sol témoin pourraient résulter de fortes teneurs en fer dans ce sol. En effet, d'importantes teneurs en fer réduisent la biodisponibilité en P et K (Colomb, 2017). Au regard des plus fortes teneurs en Fe des blettes du témoin, cette hypothèse semble validée. À l'inverse, sont mentionnées les déficiences en Fe et Zn induites par un surplus de P (ibid). Ainsi, les moindres teneurs en Fe des blettes cultivées parmi les modalités expérimentales pourraient résulter des fortes teneurs en P_2O_5 assimilable de ces sols d'une part, mais aussi de leurs teneurs très élevées en calcaire actif (également connues pour réduire la biodisponibilité du fer) (ibid). Le même constat est fait pour les cultures de mâche des modalités par rapport à celle du témoin.

Outre des teneurs élevées en P, l'alcalinité des sols peut également constituer un frein à l'assimilation en Zn des cultures. En pH alcalin, la formation d'oxydes est en effet susceptible d'adsorber Zn et d'en limiter la disponibilité (Colomb, 2017). Par ailleurs, comme pour Fe, la biodisponibilité en Zn est réduite par (i) les fortes teneurs en calcaire, (ii) la compaction des sols, (iii) les fortes teneurs en P_2O_5 assimilable et N et (iv) les températures plus froides du sol (ibid). Ainsi, la combinaison de ces facteurs a probablement induit une moindre assimilation en Zn des cultures de roquette, d'épinard et de pourpier produites sur les modalités expérimentales par rapport à celles cultivées sur le témoin.

La plus forte assimilation en K des blettes, épinards, mâches, navets et roquettes cultivés sur les modalités sans bentonite pourrait résulter de leurs plus fortes teneurs en K^+ en solution. Cette hypothèse est d'ailleurs appuyée par les plus faibles teneurs en Ca de ces cultures. En effet, comme pour les cultures de céleri, il est probable que les plus fortes teneurs en K en solution aient réduit l'assimilation en Ca. Par ailleurs, l'association des plus fortes teneurs en K des solutions de T et TV au phénomène d'absorption sélective des racines des végétaux et à leur pH alcalin a pu limiter l'assimilation en Ca des cultures qu'ils supportaient (comme cela était supposé pour les cultures de céleri-rave). Soulignons par ailleurs qu'en excès, le potassium est aussi susceptible de limiter l'absorption en Mg, Fe et Mn des cultures. Or, des teneurs plus importantes en K ont été observées dans les blettes, mâches, navets et roquettes de T et TV. Au regard des résultats, les plus fortes assimilations en K dans les cultures de T et TV ont effectivement induit une moindre assimilation en Mn des cultures mais n'ont pas conduit à de plus faibles teneurs en Fe des cultures par rapport à celles de TB et TBV. Le potassium ne peut être considéré comme excédentaire puisqu'aucun signe visible ne faisant état de trop fortes concentrations n'a été observé sur les cultures. Notons de plus que les carences en fer se manifestent généralement sous forme de chlorose perceptible sur le feuillage des cultures. Un tel phénomène n'a pas été observé sur les cultures d'hiver si bien qu'il ne peut être considéré que les cultures aient souffert d'un déficit en fer. Les assimilations en Ca plus importantes chez les blettes, épinards, mâche et pourpier cultivés sur TB et TBV

pourraient renseigner une plus forte quantité en Ca^{2+} en solution ou encore une CEC plus importante (laquelle est avérée). En trop forte quantité dans la solution du sol, le Ca peut devenir excédentaire et toxique pour les végétaux. Néanmoins, aucun signe de toxicité n'a été observé sur les cultures. Pour les navets, la meilleure assimilation en K des cultures des modalités (couplées à leurs teneurs en P plus élevées) pourrait être l'une des raisons pour lesquelles ces légumes ont présenté de meilleures biomasses par rapport aux navets du témoin.

En cas de déficit en Mg, les cultures peuvent souffrir de carence en chlorophylle (Colomb, 2017). Dans cette étude, les roquettes cultivées sur T et TV ont assimilé de plus fortes teneurs en Mg que celles cultivées sur TB, TBV et le témoin. Cependant, les roquettes produites sur TB et TBV ont présenté des teneurs en chlorophylle a supérieures à celles issues de T et TV, tandis que celles produites sur le témoin ont été comparables à celles de T et TV. Ainsi, il ne peut être considéré un déficit en Mg dans TB et TBV. À l'inverse, en teneur excédentaire dans les sols, le magnésium peut occuper la CEC au détriment du Ca et altérer la stabilité structurale du sol du fait de sa moindre capacité à la floculation (Colomb, 2017). De plus faibles teneurs moyennes en Mg des blettes, mâches et navets cultivés sur le témoin ont été observées, sans que ces différences soient significatives. De la même manière que pour les roquettes, ces résultats peuvent être analysés au regard des teneurs en chlorophylle a significativement plus faibles de ces cultures par rapport à celles des modalités. Notons par ailleurs qu'étant donné les tendances à de plus fortes valeurs en Mg dans les navets cultivés sur les modalités, les cultures n'ont pas souffert d'un excès en K comme cela avait été envisagé.

Les teneurs en Na des cultures des modalités ont toutes été supérieures à celle du témoin mais inférieures à celles des légumes du programme EAT 2. Le sodium n'est pas reconnu comme un élément indispensable au développement des végétaux. D'ailleurs son rôle est qualifié de mineur et il ne représente pas une limite à leur croissance (Colomb, 2017). De ce fait, les résultats n'ont pas fait l'objet d'une analyse plus poussée. Notons néanmoins que de plus fortes teneurs en Na sont souvent observées dans les cultures issues de sols anthropisés (ibid). Les valeurs élevées en Na des cultures d'hiver des modalités résultent ainsi très certainement du caractère anthropique de ces sols.

De manière générale, les teneurs en bore, cuivre, fer et manganèse sont étroitement corrélées dans les sols (Colomb, 2017). De fortes teneurs en bore peuvent notamment induire une réduction de la biodisponibilité en fer et en cuivre (ibid). De plus fortes teneurs en B des blettes et navets issus des 4 modalités expérimentales pourraient ainsi résulter de teneurs plus importantes en B dans ces sols qui pourraient avoir limité l'assimilation en Fe et Cu de

ces cultures. D'ailleurs, les plus faibles teneurs en Fe et Cu des blettes et navets des modalités par rapport aux cultures du témoin semblent appuyer cette hypothèse. Des carences en bore des navets sont souvent observées en sols fortement basiques (Jobbé-Duval, 2017). Le phénomène inverse a plutôt été observé dans le cadre de cette expérimentation puisque les navets produits au sein des modalités ont présenté des teneurs moyennes supérieures à celles des navets cultivés sur le témoin. Ce phénomène n'est pas exclusif aux navets puisque Colomb (2017) montre que l'assimilation en B par les cultures est généralement réduite en sol calcaire. Dans l'ensemble, les teneurs en B des cultures des modalités ont été très proches et toujours comparables voire supérieures à celles du témoin. Ainsi, il ne peut être considéré que les cultures des modalités et plus particulièrement de celles de T et TV aient souffert d'un déficit en B induit par leurs fortes teneurs en calcaire. D'importantes teneurs en Ca peuvent aussi diminuer l'assimilation en B des cultures (ibid). Pour rappel, les roquettes et navets cultivés dans le sol témoin ont présenté les teneurs moyennes les plus élevées en Ca. Les interactions entre ces deux éléments ont ainsi pu réduire l'assimilation en B des cultures du témoin par rapport à celles des modalités.

Les plus faibles teneurs en Fe des cultures des modalités sont à associer à leurs fortes teneurs en calcaire, à leur plus forte compacité ainsi qu'aux températures plus froides en hiver. La combinaison de ces trois facteurs est effectivement décrite comme pouvant induire une carence en fer (Colomb, 2017).

La sensibilité des épinards à la compaction des sols et à leur teneur en calcaire se manifeste souvent par des carences en Mn (Jobbé-Duval, 2017). Pourtant, les épinards sont les seules cultures d'hiver qui ont présenté des teneurs comparables en Mn quel que soit le sol dont ils étaient issus. En teneurs excédentaires, le manganèse peut générer une toxicité – laquelle se manifeste par l'apparition de taches brunes le long des nervures principales des végétaux – ainsi que des carences induites en fer, magnésium et calcium (Colomb, 2017). De plus fortes teneurs en Mn ont été décrites dans les navets et pourpiers de TB et TBV. Néanmoins, aucun signe de toxicité induite par cet élément n'a été observé dans les cultures, si bien qu'il ne semble pas en excès dans ces deux modalités. Par ailleurs, les teneurs en Ca et Mg des navets et pourpiers issus de TB et TBV ont été très proches de celles du témoin. Ainsi, les plus fortes teneurs en Mn n'ont pas limité l'assimilation en Ca et Mg des cultures. En revanche, elles ont pu réduire leur absorption en Fe. Le manganèse intervient également dans la réaction de Hill qui s'opère dans le PSII. Un déficit en cet élément aurait pu être visible au moyen du ratio F_v/F_m des cultures. Toutefois, les valeurs de ce ratio ont été comparables pour les navets et pourpiers de l'ensemble des sols d'essai. Les plus faibles teneurs en Mn des roquettes et des blettes des modalités par rapport à celles du témoin pourraient résulter des pH plus élevés de ces sols (qui pourraient avoir limité la disponibilité en Mn). Par ailleurs,

blettes et épinards – tous deux de la famille des chénopodiacées – ont été cultivés à proximité au cours de la même saison culturale et pourraient être entrés en compétition pour leur approvisionnement en nutriments. Souvent, les végétaux appartenant à la même famille ont tendance à prélever les nutriments essentiels à leur développement en quantités très proches. Il est ainsi recommandé de ne pas cultiver des végétaux de la même famille au même moment. Néanmoins, pour se conformer aux pratiques mises en place par la ferme urbaine de Veolia, les deux cultures ont été implantées ensemble au cours du même cycle cultural et à proximité l’une de l’autre.

L’ensemble de ces interprétations a permis de dresser un bilan des caractéristiques des modalités avec et sans bentonite et de leurs avantages et inconvénients quant à la culture de légumes. Cette synthèse est présentée dans le tableau 37.

Tableau 37 : Bilan des caractéristiques des modalités avec et sans bentonite et des principaux antagonismes observés sur la culture de légumes

Modalités avec bentonite (TB et TBV)	Modalités sans bentonite (T et TV)
Les teneurs élevées en Ca ²⁺ en solution de ces sols améliorent les biomasses.	Le caractère fortement carbonaté et leur pH élevé ont limité la biodisponibilité en P, Fe, Mn et/ou Zn d’au moins une des cultures maraîchères.
	Les teneurs élevées en K ⁺ en solution ont provoqué la plus faible assimilation en Mn d’au moins une des cultures. Associées au phénomène d’absorption sélective des racines et au pH alcalin de ces sols, les fortes teneurs en K ⁺ en solution ont induit une plus faible assimilation en Ca d’au moins une des cultures.
Les fortes teneurs en P ₂ O ₅ assimilable des modalités ont provoqué la plus faible assimilation en Fe de leurs cultures. Associées à la compaction des sols, à leur nature calcaire et aux températures froides, les fortes teneurs en P ₂ O ₅ assimilable de ces sols ont également engendré une plus faible assimilation en Zn de certaines des cultures.	
Les plus fortes teneurs en B en solution des modalités ont provoqué une plus faible assimilation en Fe et Cu d’au moins une de leurs cultures.	
Les plus fortes teneurs en Mn en solution des modalités ont également engendré une plus faible assimilation en Fe d’au moins une de leurs cultures.	
L’ensemble de ces antagonismes n’a pas altéré les denrées et les modalités ont montré leur aptitude à produire des légumes d’hiver de qualité et en quantité comparable à celles du témoin.	

L’analyse approfondie des scores NBI et des teneurs en anthocyanes des cultures d’hiver ont permis d’émettre différentes hypothèses. Ces hypothèses sont exposées dans le tableau 38 et directement confirmées ou infirmées à partir de l’analyse de la composition minérale des cultures.

Contrairement aux hypothèses émises à partir des mesures pour les cultures de printemps, les hypothèses posées pour les cultures d’hiver semblent globalement plus validées. Ces résultats montrent que l’utilisation de l’outil (Dualix) pour détecter d’éventuels stress des végétaux peut être judicieuse.

Tableau 38 : Validation des hypothèses posées sur les teneurs en N et/ou P des cultures à partir de l'outil Dualex

Hypothèse	Validité
Au regard de leurs scores NBI plus élevés, les blettes cultivées sur TV, TB et TBV présentent un meilleur statut azoté que celles de T et du témoin.	L'hypothèse est partiellement validée compte tenu des teneurs plus faibles en N des blettes du sol témoin. En revanche, avec des statuts azotés comparables des blettes des 4 modalités, l'éventualité d'une moindre assimilation en N des cultures développées sur T par rapport à celles issues de TV, TB et TBV est réfutée.
Les scores NBI des épinards cultivés sur les modalités expérimentales montrent que ces cultures ont bénéficié d'un meilleur statut azoté que celles produites sur le sol maraîcher témoin. Parmi les épinards des modalités, ceux produits sur TV ont mieux assimilé l'azote, puis ceux sur TB, TBV et enfin sur T.	L'hypothèse est validée par les teneurs en N des cultures.
Avec un score NBI plus faible, les mâches cultivées sur le sol témoin ont pu souffrir d'un déficit en N par rapport à celles des modalités expérimentales.	L'hypothèse est validée par les teneurs moyennes en N des cultures.
Avec un score NBI largement plus faible que ceux des modalités, les navets du témoin pourraient souffrir d'un net déficit en N. Les valeurs légèrement plus faibles des scores NBI des navets de T, TB et TBV par rapport à ceux de TV pourraient également indiquer un plus faible statut azoté de ces légumes par rapport à ceux de TV.	L'hypothèse est partiellement validée puisque les navets du témoin présentent effectivement des teneurs déficitaires en N par rapport aux navets des modalités. En revanche les teneurs en N des navets des modalités s'inscrivent dans des gammes de valeurs comparables, ce qui réfute la seconde partie de l'hypothèse.
Au regard des scores NBI des roquettes, une différence de statut azoté des cultures issues de 4 modalités est probable, avec des teneurs en N plus importantes dans les roquettes de TB, TV et TBV et des teneurs plus faibles dans celles de T. Un probable déficit en N des roquettes cultivées sur le sol témoin par rapport à celles issues des modalités TB, TV et TBV est également possible.	L'hypothèse est validée par les teneurs en N des cultures.
Les teneurs plus importantes en anthocyanes des blettes du témoin et de TV pourraient résulter d'une moindre assimilation en phosphore de ces cultures.	L'hypothèse est partiellement validée puisque les blettes issues du témoin ont eu tendance à assimiler du P en moindre quantité. Toutefois, la plus faible assimilation en P des cultures produites sur TV n'est pas avérée puisque des teneurs comparables en cet élément sont observées entre les blettes des 4 modalités.
Les teneurs élevées en anthocyanes des épinards de T, TV et du témoin pourraient traduire un déficit en N et/ou P de ces cultures par rapport à celles issues de TB et TBV.	L'hypothèse n'est que partiellement validée puisque les épinards produits sur TV ont assimilé de plus faibles teneurs en P que ceux de TB mais que ces teneurs étaient comparables à celles des cultures des autres sols d'essai.
Au regard de leurs plus fortes teneurs en anthocyanes, les mâches cultivées sur le témoin, T et TB pourraient souffrir d'un déficit en N et/ou P par rapport à celles cultivées sur TV et TBV.	L'hypothèse est rejetée au regard des teneurs en N et P des cultures.
Avec des teneurs plus élevées en anthocyanes, les pourpiers cultivés sur le sol témoin ont pu souffrir d'une moindre assimilation en N et/ou P par rapport à ceux des 4 modalités expérimentales.	L'hypothèse est validée au regard des teneurs en N des cultures.
Les teneurs en anthocyanes des roquettes suggèrent un probable déficit en N et/ou P des cultures issues du témoin et une moindre assimilation en ces éléments dans les roquettes de T et TV par rapport à celles de TB et TBV.	L'hypothèse est validée au regard des teneurs en N des cultures.

Vert : hypothèse validée, orange : hypothèse partiellement confirmée, rouge : hypothèse rejetée.

Au bilan, au regard des différences de teneurs en éléments majeurs et oligo-éléments entre les cultures, le choix a été fait de questionner les quantités nécessaires au bon développement des cultures, dans le but d'identifier si celles-ci avaient souffert d'un déficit en un ou plusieurs élément(s) au cours de leur développement. Les carences ou déficits peuvent se manifester par l'apparition de symptômes sur le feuillage des cultures ou par des retards de croissance. L'apparition de taches brunes ou la présence de fleurs atrophiées peuvent être les signes d'une carence en calcium. La croissance moins rapide d'une culture peut provenir d'une carence en Cu ou Zn tandis que des phénomènes chlorotiques peuvent survenir lorsque les teneurs en Fe sont insuffisantes pour assurer le développement des cultures (Colomb, 2017). Aucun symptôme n'a été identifié dans le cas des cultures maraîchères de printemps et d'hiver. Ainsi, les différences des teneurs en éléments majeurs

et oligo-éléments des cultures tiennent en la différence de composition des sols, laquelle n'a pas affecté la santé des végétaux. En conclusion, il peut être considéré que les modalités présentent des teneurs en éléments majeurs et oligo-éléments suffisantes pour assurer le bon développement des cultures.

3.4. BILAN

Ce chapitre visait à étudier le potentiel agronomique des Technosols construits avec ou sans inoculation de vers de terre sous deux aspects : la qualité du sol et la qualité des productions, et ce au bout d'un an de mise en place.

L'analyse des paramètres physico-chimiques au sein des couches organo-minérales des quatre modalités a mis en évidence :

- Un pH qui tend à s'acidifier au cours du temps sous l'influence de l'irrigation, des températures saisonnières et des activités biologiques ; des CE relativement stables, influencées par la nature des matériaux parents, la capacité de rétention en eau des Technosols et la température ; des teneurs en CaCO_3 total qui tendent à diminuer et CaCO_3 actif qui tendent à augmenter sous l'effet de l'altération des carbonates et de la libération d'ions en solution ; des teneurs en MO, N total, P_2O_5 , K_2O ainsi qu'un ratio C/N stables ; une CEC qui tend à augmenter ; des teneurs en Na_2O variables régies par l'évolution des matières organiques ; des teneurs en MgO comparables entre les 4 modalités à partir de t_1 ; peu d'évolution des teneurs en CaO ;
- Une influence de la présence de bentonite sur les teneurs en CaCO_3 total et actif (inférieures pour TB et TBV), sur la CEC, les teneurs en Na_2O et CaO (supérieures pour TB et TBV) ; mais aucune influence de la bentonite sur les teneurs en MO, en N total, en P_2O_5 , en K_2O , en MgO sur le ratio C/N ;
- Aucune influence des vers sur l'ensemble des paramètres étudiés entre t_1 et t_3 , excepté sur les teneurs en CaCO_3 total où l'inoculation semble limiter les diminutions observées ;
- À t_3 , après 1 an⁹, des modalités (i) pour lesquelles le pH tend vers la limite haute de la gamme des valeurs guides et des CE en adéquation avec une production maraîchère (sans distinction entre les modalités avec ou sans bentonite), (ii) qui conservent un caractère fortement à très fortement carbonaté avec des teneurs en CaCO_3 actif qui peuvent altérer le développement des cultures, (iii) qui bénéficient d'une teneur en MO satisfaisante pour une production maraîchère, (iv) qui présentent des ratio C/N excédant la limite haute de la gamme de valeurs cibles, des CEC en augmentation et qui, pour les modalités avec bentonite, correspondent à une réserve moyenne à correcte, (v) pour lesquelles les teneurs en P_2O_5 , en K_2O et en MgO excèdent les valeurs guides, ce qui pourrait inhiber/altérer le développement des cultures végétales, et (vi) pour lesquelles les teneurs en CaO s'inscrivent dans la gamme des valeurs cibles.

⁹ Pour certains éléments (i.e. pH, CE, teneurs en MO, C/N, CEC, P_2O_5 assimilable, K_2O , MgO et CaO), les objectifs visaient à atteindre des valeurs guides. L'évaluation de ces paramètres est synthétisée dans le tableau 39.

Tableau 39 : Évaluation des valeurs moyennes des paramètres chimiques des modalités expérimentales à t₃, au regard des objectifs guides et du sol maraîcher témoin.

	T	TV	TB	TBV	Objectifs	Sol témoin
pH	7,63	7,58	7,60	7,53	6,5 – 7,5	7,3
CE (μS cm ⁻¹)	1512	1111	904	939	< 2000	331
MO (g kg ⁻¹)	45	41	40	38	50 – 80	79
C/N	22,6	16,2	14,8	14,1	9 – 12	11,7
CEC (cmol+ kg ⁻¹)	6,70	5,09	9,81	10,34	> 20	25,59
P ₂ O ₅ (g kg ⁻¹)	0,77	0,62	0,58	0,52	> 0,15	0,15
K ₂ O (g kg ⁻¹)	1,05	1,41	1,54	1,49	> 0,16	nd
MgO (g kg ⁻¹)	0,87	1,06	1,01	1,17	0,22 – 0,52	nd
CaO (g kg ⁻¹)	3,00	3,63	3,52	2,60	2,5 – 4,38	nd

T, sans bentonite, TV, sans bentonite avec vers (*L. terrestris*), TB, avec bentonite, TBV avec bentonite et vers (*L. terrestris*), nd, non déterminé. Les couleurs illustrent dans quelle mesure les paramètres ont atteint les objectifs guides (vert foncé, objectif respecté, vert clair, le paramètre tend vers l'objectif fixé mais ne l'a pas atteint, orange clair, le paramètre demeure éloigné de l'objectif guide, orange foncé, le paramètre est très éloigné et ne tend pas vers l'objectif, bleu, le paramètre a atteint l'objectif guide, avec toutefois des valeurs pouvant être excédentaires).

L'analyse des paramètres biologiques au sein des couches organo-minérales des quatre modalités a mis en évidence :

- Une diminution de la respiration basale et de la biomasse moléculaire fongique et une augmentation des activités enzymatiques entre t₀ et t₃ ;
- Une influence de la présence de bentonite qui tend à augmenter la respiration basale et les biomasses moléculaires fongiques, et à favoriser les activités enzymatiques ;
- Aucun effet de la présence de vers sur la respiration basale et les activités enzymatiques, mais une biomasse moléculaire fongique légèrement plus faible ;
- À t₃, après 1 an¹⁰, des modalités pour lesquelles : (i) la respiration basale est inférieure à celle du sol maraîcher témoin et des sols cultivés français, et (ii) les biomasses moléculaires fongiques ainsi que les activités enzymatiques sont proches de celles du sol témoin et des sols cultivés français.

Tableau 40 : Évaluation des valeurs moyennes des paramètres physiques, chimiques et biologiques des modalités expérimentales à t₃, au regard des objectifs guides et du sol maraîcher témoin.

	T	TV	TB	TBV	Objectifs	Sol témoin
Respiration (mg O ₂ kg ⁻¹ j ⁻¹)	125	130	151	156	nd	232
Ergostérols (μg kg ⁻¹)	0,95	0,84	1,83	1,47	nd	1,08
FDA (nmol g ⁻¹ min ⁻¹)	2,41	2,56	3,40	2,86	nd	1,19

T, sans bentonite, TV, sans bentonite avec vers (*L. terrestris*), TB, avec bentonite, TBV avec bentonite et vers (*L. terrestris*), nd, non déterminé. Les couleurs illustrent dans quelle mesure les paramètres ont atteint les objectifs guides (vert, objectif respecté, orange clair, le paramètre demeure éloigné de l'objectif guide).

Au bilan, les évolutions de l'ensemble des paramètres montrent l'initiation de processus pédogénétiques des modalités. Pour quelques paramètres, des tendances se dessinent en faveur des formulations incluant une part de bentonite.

¹⁰ En l'absence de valeurs guides, les paramètres relatifs aux activités biologiques ont été comparés au sol témoin. Les résultats sont synthétisés dans le tableau 40.

L'observation des profils des modalités après un an met en exergue leur aptitude à assurer la production de cultures maraîchères. Les horizons de surface de ces sols sont suffisamment meubles et frais pour assurer la germination des semis ou la reprise de plants repiqués. La compacité des horizons profonds ne représente pas une limite à l'exploration racinaire ou à la circulation des eaux puisque ces derniers étaient frais. Les modalités sont dissociables par leur couleur et texture. Enfin, si l'action des vers n'a pas été prouvée au regard des déterminations analytiques, elle est davantage perceptible à l'observation des profils. La présence des vers semble avoir favorisé la formation de structures qui se différencient par leur forme. Leurs conduits ont certainement favorisé la circulation des eaux d'irrigation. Enfin, leur action de bioturbation est mise en évidence par la différence de couleurs des horizons de surface de T et TB par rapport à TV et TBV. Ces résultats tendent à confirmer l'hypothèse selon laquelle une inoculation volontaire des Technosols construits permettrait d'augmenter le niveau de fonctions rendues.

La mise en culture maraîchère des Technosols a montré leur aptitude à assurer la fonction de support des différentes productions, qu'il s'agisse d'aromates, de légumes feuilles, racines ou fruits. Au cours de l'expérimentation, les cultures d'hiver ont eu tendance à mieux se développer et ont présenté de meilleures biomasses que les cultures de printemps. Dans l'ensemble, pour TB et TBV, les biomasses produites ont souvent été similaires voire supérieures à celles issues du témoin. Pour T et TV, les récoltes plus fluctuantes semblent corrélées à la disponibilité plus faible de certains de leurs nutriments. D'un point de vue physiologique, les cultures issues de T et TV ont très souvent présenté des résultats similaires voire supérieurs aux cultures produites sur le sol témoin. Par ailleurs, la capacité de graines à germer dans les modalités a pu être réévalué lors des deux saisons culturales. Pour les cultures de printemps, les capacités de germination ont été très faibles dans les quatre modalités. Pour les cultures d'hiver, TB et TBV ont présenté un taux de germination comparable à celui du sol témoin alors que les taux de germination de T et TV ont été considérablement plus faibles.

La présence des vers a aussi pu être appréciée à travers l'analyse de la culture de certaines denrées telles que le persil ou les épinards, avec pour le persil, l'obtention de meilleures biomasses dans les modalités inoculées et pour les épinards, de moindres biomasses probablement provoquées par la baisse des activités microbiennes en présence de vers.

L'expérimentation en mésocosmes a finalement permis de confirmer l'ensemble des hypothèses émises en début de chapitre, i.e. que les Technosols présenteraient un niveau de fonctions comparable au sol de référence avec (i) une pédogénèse précoce qui ferait évoluer leurs propriétés au cours du temps, (ii) une fonction de production de biomasse qui réponde

aux attentes de cultures professionnelles cultivées en maraîchage bio-intensif et (iii) des tendances à une meilleure production (quantitative et qualitative) dans les modalités formulées à partir de bentonite. Pour cette dernière hypothèse, les résultats ont permis d'établir un classement des modalités selon leur fonctionnalité en tant que supports pour une activité de micro-maraîchage bio-intensif. Selon ce classement, T présente les fonctionnalités les plus faibles ; en présence de vers, ce Technosol (TV) tend à s'améliorer et à présenter des paramètres et des capacités de support de cultures maraîchères plus proches de TB. Finalement TBV semble représenter la modalité la plus intéressante en termes de potentialités agronomiques.

CHAPITRE 4 : ÉVALUATION DE LA FONCTION D'HABITAT DES TECHNOSOLS CONSTRUITS ET ANALYSE DE LEURS CHAINES TROPHIQUES

La qualité d'un sol pour un usage dépend en partie des fonctions et des services écosystémiques qu'il assure. Pour juger de la qualité des sols maraîchers, il convient d'évaluer leur capacité à assurer les fonctions de support (associé au service de production de biomasses alimentaires), de régulation (i.e. cycle et réserve des nutriments) et d'habitat (i.e. organismes susceptibles d'en améliorer la fertilité par leurs actions). Dans le cadre du chapitre précédent, les Technosols construits ont montré leur aptitude à assurer, pour partie, les fonctions de support de cultures maraîchères de printemps et d'hiver et de réserve en nutriments (i.e. P, Ca, Mg, Na, K).

Ce chapitre porte sur l'évaluation de la fonction d'habitat des Technosols construits pour certains organismes de la faune invertébrée, susceptibles d'en améliorer la fonctionnalité pour un usage en maraîchage. Il présente les organismes de la faune du sol puis leurs classifications et leurs rôles en tant que bioindicateurs¹¹ d'intérêt.

Les questions scientifiques traitées dans le cadre de ce chapitre sont les suivantes : (i) Les couches organo-minérales de surface des modalités d'essai sont-elles en mesure de permettre à différentes catégories d'organismes d'intérêt d'assurer leur fitness ? En d'autres termes, ces couches constituent-elles un lieu d'accueil susceptible de permettre la survie, le maintien et la reproduction de ces organismes ? Ont-elles une fonction d'habitat pour les organismes sélectionnés ? (ii) les organismes de la faune invertébrée sélectionnés pour leur intérêt ont-ils une préférence pour l'une des modalités ? Si oui, quelle en est la raison ? (iii) les couches organo-minérales assurent-elles une fonction d'habitat comparable à celle du sol témoin au regard des organismes retenus ? (iv) l'acquisition de cette fonction est-elle dépendante du temps d'évolution des modalités ? (v) que traduit la chaîne trophique spontanément installée dans le dispositif expérimental en mésocosmes ?

Les expérimentations ont été menées en supposant que (i) les Technosols construits assureraient une fonction d'habitat comparable à celle d'un sol maraîcher naturel cultivé en bio-intensif et (ii) qu'ils seraient colonisés spontanément par des organismes vivants d'intérêt.

¹¹ Un bioindicateur peut se définir comme : « un organisme ou un ensemble d'organismes qui – par référence à des variables biochimiques, cytologiques, physiologiques, éthologiques ou écologiques – permet, de façon pratique et sûre, de caractériser l'état d'un écosystème et de mettre en évidence aussi précocement que possible leurs modifications, naturelles ou provoquées » (Blandin, 1996).

Dans le cadre de la thèse, un bioindicateur est défini comme un organisme (ou une partie d'un organisme ou une communauté d'organismes) qui renseigne sur l'état de fonctionnement d'un écosystème.

4.1. ORGANISMES DE LA FAUNE DU SOL SELECTIONNES POUR EVALUER LA FONCTION D'HABITAT

Parmi les différents systèmes de classification, les organismes de la faune du sol sont souvent différenciés selon leurs niveaux fonctionnels (figure 29). Pour rappel, les principaux groupes sont les ingénieurs de l'écosystème, les décomposeurs et les bio-contrôleurs, lesquels ont été plus amplement présentés au chapitre 1. Il a été notamment montré que les organismes des sols œuvrent à leurs fonctionnalités à différents niveaux hiérarchiques (Kibblewhite *et al.*, 2008 ; Lavelle, 2012) et qu'en raison de leur réponse rapide aux perturbations de leur environnement, certains d'entre eux ont été définis comme bioindicateurs de la qualité des sols (Igalavithana *et al.*, 2017).

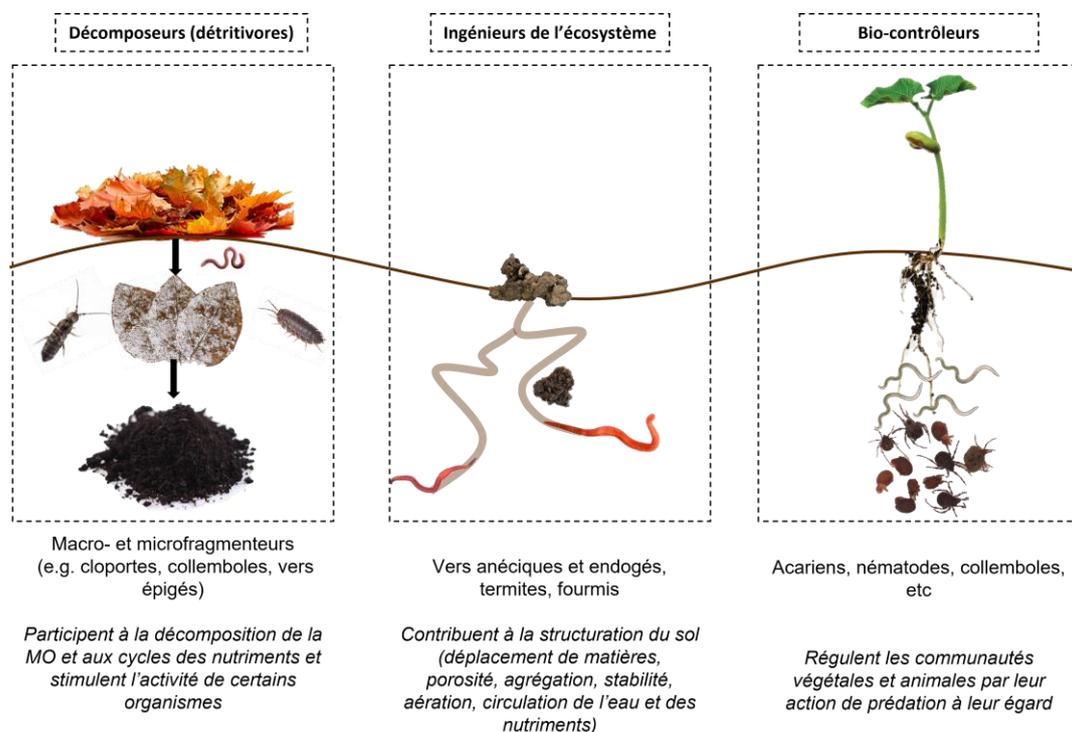


Figure 29 : Les groupes fonctionnels de la faune du sol et leurs rôles

Parmi les bioindicateurs identifiés comme étant les plus pertinents dans le programme Bioindicateurs de l'ADEME figurent les bioindicateurs d'accumulation et ceux d'effet ou d'impact (Bispo *et al.*, 2009). Les bioindicateurs d'accumulation sont des organismes, partie d'organisme ou communauté d'organismes qui accumulent une ou plusieurs substances issues de leur environnement, permettant d'évaluer leur exposition. Ils peuvent notamment reposer sur la bioaccumulation des éléments métalliques par les micromammifères, les teneurs foliaires en polluants dans les communautés végétales (indice Phytomet pour les éléments métalliques) et la somme des excès de transfert à travers les escargots (indicateurs de la biodisponibilité de contaminants sur site). Les bioindicateurs d'effet ou d'impact sont quant à eux des organismes, partie d'un organisme ou communauté d'organismes qui

permettent de révéler des effets spécifiques ou non lors de l'exposition à une ou plusieurs substances issues de leur environnement ou à d'autres stress anthropiques ou naturels. Ils sont classés en trois catégories que sont :

- (i) Les bioindicateurs faunistiques (i.e. vers de terre, nématofaune, microarthropodes du sol et expression génique de la métallothionéine chez les vers de terre),
- (ii) Les bioindicateurs floristiques (i.e. acides gras des végétaux comme outil de diagnostic et de surveillance de la pollution des sols – Oméga 3, fonctionnement de l'appareil photosynthétique des plantes supérieures),
- (iii) Les indicateurs microbiologiques (i.e. activités enzymatiques comme indicateur du fonctionnement biochimique des sols, respirométrie des sols, biomasse moléculaire microbienne, empreinte moléculaire des communautés, diversité taxonomique microbienne comme indicateur de l'état microbiologique du sol, diversité métabolique potentielle et biomasse moléculaire fongique).

L'évaluation de la qualité d'un sol peut être réalisée en combinant des essais sur des bioindicateurs faunistiques subdivisés selon leurs rôles d'une part (ingénieurs de l'écosystème, décomposeurs, bio-contrôleurs) mais aussi selon leur taille d'autre part (macrofaune, mésofaune, microfaune). Parmi ceux-ci peuvent être retenus les vers de terre, les cloportes, les collemboles et les nématodes. Ces bioindicateurs appartiennent en effet aux différents niveaux organisationnels du sol et ont des rôles complémentaires dans son fonctionnement.

Les vers de terre sont réputés pour la rapidité de leur réponse comportementale lorsqu'ils sont exposés à des sols perturbés (contaminés ou dont les propriétés physico-chimiques ne sont pas adaptées à leurs besoins) ou face à la mise en place de nouvelles pratiques agricoles. Les vers de terre se divisent en trois groupes écologiques : anéciques, endogés et épigés lesquels se distinguent par leur fonction au sein du sol. Les vers épigés se concentrent en surface où ils se nourrissent de la litière du sol. Les vers anéciques s'alimentent également de la litière en surface mais creusent des galeries verticales et enfouissent la matière organique qu'ils ingèrent plus profondément dans les sols. Les vers endogés se différencient des premiers par les galeries sub-horizontales à horizontales qu'ils creusent en s'alimentant de la matière organique qu'ils ingèrent en profondeur. Ils ont en effet un mode de vie exclusivement en profondeur des sols (Bouché, 1994). L'étude d'espèces des classes épigées et anéciques permet ainsi d'obtenir des réponses de groupes complémentaires parmi cette catégorie des ingénieurs de l'écosystème et de mieux appréhender la qualité ainsi que la fonctionnalité du système étudié.

La caractérisation et l'analyse des cloportes, qui appartiennent au groupe des décomposeurs et plus particulièrement aux macro-fragmenteurs, permettent également d'apprécier la qualité d'un milieu au regard de ses propriétés. En effet, ces organismes sont particulièrement sensibles aux perturbations de leur environnement (David & Handa, 2010 ; Houghtaling & Kight, 2006 ; Nagy *et al.*, 2018). Par ailleurs, bien qu'ils présentent une tolérance aux métaux lourds qui leur confère le pouvoir de se maintenir en milieu contaminé, ils ne sont pas résistants à l'ensemble des autres sources de contamination et leur mortalité accrue, leur perte de biomasse ainsi que la diminution du nombre d'espèces au sein d'un site étudié sont autant d'indicateurs de son niveau élevé de contamination (Hopkin & Martin, 1984 ; Paoletti & Hassall, 1999).

L'étude des collemboles complète l'analyse des communautés de cloportes. Ils agissent, par leur micro-fragmentation de la matière organique, dans la continuité de la macro-fragmentation opérée par les isopodes terrestres. Il s'agit d'organismes ubiquistes très abondants et dont les espèces se répartissent entre des décomposeurs et des bio-régulateurs puisque certaines d'entre elles s'alimentent de litières alors que d'autres se nourrissent de champignons et bactéries du sol dont elles régulent les communautés. Ces microarthropodes sont également répartis en trois catégories biologiques suivant leur distribution verticale : épi-, hémi- ou eu-édaphiques. Cette répartition dépend de leurs critères morphologiques, anatomiques et écologiques. Les collemboles sont très sensibles aux perturbations de leur environnement, aux contaminants et aux pratiques culturales ; l'étude de leur groupe fonctionnel, de leur abondance, de leur richesse et diversité spécifiques, de leur biomasse, de leur reproduction, de leur survie et de leurs traits fonctionnels¹² permet ainsi d'évaluer la qualité d'un milieu (Santorufu *et al.*, 2014).

Les nématodes sont aussi des organismes d'intérêt puisqu'à l'image des collemboles, il s'agit d'un groupe ubiquiste très abondant dans les sols et sensible aux variations de son milieu (Villeneuve *et al.*, 2013). L'analyse de la nématofaune porte principalement sur la répartition trophique des espèces (phytophages, microbivores, omnivores et carnivores) d'un site et sur la mesure d'indices tels que les indices de structure et d'enrichissement. La confrontation de ces deux indices renseigne sur l'état du micro-réseau trophique du sol en différenciant des grands types de fonctionnement biologique.

Sur la base des différentes catégories de bioindicateurs de la qualité des sols et de leurs rôles au sein de cet écosystème, plusieurs organismes ont été sélectionnés en vue d'évaluer

¹² « Caractéristique morphologique, physiologique, phénologique ou comportementale d'un organisme mesurée à l'échelle des individus, affectant sa performance individuelle et considérée comme pertinente pour rendre compte de la réponse de cet organisme à son environnement ou de leurs effets sur les propriétés écosystémiques » (Pey *et al.*, 2014).

le potentiel des Technosols construits et des modalités d'essai à assurer la fonction d'habitat de communautés à même d'en favoriser la fonctionnalité pour un usage en maraîchage. La démarche expérimentale mise en œuvre pour répondre aux questions est présentée dans la figure 30.

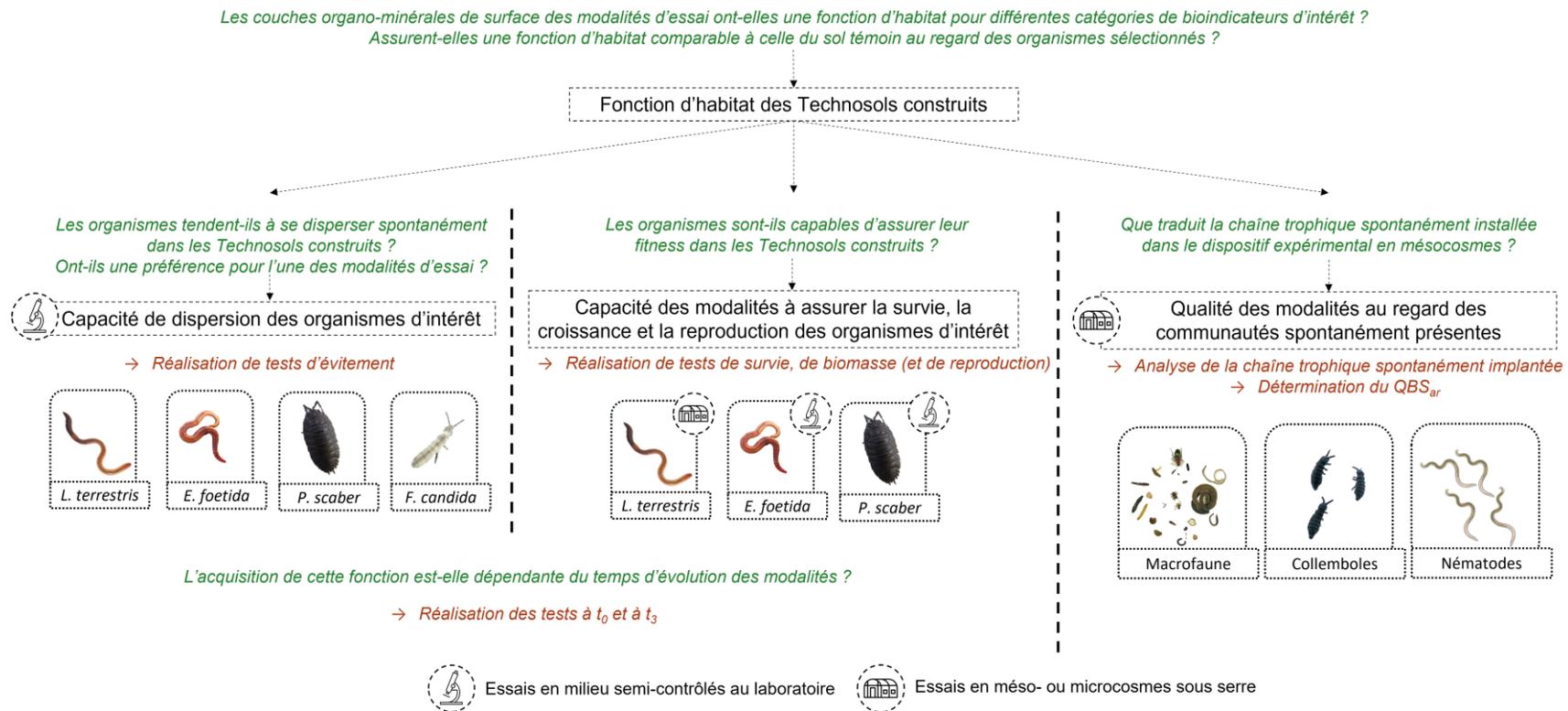


Figure 30 : Méthodologie mise en place pour répondre aux questionnements scientifiques concernant l'étude de la fonction d'habitat des Technosols construits

La démarche a consisté à réaliser des tests d'évitement afin d'observer dans quelle mesure certains organismes de la faune du sol auraient été prompts à coloniser spontanément les Technosols construits si ces derniers avaient été implantés *in situ*. En effet, à leur mise en place, les Technosols construits correspondaient à une juxtaposition de matériaux parents dissociés les uns des autres. Or, ces matériaux ne présentaient vraisemblablement, pour la majorité d'entre eux, qu'une faible proportion d'organismes parmi les multiples niveaux trophiques du sol, dont les activités étaient certainement réduites. Pourtant, l'influence des actions du biote du sol¹³ dans la pédogénèse et les services écosystémiques du sol est connue depuis longtemps (Amundson & Jenny, 1997 ; Singer, 2015). Plus récemment, le rôle des communautés microbiennes, d'organismes de la faune ou encore des racines des végétaux dans la pédogénèse des Technosols a été étudié. Il a notamment été constaté que ces facteurs intervenaient dans la structuration, l'agrégation, la modification de la porosité, l'altération chimique ou encore la régulation des cycles du carbone et de l'azote dans ces sols (Hafeez *et al.*, 2012 ; Jangorzo *et al.*, 2015 ; Jangorzo *et al.*, 2018). Les Technosols peuvent être colonisés rapidement par différents organismes de la faune du sol qui les transforment progressivement en des sols fonctionnels biologiquement actifs (Burrow *et al.*, 2018 ; Joimel *et al.*, 2018 ; Pruvost *et al.*, 2020 ; Vergnes *et al.*, 2017). En conséquence, la colonisation spontanée des Technosols construits par des organismes d'intérêt (pour en améliorer la fonctionnalité) est un processus recherché dans le cadre de cette étude. Les tests d'évitement apportent des éléments de réponse quant à l'acceptation des formulations au regard des organismes sélectionnés. Toutefois, si les animaux évitent certaines modalités, ils sont susceptibles de s'en accommoder et leur inoculation pourrait en améliorer la fonctionnalité. Pour cette raison, en complément des tests d'évitement, des tests de survie ont été réalisés sur certains organismes modèles pour observer leur capacité à assurer leur fitness dans les Technosols après s'y être dispersés. Plus précisément, ces tests visaient à juger de la capacité des organismes à se maintenir dans les habitats proposés ainsi qu'à s'y alimenter et à s'y reproduire. Aucun apport alimentaire n'a donc été effectué au cours de la période d'essai. Ces tests ont finalement traduit la capacité des communautés étudiées à s'implanter dans les milieux de manière durable. Par la suite, une partie des organismes issus d'une colonisation spontanée dans le dispositif en mésocosmes a été observé et l'indice de qualité biologique des sols (QBS), proposé par Parisi (2001) a été déterminé. Pour certains des organismes identifiés comme résultant de la colonisation spontanée des milieux (i.e. collemboles), l'analyse a été complétée par l'étude de huit traits fonctionnels (dépendant des forme et taille du corps, de la présence d'organes visuels et saltatoire, du mode de reproduction, de la pigmentation et de la présence

¹³ Le terme de biote du sol est ici employé comme un synonyme de biodiversité du sol. Il comprend les micro-organismes, la faune du sol ainsi que les végétaux avec lesquels ils sont en interaction dans ou sur le sol ou la pédosphère.

ou absence d'écailles sur le corps). L'étude des traits fonctionnels permet de juger de la capacité des collemboles à assurer leur fitness dans un milieu puisque ces derniers traduisent indirectement la capacité de dispersion, leurs exigences en termes d'habitat et de sources alimentaires ou encore leurs réponses aux différents stress (Joimel *et al.*, 2018 ; Pey *et al.*, 2014 ; Santorufo *et al.*, 2015). Par ailleurs, la différenciation des groupes de nématodes à l'interface de différents niveaux trophiques a permis d'appréhender le fonctionnement biologique des sols.

4.2. METHODOLOGIE

La fonction de support et d'habitat des Technosols T et TB a été étudiée au regard d'organismes modèles afin de déterminer si les formulations organo-minérales créées (i.e. couches supérieures des Technosols) étaient des lieux d'accueil susceptibles d'assurer la survie, le maintien ainsi que la reproduction d'organismes ingénieurs et décomposeurs (macro- et microfragmenteurs) du sol. Plusieurs tests écotoxicologiques ont été adaptés et menés au laboratoire pour répondre à ces interrogations.

4.2.1. Tests d'évitement

Dès leur mise en place (t_0), il a été envisagé que les propriétés des Technosols construits évolueraient au cours de l'année expérimentale. De ce fait, les tests ont été réalisés à t_0 pour appréhender la colonisation spontanée des Technosols dès leur mise en place, mais également à t_3 après une évolution d'un an.

La fonction d'habitat des formulations organo-minérales a été examinée en respectant le protocole établi dans les normes ISO 17512-1 et 17512-2. Cette méthode consiste en un ensemble d'essais biologiques de dépistage rapide. Ceux-ci s'appuient sur la caractérisation du comportement d'une espèce de vers couramment utilisée en écotoxicologie. Il s'agit de *Eisenia foetida*, espèce reconnue pour sa praticité de manipulation (i.e. facilité d'approvisionnement et robustesse). Bien que cette espèce ne soit pas la plus appropriée sur le plan écologique (car peu présente dans les sols), ces vers de compost constituent un matériel biologique particulièrement adapté aux essais en laboratoire et sont très documentés. *Eisenia foetida*, avec *Eisenia andrei* forment des organismes modèles pour évaluer les effets de substances chimiques sur les invertébrés saprotrophes terrestres (Spurgeon *et al.*, 2003). En ce sens, de nombreuses recherches ont été effectuées à son sujet, notamment sur des paramètres tels que la croissance, la reproduction et le comportement d'évitement (Auclerc *et al.*, 2011 ; Hund-Rinke *et al.*, 2002 ; Owojori & Reinecke, 2009 ; Pescatore *et al.*, 2021).

Outre *E. foetida*, trois autres espèces ont été sélectionnées pour la réalisation de ce test. Le choix a porté sur la complémentarité de leurs rôles dans les sols et sur leur répartition au sein du système de classification de la faune du sol (établi selon la taille des organismes). Il s'agit de : (i) *Lumbricus terrestris* (ingénieur de l'écosystème) retenu pour sa mixité de groupe (épigé et anécique) lui conférant un intérêt double et sa présence en milieu anthropisé ; (ii) *Porcellio scaber*, macro fragmenteur largement répandu en milieu urbain et dont l'utilisation est également très courante pour ce type de test ; et (iii) *Folsomia candida*, micro-décomposeur hémi-édaphique souvent observé dans les zones anthropisées (Joimel *et al.*, 2017) et bioindicateur fréquemment utilisé pour évaluer la qualité des sols en raison de sa praticité de manipulation en laboratoire (reproduction par parthénogénèse assurant une multiplication facile et rapide des individus). Quels que soient l'organisme utilisé, le principe du test a été identique ; néanmoins le matériel, le nombre de réplicats ainsi que l'environnement ont été adaptés (figure 31). Les tests ont visé à comparer les formulations organo-minérales entre elles mais aussi, à des matériaux de référence. Ainsi, pour chaque organisme, ont été confrontés les formulations organo-minérales (couche travaillée) des modalités d'essai ainsi que le sol témoin de la ferme de Veolia à un sol artificiel standard (ISO 11268-1). Le sol artificiel correspond à un mélange (exprimé en pourcentage de masse sèche) de 10 % de tourbe blonde de sphaigne, 20 % d'argile kaolinique et 70 % de sable de Fontainebleau.

Les vers de l'espèce *E. foetida* ont été obtenus auprès de l'élevage de la ferme du Moutta tandis que les vers de l'espèce *Lumbricus terrestris* ont été achetés auprès du magasin Terres et Eaux (distributeur commercial d'articles de chasse, pêche et équitation). Les cloportes de l'espèce *Porcellio scaber* ont été prélevés au sein de la forêt domaniale de Phalempin tandis que les collemboles ont été obtenus auprès du muséum national d'histoire naturelle de Paris. Les organismes ont été conditionnés dans des substrats (terreau pour les vers, litières prélevées en forêt pour les cloportes et sable pour les collemboles) pendant 10 jours avant de procéder à la réalisation des différents tests.

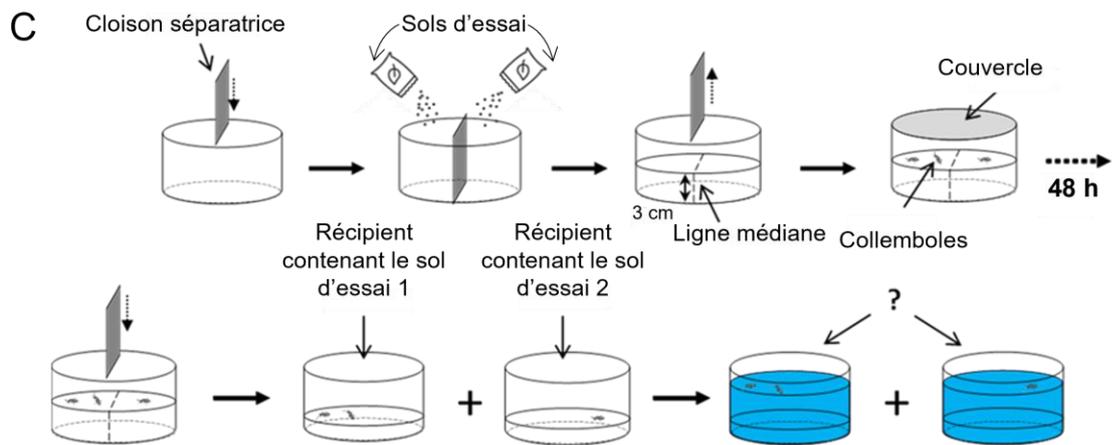
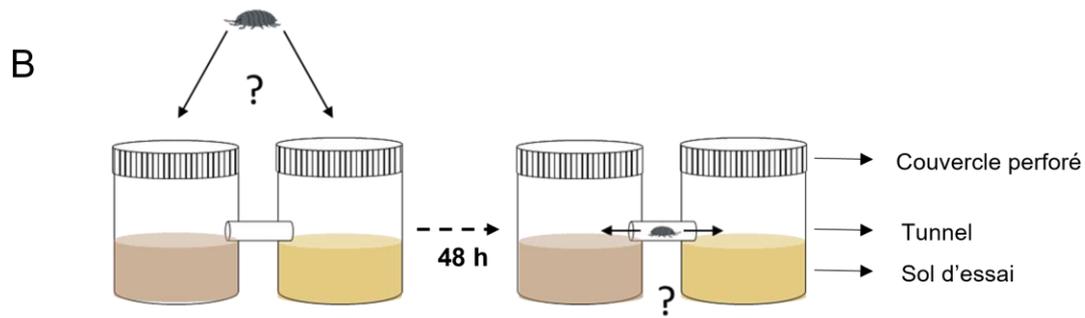
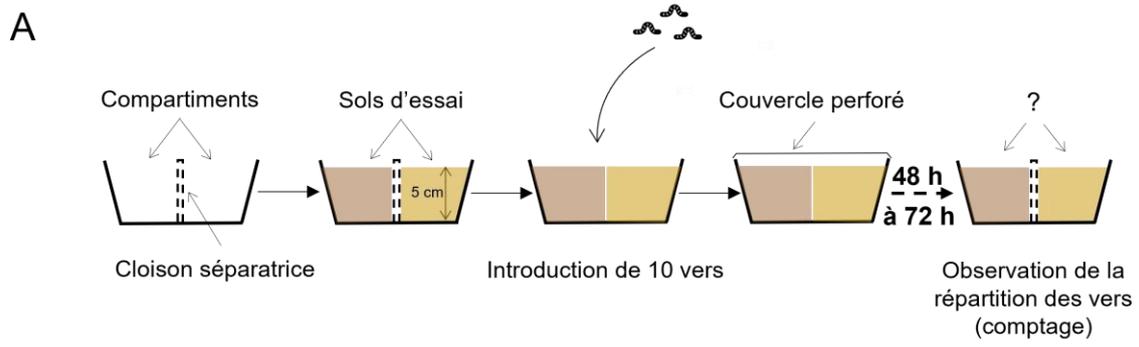


Figure 31 : Schéma des protocoles expérimentaux réalisés sur (A) *L. terrestris* et *E. foetida* (ingénieurs de l'écosystème), (B) *P. scaber* (décomposeur macro-fragmenteur) et (C) *F. candida* (décomposeur micro-fragmenteur)

Pour *E. foetida*, trois réplicats ont été réalisés. Des barquettes plastiques d'une contenance de 2 L, recouvertes d'un papier aluminium pour maintenir les sols testés (T et TB à t_0 , T, TV, TB et TBV à t_3 , le sol maraîcher témoin et le sol standard ISO) à l'obscurité ont été utilisées comme récipients d'essai. De part et d'autre du récipient, le long d'une cloison séparatrice, ont été introduits deux substrats (sol artificiel standard et sols soumis à essai) préalablement humectés à 60 % de leur capacité maximale de rétention en eau sur une hauteur de 5 cm. Après retrait de la cloison séparatrice, 10 organismes adultes de masse individuelle comprise entre 300 et 600 mg ont été introduits au niveau du point de contact - le long de la ligne médiane - des deux substrats soumis à essai. La fente créée par la cloison constitue en effet un chemin préférentiel pour l'enfouissement des vers dans les substrats (figure 31A ; figure 32). Les récipients d'essai ont alors été placés 48 h dans une enceinte climatique maintenue à une température de 20°C ($\pm 2^\circ\text{C}$) et sous une source lumineuse de 800 lux d'intensité avec une photopériode 16 h / 8 h. Après ce laps de temps, les substrats ont été séparés et les vers de terre dénombrés selon les deux substrats testés.

Le protocole expérimental relatif à *L. terrestris* a été légèrement adapté. Ont notamment été modifiés la période d'exposition ainsi que les conditions environnementales de l'enceinte climatique sur la base des recommandations de l'annexe C de la norme ISO 17512-1. Trois réplicats de 10 individus de masse individuelle comprise entre 3 et 10 g ont été placés dans une chambre à une température constante de 18°C ($\pm 2^\circ\text{C}$) pour une période de 72 h. Le reste du déroulement de l'expérimentation a été identique au protocole défini pour *E. foetida* (figure 31A ; figure 32).

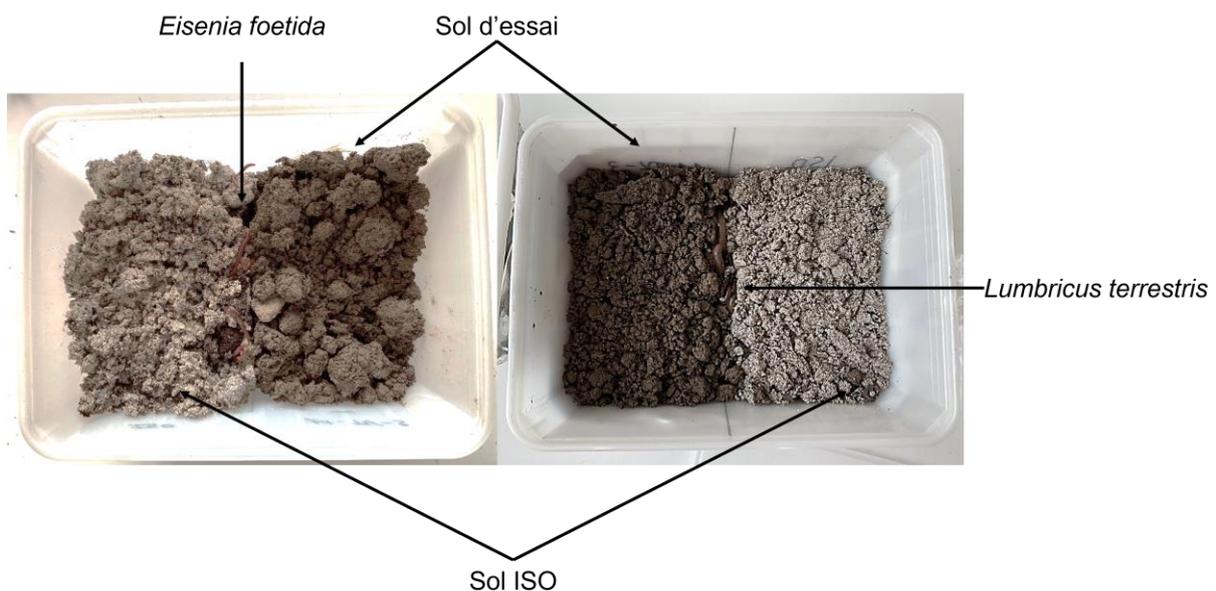


Figure 32 : Photographies des tests d'évitement réalisés sur les vers

Au regard du test normé, la méthode appliquée sur *P. scaber* a aussi été révisée (figure 31B). Le comportement grégaire de ces cloportes peut engendrer un biais expérimental. De ce fait, les tests ont été réalisés sur des individus isolés en multipliant les répétitions. Les tests ont été réalisés en 12 réplicats à t_0 (sur T, TB, le sol témoin et le sol standard ISO) puis en 10 réplicats à t_3 (sur T, TV, TB, TBV, le sol témoin et le sol standard ISO). Par ailleurs, la vivacité des cloportes a nécessité une adaptation du matériel pour modérer leurs possibilités de fuite à l'origine d'une altération et d'une mauvaise interprétation lors de l'observation finale. Ainsi, le dispositif expérimental a consisté en deux pots plastiques (d'une capacité de 0,2 L ; 6 cm de diamètre), munis de couvercles perforés et reliés l'un à l'autre par un tube suffisamment large pour permettre aux organismes de passer d'un récipient à l'autre (Zidar *et al.*, 2019). 30 g de substrats (sol témoin et sols soumis à essai) ont été incorporés de manière à atteindre la base du tube assurant la connexion entre les deux récipients. Les organismes ont été placés aléatoirement au sein des récipients d'essai. L'ensemble a ensuite été disposé 48 h dans une enceinte climatique maintenue à une température de 22°C ($\pm 1^\circ\text{C}$), une humidité relative de 40 % et une obscurité constante. La répartition des individus a été observée à l'issue des 2 jours d'expérimentation (figure 33).



Figure 33 : Photographies du dispositif expérimental mis en place pour la réalisation des tests d'évitement sur *P. scaber*

Les tests d'évitement conduits sur *F. candida* ont été assez similaires à ceux réalisés sur *E. foetida* et ont été réalisés conformément à la norme ISO 17512-2 (figure 31C). Ils ont été effectués dans des récipients cylindriques de 300 mL de contenance, dont la section représente une surface de 50 cm². Les substrats testés (T et TB à t_0 , T, TV, TB et TBV à t_3 , le sol maraîcher témoin et le sol standard ISO) ont préalablement été humectés pour atteindre 60 % de leur capacité maximale de rétention en eau et ont été ajoutés pour atteindre une épaisseur de 4 cm. 20 individus ont ensuite été inoculés dans chaque récipient au moyen d'un aspirateur à collemboles. Pour pallier les effets latéraux de la lumière, les contenants ont été enveloppés dans un film d'aluminium. Tous ont été recouverts d'un couvercle perforé puis scellés à l'aide de ruban adhésif pour empêcher la fuite des individus inoculés. Comme pour *E. foetida*, les réplicats ont été placés 48 h dans une enceinte climatique maintenue à une température de 20°C ($\pm 2^\circ\text{C}$) avec une luminosité de 800 lux pour un cycle photopériodique de 16 h / 8 h. À l'issue des deux jours d'incubation, les sols ont été séparés à l'aide de la cloison séparatrice et

les sols d'essais ont été transférés dans de nouveaux récipients. Par la suite, les collemboles ont été dénombrés après avoir inondé les substrats et ajouté quelques gouttes d'encre. Seuls les organismes flottant à la surface de l'eau ont été pris en compte, les individus manquants ont été considérés comme des organismes morts (figure 34).

À l'issue des tests, le taux d'évitement a été calculé à l'aide de la formule suivante :

$$x = \left(\frac{n_t - n_e}{N} \right) \times 100$$

Où x est l'évitement exprimé en pourcentage, n_t est le nombre d'organismes dans le sol de référence (sol ISO), n_e est le nombre d'organismes dans le sol soumis à essai (T, TV, TB, TBV ou sol maraîcher témoin) et N est le nombre total d'organismes. Si plus de 80 % des individus ont été trouvés dans le sol de référence (ISO), la fonction d'habitat du substrat d'essai a été considérée comme limitée. Par ailleurs, l'essai a été considéré comme invalide si le nombre d'individus morts ou manquants par modalité excédait 10 %.

Pour *E. foetida* et *L. terrestris*, n_t , n_e et N correspondaient au nombre d'organismes par récipient d'essai (soit $N = 10$) ;

Pour *P. scaber*, n_t , n_e et N correspondaient au nombre d'organismes parmi l'ensemble des réplicats ;

Pour *F. candida*, n_t , n_e et N correspondaient au nombre d'organismes par récipient d'essai (soit $N = 20$).

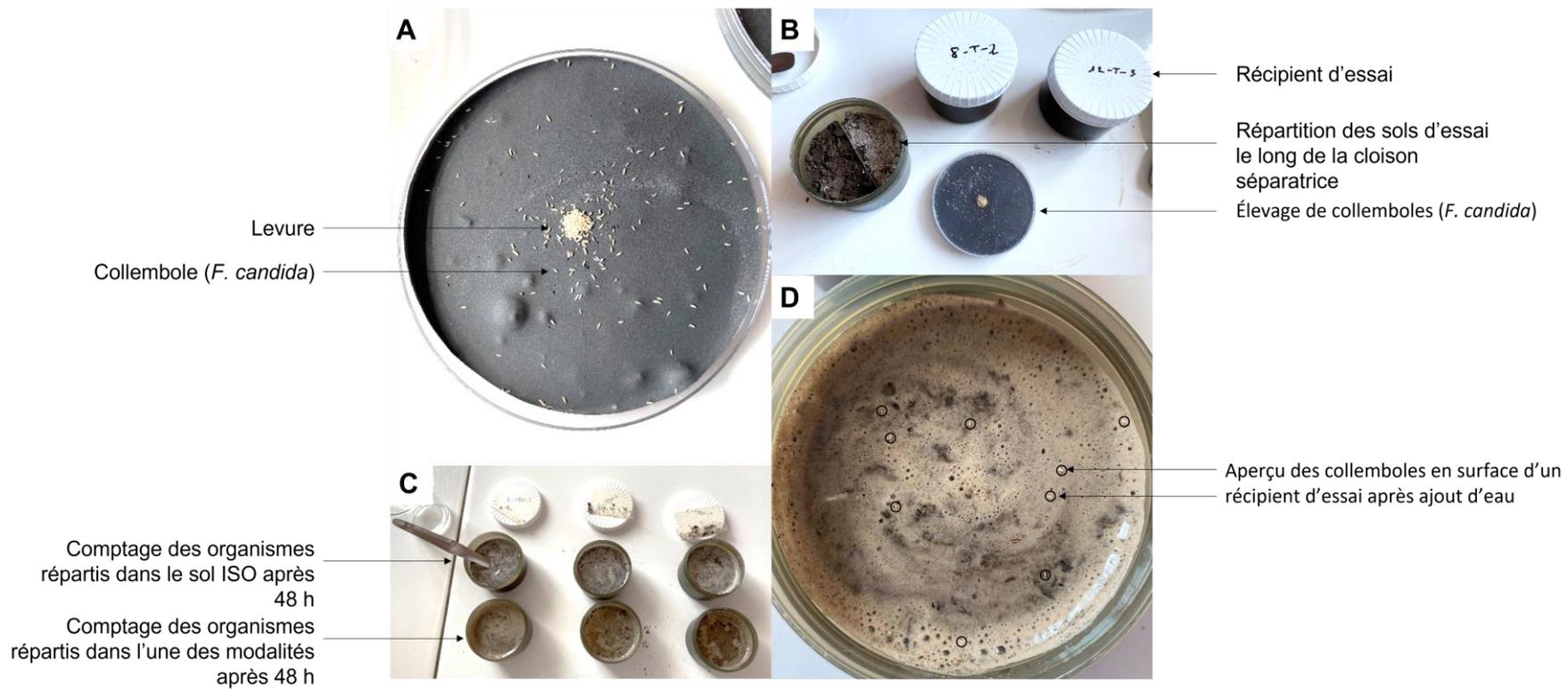


Figure 34 : Photographies des différentes étapes respectées pour la réalisation des tests d'évitement sur *F. candida*. (A) Élevage synchrone pour l'obtention d'organismes de même maturité, (B) mise en place du dispositif expérimental, (C) dénombrement des organismes à l'issue des 48 heures d'essai, (D) aperçu des organismes en surface d'un sol d'essai après sa submersion dans l'eau

4.2.2. Tests de survie

Des tests de survie ont été réalisés sur *E. foetida* et *P. scaber* en laboratoire et sur *L. terrestris* au sein des microcosmes (cf. figure 30). Les tests de survie ont porté sur les formulations organo-minérales des modalités pour *E. foetida* et *P. scaber* et les résultats ont été confrontés au sol témoin (cultivé par Veolia) ainsi qu'au sol artificiel standard (ISO). Pour *L. terrestris*, les tests ont été menés sur l'ensemble des profils (formulations de profondeur et de surface) et seules les modalités ont été comparées entre elles pour des raisons pratiques (impossibilité d'excaver le sol maraîcher cultivé pour le disposer en microcosme) et économiques (le coût des matières constitutives du sol standard aurait été trop élevé pour l'implanter en triplicats en microcosmes).

4.2.2.1. Essais en laboratoire

Pour *E. foetida*, les normes NF ISO 11268-1¹⁴ et 11268-2¹⁵ ont été utilisées pour réaliser les tests de survie, mais également des tests de biomasse et de reproduction sur une période de 8 semaines (14 jours pour les tests de survie et de biomasse auxquels ont été ajoutés 42 jours pour les tests de reproduction). Les tests (figure 35) ont été conduits à la mise en place des Technosols (t_0) sur les deux formulations initiales (T et TB, qui n'étaient à cette date respectivement pas dissociées de TV et TBV) ainsi que sur l'horizon travaillé du sol témoin cultivé par Veolia et sur le sol standard de référence (ISO) puis de nouveau après une évolution d'un an (à t_3) sur les formulations organo-minérales des 4 modalités d'essai (T, TV, TB et TBV). Chaque modalité a fait l'objet de 3 réplicats. 600 g de sol d'essai ont été introduits dans des récipients chimiquement inertes d'une capacité d'un litre sur une hauteur de 6 cm. Contrairement aux préconisations des normes, les sols d'essai n'ont pas été tamisés à 4 mm, ceci en vue de tester les Technosols tels qu'ils se seraient présentés aux organismes s'ils avaient été implantés en conditions *in situ*. Les sols ont été humectés à 60 % de leur capacité au champ avec de l'eau osmosée puis 10 vers adultes (âgés d'au moins 3 mois et possédant un clitellum et dont la masse humide était comprise entre 300 et 600 mg) ont été introduits dans les récipients d'essai après avoir été lavés à l'eau potable. Les groupes étaient constitués d'individus homogènes (en taille et en masse). Les vers étaient issus d'un élevage synchrone (i.e. de structure d'âge relativement homogène). Ils avaient été conditionnés dans du terreau avant leur inoculation pour limiter les biais expérimentaux. Une fois inoculés, les récipients

¹⁴ Cette norme porte sur la détermination de la toxicité aiguë de contaminants du sol et de produits chimiques par absorption cutanée et ingestion. Elle convient néanmoins à l'étude de sols et matériaux de type sol de qualité inconnue (tels que des sites contaminés, des sols amendés ou après remédiation ou encore des sols agricoles ou autres sites d'intérêt et de déchets).

¹⁵ Cette norme s'inscrit dans la continuité de la première et porte sur la détermination des effets de la matrice étudiée sur la reproduction de *Eisenia foetida*.

ont été enveloppés sur leur pourtour avec du film aluminium afin que les rayons incidents des faisceaux lumineux ne soient dirigés qu'à la surface des sols. Les dispositifs ont été fermés à l'aide de couvercles perforés de sorte à permettre les échanges gazeux entre les milieux et l'atmosphère et le passage de la lumière tout en empêchant la fuite des organismes au cours de l'essai. Les récipients ont ensuite été disposés dans une enceinte climatique programmée à 20 ± 2 °C avec une photopériode de 16h de lumière (d'une intensité lumineuse de 800 lux) et 8h de nuit. Ils ont aussi fait l'objet d'une pesée quotidienne de sorte à maintenir un taux d'humidité constant de 60 % de la CAC. Après 7 jours, le nombre de vers vivants a été relevé et les vers morts ont été ôtés. Après 14 jours, les vers vivants ont de nouveau été dénombrés et ont été pesés de sorte à déterminer le taux de mortalité ainsi que la prise ou perte de masse.

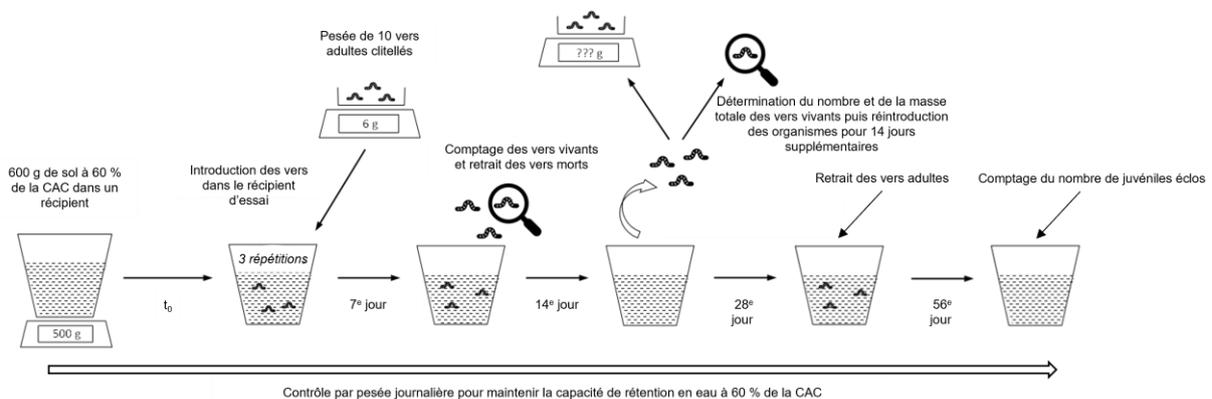


Figure 35 : Représentation schématique des différentes étapes des tests de survie, de biomasse et de reproduction menés sur *E. foetida*

Pour évaluer la capacité de reproduction des vers dans les sols, après avoir été dénombrés au quatorzième jour, les organismes ont été réintroduits dans les substrats dont ils étaient issus pour 14 jours supplémentaires. Après 28 jours, les individus ont été ôtés et seuls les sols ont été laissés dans l'enceinte climatique pour une durée supplémentaire de 28 jours. À l'issue de cette phase d'incubation (i.e. 56 jours), le nombre de jeunes éclos a été relevé.

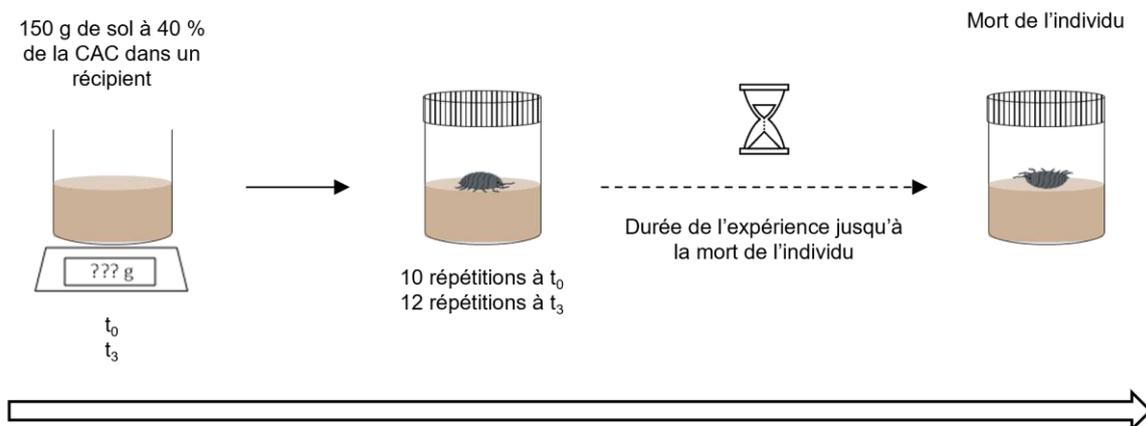
Le taux de mortalité des vers a été exprimé à l'aide de la formule suivante :

$$x = \left(\frac{n_m}{N} \right) \times 100$$

Où x est la mortalité exprimée en pourcentage, n_m est le nombre d'organismes morts dans le sol d'essai et N est le nombre total d'organismes dans le sol d'essai (10 dans le cas de cette expérience). La première partie de l'essai (test de survie et de biomasse) a été considérée comme invalide si le pourcentage de mortalité dans le témoin excédait 10 % et si la perte de biomasse des organismes du témoin était supérieure à 20 %. En complément, la seconde partie de l'essai (test de reproduction) a été considérée invalide si le nombre de

jeunes éclos issu du sol témoin était inférieur à 30, si le coefficient de variation pour la reproduction dans le témoin était supérieur à 30 %.

Pour *Porcellio scaber*, les tests de survie (figure 36) se sont appuyés sur les conditions d'élevage décrites par Godet (2010) et sur les modalités expérimentales de Škarková *et al.* (2016). Comme pour les tests d'évitement, les tests de survie ont été menés sur des individus isolés. Les tests ont été réalisés en 12 réplicats à t_0 (sur T, TB, le sol témoin et le sol standard ISO) puis en 10 réplicats à t_3 (sur T, TV, TB, TBV, le sol témoin et le sol standard ISO). Le protocole a consisté à introduire 150 g de substrat d'essai humecté à 40 % de sa CAC (avec de l'eau bidistillée) dans un récipient cylindrique d'une capacité de 250 mL. Un individu par réplicat a ensuite été inoculé puis le récipient a été fermé hermétiquement avec un couvercle préalablement perforé de sorte à permettre les échanges gazeux entre le milieu et l'atmosphère. Le dispositif a ensuite été placé en conditions contrôlées pour maintenir une photopériode de 16h de jour et 8h de nuit et une température constante de $20 \pm 2^\circ\text{C}$. L'humidité des substrats a été contrôlée par pesée journalière et réajustée si nécessaire. Chaque récipient a fait l'objet d'un suivi régulier de sorte à déterminer la durée de survie de chaque individu selon les substrats d'essai.



Contrôle de l'humidité du substrat par pesée journalière et réajustement à 40 % de la CAC si nécessaire
Figure 36 : Représentation schématique des différentes étapes des tests de survie réalisés sur *P. scaber*

4.2.2.2. Essais en microcosmes

En raison de leur cycle de vie plus long (jusqu'à 7 à 8 ans en laboratoire) (Lakhani & Satchell, 1970), les tests de survie ont été adaptés pour *Lumbricus terrestris*. Ces tests ont été combinés au test réalisé en microcosmes dans le chapitre 3 qui visait à évaluer l'influence des vers sur l'amélioration de la stabilité structurale des Technosols construits. Pour rappel, à t_1 , après une phase de maturation des formulations de 11 semaines, 5 individus adultes (munis d'un clitellum) ont été inoculés dans les microcosmes (figure 37 ; cylindres PVC ; r : 15 cm, H : 60 cm, préalablement remplis avec les deux formulations constitutives des Technosols (T et TB), sur une épaisseur de 30 cm chacune et humectées pour atteindre 60 % de leur CAC à t_0).

5 nouveaux organismes ont été introduits à t_2 . Les dispositifs ont été arrosés régulièrement de sorte à maintenir le taux d'humidité constant.



Figure 37 : Photographie de deux microcosmes utilisés pour l'expérimentation en serre

De la même manière que pour les essais en laboratoire, les vers n'ont pas été nourris lors de l'expérimentation. Ils ont été laissés dans la serre expérimentale pour une durée de 6 mois puis les microcosmes ont été ouverts de sorte à dénombrer les vers vivants, les cocons et les juvéniles au terme de l'essai. La survie du ver a été testée dans les modalités TV et TBV. Chaque modalité a fait l'objet de 3 réplicats.

Le taux de mortalité a été exprimé à l'aide de la formule suivante :

$$x = \left(\frac{n_m}{N} \right) \times 100$$

Où x est la mortalité exprimée en pourcentage, n_m est le nombre d'organismes morts dans le sol d'essai et N est le nombre total d'organismes dans le sol d'essai (10 dans le cas de cette expérience).

4.2.3. Colonisation spontanée des Technosols construits

Les déterminations analytiques ont été réalisées à la fin de l'expérimentation en mésocosmes (une semaine avant t_3 , de sorte à minimiser les perturbations environnementales – en lien avec les récoltes – susceptibles d'entraîner la fuite des organismes) et ont porté sur l'analyse de la macrofaune, de microarthropodes de la mésofaune (collemboles) et des nématodes. La détermination des groupes éco-

morphologiques des collemboles associée à l'étude de leurs traits fonctionnels¹⁶ permettent d'affiner les interprétations en examinant les relations entre les organismes et leurs rôles au sein du sol et en évaluant le degré de perturbation du milieu. La macrofaune et la nématofaune des mésocosmes et du sol témoin ont été identifiées tandis que la caractérisation des collemboles a porté exclusivement sur les modalités en mésocosmes.

4.2.3.1. Prélèvements et échantillonnages

La macrofaune a été prélevée à l'aide de pièges Barber (Barber, 1931 ; figure 38). Un piège a été disposé aléatoirement par mésocosme (soit 3 réplicats par modalité testées), et trois pièges ont été mis en place dans la placette expérimentale cultivée du sol témoin (3 réplicats également). Ces pièges consistent en des récipients cylindriques en plastique d'un volume de 90 mL (H : 62 mm, D : 58 mm) – dans lesquels a été introduit de l'éthylène-glycol – enterrés afin que le haut des dispositifs se situe dans la continuité de la surface du sol pour piéger l'ensemble des organismes mobiles s'y déplaçant. Les pièges ont été récupérés après 7 jours et la macrofaune a été transférée dans de l'éthanol à 70 % pour assurer sa conservation avant détermination.

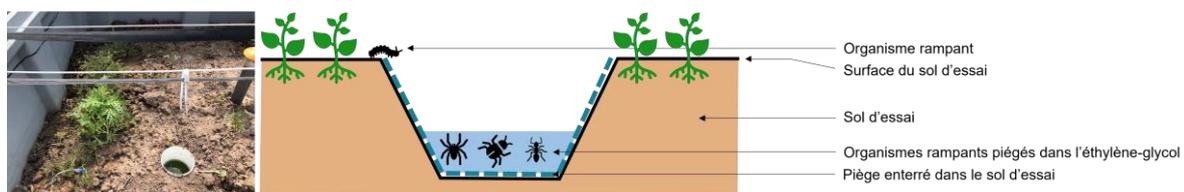


Figure 38 : Dispositif mis en place pour le prélèvement de la macrofaune au sein des mésocosmes

L'échantillonnage des collemboles a été effectué au moyen de carottiers cylindriques en PVC (H : 5 cm, D : 6 cm). Un échantillon composite de cinq prélèvements élémentaires a été réalisé dans chaque mésocosme. Au total, 3 réplicats ont été obtenus pour chacune des modalités (T, TV, TB et TBV). Les échantillons ont été conservés au frais (4°C dans un réfrigérateur) avant analyse.

Pour la nématofaune, un échantillon composite de 5 prélèvements élémentaires (dans l'horizon 0-15 cm) a été effectué dans chaque mésocosme et en triplicats dans le sol témoin, en vue d'obtenir environ 500 g de terre. Les échantillons ont été envoyés à ELISOL Environnement pour analyse.

¹⁶ Trait morphologique, métabolique et phénologique ou ayant un impact indirect sur la fitness d'un individu via ses effets sur la croissance, la reproduction et la survie (Violle *et al.*, 2007)

4.2.3.2. Déterminations analytiques

La caractérisation de la macrofaune a consisté à observer les taxons¹⁷ à l'aide d'une loupe binoculaire et à les dénombrer et les classer par ordre (e.g. coléoptères, hyménoptères, chilopodes, diplopodes). La caractérisation des différents taxons de la macrofaune a permis de leur attribuer un score EMI (Indice éco-morphologique) variant de 1 à 20 selon les groupes considérés (Parisi *et al.*, 2005 ; tableau 41). La somme des scores des taxons piégés dans un échantillon correspond à l'indice QBS-ar (indice d'évaluation de la qualité biologique d'un sol basé sur les arthropodes qui en sont issus). Proposé par Parisi (2001), cet indice se fonde sur la diversité de microarthropodes observée dans un sol pour en estimer le degré de vulnérabilité. Il renseigne ainsi sur la qualité biologique des sols étudiés. Plus la valeur de cet indice est élevée, meilleure est la qualité du sol d'essai (Parisi *et al.*, 2005).

Tableau 41 : Indices éco-morphologiques (scores EMI) des groupes de microarthropodes édaphiques (Parisi *et al.*, 2005)

Groupe	Score EMI
Protozoaires	20
Diploures	20
Collembolés	1 – 20
Microcoryphia	10
Zygentomes	10
Dermaptères	1
Orthoptères	1 – 20
Embioptères	10
Blattes	5
Psocoptères	1
Hemiptères	1 – 10
Thysanoptères	1
Coléoptères	1 – 20
Hyménoptères	1 – 5
Diptères (larves)	10
Autres insectes holométaboles (larves)	10
Autres insectes holométaboles (adultes)	1
Acaréens	20
Araignées	1 – 5
Opilions	10
Palpigrades	20
Pseudo scorpions	20
Isopodes	10
Chilopodes	10 – 20
Diplopodes	10 – 20
Paupodes	20
Symphyles	20

L'extraction des collembolés a consisté à disposer les échantillons prélevés dans un piège de type Berlese-Tullgren. Plus spécifiquement, la méthode a consisté à déposer l'ensemble de l'échantillon sur un tamis de maille 2 mm préalablement disposé dans un entonnoir. Le dispositif contenant l'échantillon de sol a été placé sous une lampe émettant lumière et chaleur et au-dessus d'un récipient contenant de l'alcool à 70 % (destiné à la conservation des organismes) (figure 39). Le but du dispositif était de pousser les organismes

¹⁷ Unité taxinomique (telle qu'une famille, un genre, une espèce) (Dictionnaire Le Petit Robert).

à fuir la source émettrice de lumière et de chaleur et à migrer vers le récipient contenant de l'éthanol. L'ensemble a été laissé jusqu'à ce que le sol soit sec (soit une période d'environ 7 jours).



Figure 39 : Photographie du dispositif permettant l'extraction de la mésofaune

Après extraction, les collemboles ont été observés à la loupe binoculaire. Les organismes ont été comptés et regroupés par morphotype¹⁸. Les différents morphotypes des collemboles ont ensuite été identifiés à l'espèce au moyen de la clé de détermination d'Hopkin (2007) et d'un stéréo-microscope de recherche à épifluorescence (NIKON SMZ18). Selon les espèces identifiées, les collemboles issus de la colonisation spontanée des Technosols construits ont pu être classés parmi les trois groupes éco-morphologiques relatifs à leur distribution verticale au sein de l'habitat et de leurs caractéristiques morphologiques. Les déterminations analytiques centrées sur les collemboles ont permis de calculer les indices suivants :

- La diversité spécifique ou taxonomique (S), laquelle traduit le nombre d'espèces présentes dans un milieu,
- L'abondance (D), laquelle représente le nombre total d'individus (tout taxon ou espèce confondus) observé par modalité testée,
- La densité (D') équivalente au nombre d'individus observés par m².

Les nématodes ont été identifiés par famille mais également selon leurs groupes fonctionnels déterminés au moyen de leurs comportements alimentaires (i.e. les nématodes

¹⁸ (*Anatomie, Anthropologie*) Ensemble des caractéristiques physiques qui définissent un individu grâce à la génétique (Dictionnaire médical).

libres qui regroupent les nématodes bactérivores, fongivores, omnivores-prédateurs, et les nématodes phytophages qui rassemblent les nématodes phytoparasites et phytophages facultatifs). À partir de l'analyse de diversité nématofaunique, plusieurs indices complémentaires à ceux des collemboles (i.e. S, D et D') ont également été mesurés pour les nématodes. Il s'agit plus particulièrement de :

- L'indice d'enrichissement (EI), lequel illustre la disponibilité des éléments nutritifs (et sur l'activité des décomposeurs primaires) dont la valeur se situe entre 0 et 100 et augmente avec la disponibilité en nutriments (en particulier de l'azote),
- L'indice de structure (SI) dont la valeur varie aussi de 0 à 100 et qui renseigne sur la stabilité du milieu en s'appuyant sur l'analyse de la structure du réseau trophique du sol. Plus la valeur de cet indice est élevée, plus la chaîne trophique est complexe et moins le milieu est perturbé,
- L'indice de maturité (MI), lequel renseigne la maturité ainsi que la stabilité du milieu en tenant compte des nématodes libres. Comme les indicateurs précédents, plus la valeur du MI est élevée, plus la stabilité du milieu est importante,
- L'indice des voies de décomposition de la MO (IVD) qui examine la voie dominante de décomposition de la MO (bactérienne ou fongique) et dont la valeur s'inscrit entre 0 et 100. En milieu agricole, l'objectif est d'atteindre un état d'équilibre entre ces deux voies de décomposition,
- L'indice de diversité de Shannon (H'), lequel peut varier de 0 à 5 (sans toutefois qu'un maximum théorique ne lui ait été attribué). Cet indice a été calculé à partir de l'équation suivante : $H' = -\sum_{i=1}^S P_i \log_2 P_i$ où i correspond à l'une des espèces du milieu et P_i à l'abondance de l'espèce i par rapport au nombre total d'espèces (S) identifiées au sein du milieu considéré.

4.2.4. Tests statistiques

Les analyses statistiques ont été réalisées à l'aide du logiciel XLSTAT. Pour chaque variable, la moyenne et l'écart-type ont été mesurés grâce aux répétitions expérimentales (à l'exception des tests d'évitement menés sur les cloportes dont les réponses étaient de type binaire selon la présence ou l'absence des individus isolés dans chacun des dispositifs).

Pour les tests d'évitement, les réponses des organismes ont été regroupées dans différents tableaux de contingence puis le test exact de Fisher a été employé pour analyser les différences de répartition des organismes en fonction des substrats d'essai. L'évolution des fonctions d'habitats des modalités (entre t_0 et t_3) a également été observée au moyen de ce test.

Pour comprendre le comportement d'évitement des organismes, des tests de statistiques exploratoires ont été réalisés. Les données de répartition des organismes ont été confrontées aux paramètres physiques, chimiques et biologiques des sols d'essai à l'aide d'analyses en composantes principales. En raison des réponses comportementales binaires mesurées sur les cloportes (présence ou absence des organismes dans les récipients d'essai), ces tests n'ont pu être menés sur cet organisme.

De la même manière que pour les tests d'évitement, les données de survie collectées sur les vers (*Eisenia foetida* et *Lumbricus terrestris*) ont été regroupées au sein de différents tableaux de contingence et analysées au moyen du test exact de Fisher.

Le protocole expérimental des analyses sur *Porcellio scaber* ayant été adapté, l'analyse statistique de la survie des cloportes a porté sur la comparaison de leurs courbes de survie à l'aide du test de Kaplan-Meier. Ce test a été employé pour la comparaison des courbes à t_0 et à t_3 et pour analyser l'évolution de la survie des cloportes entre t_0 et t_3 .

Pour comprendre la cinétique d'évolution de la survie des organismes, les mêmes tests de statistiques exploratoires que pour les tests d'évitement ont été appliqués sur les données de survie.

La nature des sols, leur historique et leur conditions expérimentales n'étant pas les mêmes, les analyses relatives à la colonisation spontanée des modalités d'essais n'ont pas inclus le sol maraîcher témoin. Celui-ci a toutefois servi de référence pour établir des interprétations des résultats d'essais.

Les comparaisons du nombre de taxons, de la densité, du score QBS de la macrofaune, de la diversité spécifique et de l'abondance des collemboles entre modalités ont été réalisées au moyen d'ANOVA et de tests post-hoc de Tukey après avoir vérifié que les conditions d'application du test étaient respectées.

Pour déterminer l'effet des facteurs bentonite et présence de vers ainsi que l'influence de la combinaison de ces deux facteurs sur les différents paramètres de la nématofaune, des analyses ANOVA à 2 facteurs ont été réalisées. Pour comparer les 4 modalités d'essai (T, TV, TB et TBV), des ANOVA à 1 facteur ont été réalisées. Quand cela était nécessaire, les données ont été transformées ($\log(x+1)$ ou \sqrt{x}) et des analyses post-hoc ont été réalisées (test de student, correction de Bonferroni, p -value < 0,05). Lorsque les conditions d'une analyse ANOVA n'étaient pas réunies, un test non-paramétrique a été réalisé (test de Kruskal-Wallis, p -value < 0,05).

4.3. ÉVALUATION DE LA FONCTION D'HABITAT DES TECHNOSOLS CONSTRUITS

L'analyse de la fonction d'habitat des Technosols construits a consisté à évaluer la capacité des organismes sélectionnés à se disperser, ainsi qu'à assurer leur fitness. Enfin, la qualité des Technosols pour un usage en maraîchage a été évaluée au regard des communautés faunistiques capables de coloniser spontanément les mésocosmes.

4.3.1. Évaluation de la capacité des organismes d'intérêt à se disperser

Le tableau 42 présente la répartition des organismes de la faune du sol étudiés (i.e. *Eisenia foetida*, *Lumbricus terrestris*, *Porcellio scaber* et *Folsomia candida*) lors des tests d'évitement réalisés sur les Technosols à leur mise en place (à t_0).

Tableau 42 : Proportion d'organismes présents dans les sols d'essai à leur confrontation au sol ISO lors des tests d'évitement réalisés à t_0 et taux d'évitement des sols d'essai associés

	t_0		Témoin
	T	TB	
<i>E. foetida</i>	Proportion d'organismes présents : $15 \pm 9\%$ (b) Taux d'évitement : 70 %	Proportion d'organismes présents : $13 \pm 13\%$ (b) Taux d'évitement : 73 %	Proportion d'organismes présents : $85 \pm 9\%$ (a) Taux d'évitement : 0 %
<i>L. terrestris</i>	Proportion d'organismes présents : $8 \pm 1\%$ (b) Taux d'évitement : 83 %	Proportion d'organismes présents : $10 \pm 1\%$ (b) Taux d'évitement : 80 %	Proportion d'organismes présents : $67 \pm 1\%$ (a) Taux d'évitement : 0 %
<i>P. scaber</i>	Proportion d'organismes présents : $58 \pm 1\%$ (b) Taux d'évitement : 0 %	Proportion d'organismes présents : $100 \pm 0\%$ (a) Taux d'évitement : 0 %	Proportion d'organismes présents : $75 \pm 0\%$ (ab) Taux d'évitement : 0 %
<i>F. candida</i>	Proportion d'organismes présents : $52 \pm 2\%$ (b) Taux d'évitement : 0 %	Proportion d'organismes présents : $77 \pm 3\%$ (a) Taux d'évitement : 0 %	Proportion d'organismes présents : $82 \pm 1\%$ (a) Taux d'évitement : 0 %

T, sans bentonite, TB, avec bentonite, Témoin, le sol maraîcher témoin cultivé par Veolia. Les lettres indiquent une différence significative entre la répartition des organismes dans les sols d'essai. Le code couleur vise à identifier plus rapidement les réponses des organismes aux différents sols d'essai (vert : bonne fonction d'habitat du sol d'essai par rapport à l'organisme ; rouge : fonction d'habitat limitée).

- **À la mise en place des Technosols (t_0) :**

À leur mise en place (t_0), les deux Technosols construits (T et TB) ont présenté une fonction d'habitat limitée¹⁹ pour les ingénieurs de l'écosystème au regard des réponses d'évitement des vers *E. foetida* et *L. terrestris*. T et TB n'ont pas différencié significativement entre eux mais ont présenté une fonction d'habitat significativement inférieure à celle du sol témoin (sol maraîcher cultivé par Veolia). Comme les vers épigés (*Eisenia foetida*), les vers épi-anéciques (*Lumbricus terrestris*) ont montré un comportement d'évitement net des Technosols construits à leur mise en place (t_0). De nouveau, avec une distribution moyenne de plus de 80 % des vers dans le sol de référence (ISO), les deux Technosols construits ont présenté une fonction d'habitat limitée dès leur implantation. Les fonctions d'habitat des deux

¹⁹ La fonction d'habitat d'un sol d'essai est considérée comme limitée lorsque plus de 80 % des organismes se répartissent dans le sol ISO à sa confrontation avec le sol d'essai.

Technosols n'ont pas différencié significativement à t_0 , en revanche elles étaient toutes deux significativement inférieures à celle du sol témoin.

Contrairement aux ingénieurs de l'écosystème, les décomposeurs n'ont pas présenté le même comportement d'évitement envers les Technosols construits à t_0 . À la confrontation de ces derniers et du sol maraîcher témoin face au sol standard (ISO), les cloportes macro-fragmenteurs (*P. scaber*) se sont répartis à 58 % dans T, à 100 % dans TB et à 75 % dans le sol témoin. Les taux d'évitement des substrats d'essai ont été mesurés à t_0 à partir des données de distribution des organismes. Quel que soit le sol considéré, le taux d'évitement a systématiquement été nul avec une tendance préférentielle des organismes à se diriger vers les sols testés plutôt que vers le sol standard de référence (ISO). Au regard des tests statistiques, à t_0 , les fonctions d'habitat des Technosols construits pour les cloportes étaient comparables à celle du sol maraîcher témoin. À t_0 , les décomposeurs microfragmenteurs (les collembolles d'espèce *F. candida*) n'ont évité aucun des sols d'essai (T, TB et le sol maraîcher témoin). Les tests statistiques n'ont pas mis en évidence de différence significative entre la répartition des organismes dans TB et le sol témoin, en revanche, ils ont montré une proportion significativement plus faible d'organismes dans T.

- **Après l'initiation de premiers processus pédogénétiques (en un an) à t_3 :**

Rappelons qu'après 3 mois, les Technosols ont été différenciés en plusieurs modalités selon leur inoculation en vers. Ainsi, à t_3 , 4 modalités ont été testées (T, TV, TB et TBV). Pour mesurer l'évolution de leur fonction d'habitat, les résultats de T et TV à t_3 ont été comparés à ceux de T à t_0 et les résultats de TB et TBV à t_3 ont été confrontés à ceux de TB à t_0 .

Le tableau 43 présente la répartition des organismes de la faune du sol étudiés (i.e. *Eisenia foetida*, *Lumbricus terrestris*, *Porcellio scaber* et *Folsomia candida*) lors des tests d'évitement réalisés sur les Technosols après un an (à t_3), suite à l'initiation des premiers processus pédogénétiques.

À t_3 , les comportements d'évitement des ingénieurs de l'écosystème ont été différents. Pour *E. foetida*, la répartition des organismes dans TV, TB et TBV a augmenté significativement. L'évolution de la répartition des organismes dans T entre t_0 et t_3 suit la même tendance sans qu'elle ne soit significative. Entre t_0 et t_3 , la proportion de vers épigés qui se sont dispersés dans les sols d'essai (plutôt que dans le sol ISO) à l'issue du test d'évitement a augmenté de 12 % pour T, 38 % dans TV et de 54 % dans TB et TBV. Les taux d'évitement moyens des modalités à t_3 ont été de 43 % pour T et de 0 % pour les autres modalités d'essai. D'après les analyses statistiques, après un an, la fonction d'habitat de TB et TBV est comparable à celle du sol maraîcher témoin. La fonction d'habitat de TV à t_3 est

comparable à celle de TB et TBV à t₃ mais demeure inférieure à celle du témoin. Enfin, la fonction d'habitat de T à t₃ est comparable à celle de TV à t₃ mais également à celle de T et TB à t₀. Ces résultats montrent que la fonction d'habitat des modalités a évolué rapidement et de manière positive entre t₀ et t₃.

Tableau 43 : Proportion d'organismes présents dans les sols d'essai à leur confrontation au sol ISO lors des tests d'évitement réalisés à t₃ et taux d'évitement des sols d'essai associés

	t ₃				Témoin
	T	TV	TB	TBV	
<i>E. foetida</i>	Proportion d'organismes présents : 27 ± 1 % (c) Taux d'évitement : 43 % ↗	Proportion d'organismes présents : 53 ± 4 % (bc) Taux d'évitement : 0 % ↗*	Proportion d'organismes présents : 67 ± 1 % (ab) Taux d'évitement : 0 % ↗*	Proportion d'organismes présents : 67 ± 1 % (ab) Taux d'évitement : 0 % ↗*	Proportion d'organismes présents : 85 ± 9 % (a) Taux d'évitement : 0 %
<i>L. terrestris</i>	Proportion d'organismes présents : 7 ± 0 % (d) Taux d'évitement : 83 % =	Proportion d'organismes présents : 18 ± 1 % (cd) Taux d'évitement : 63 % ↗	Proportion d'organismes présents : 30 ± 2 % (c) Taux d'évitement : 40 % ↗	Proportion d'organismes présents : 37 ± 3 % (b) Taux d'évitement : 27 % ↗*	Proportion d'organismes présents : 67 ± 1 % (a) Taux d'évitement : 0 %
<i>P. scaber</i>	Proportion d'organismes présents : 58 ± 1 % (a) Taux d'évitement : 0 % =	Proportion d'organismes présents : 75 ± 0 % (a) Taux d'évitement : 0 % ↗	Proportion d'organismes présents : 50 ± 1 % (a) Taux d'évitement : 0 % ↘*	Proportion d'organismes présents : 58 ± 1 % (a) Taux d'évitement : 0 % ↘*	Proportion d'organismes présents : 75 ± 0 % (a) Taux d'évitement : 0 %
<i>F. candida</i>	Proportion d'organismes présents : 78 ± 2 % (b) Taux d'évitement : 0 % ↗*	Proportion d'organismes présents : 62 ± 4 % (b) Taux d'évitement : 0 % ↗	Proportion d'organismes présents : 97 ± 1 % (a) Taux d'évitement : 0 % ↗*	Proportion d'organismes présents : 68 ± 2 % (b) Taux d'évitement : 0 % ↘	Proportion d'organismes présents : 82 ± 1 % (a) Taux d'évitement : 0 %

T, sans bentonite, TV, sans bentonite avec vers (*L. terrestris*), TB, avec bentonite, TBV, avec bentonite avec vers (*L. terrestris*), Témoin, le sol maraîcher témoin cultivé par Veolia. Les lettres indiquent une différence significative entre la répartition des organismes dans les sols d'essai. Le code couleur vise à identifier plus rapidement les réponses des organismes aux différents sols d'essai (vert : bonne fonction d'habitat du sol d'essai par rapport à l'organisme ; orange : faible fonction d'habitat du sol d'essai au regard de l'organisme ; rouge : fonction d'habitat limitée). ↗, ↘ ou = indiquent des tendances évolutives entre les réponses des organismes à t₀ et t₃, * met en évidence une évolution significative entre les réponses des organismes à t₀ et t₃.

Les résultats des tests sur le ver épi-anécique diffèrent considérablement puisqu'à t₃, les vers d'espèce *L. terrestris* ont évité T à 83 %, TV à 63 %, TB à 40 % et TBV à 27 %. Bien que ces moyennes soient éloignées des taux d'évitement moyens à t₀ (de 83 % pour T et 80 % pour TB), l'importance des écarts-types de cette expérimentation en laboratoire n'a pas permis de mettre en évidence de différence significative entre les comportements d'évitement des vers à t₀ et à t₃ à l'exception de la modalité TBV dont la fonction d'habitat s'est améliorée (sans toutefois qu'elle ne soit comparable à celle du sol maraîcher témoin). À t₃, TBV a présenté la fonction d'habitat la plus élevée parmi les quatre modalités. TB et TV ont présenté des fonctions d'habitat inférieures à celle de TBV mais comparables entre elles au regard des tests statistiques. Les fonctions d'habitat de TV et TB à t₃ étaient similaires à celles de T et TB à t₀.

Finalement, à t_3 , seul T a présenté une fonction d'habitat inférieure à celle évaluée à t_0 . Pour T (à t_3), cette fonction était comparable à celles de T et TB à t_0 et de TV à t_3 . Quel que soit le pas de temps considéré, les Technosols construits ont présenté depuis leur mise à place jusqu'à leur évolution d'un an une fonction d'habitat significativement inférieure à celle du sol témoin au regard des tests comportementaux réalisés sur l'ingénieur *L. terrestris*. Il semble toutefois que malgré la réticence des organismes d'essai à explorer les Technosols construits par rapport au sol témoin, ces derniers aient privilégié la prospection des formulations élaborées à partir de bentonite et inoculées avec des vers.

Comme à t_0 , à t_3 le comportement d'évitement des décomposeurs à l'égard des modalités est resté différent de celui des ingénieurs. Pour *P. scaber*, les taux d'évitement des modalités sont demeurés inchangés avec des valeurs nulles pour l'ensemble des modalités (T, TV, TB et TBV). Ces résultats montrent que les cloportes n'évitent aucune des modalités. Entre t_0 et t_3 , la fonction d'habitat des modalités élaborées à partir de bentonite (TB et TBV) a diminué significativement. Ce n'est pas le cas pour les Technosols exempts de bentonite (T et TV) qui ont présenté des fonctions d'habitat respectivement similaires pour T à celle qu'il présentait à t_0 et légèrement supérieures pour TV par rapport à t_0 . À t_3 , les fonctions d'habitat des Technosols construits sont toutefois restées similaires à celle du sol maraîcher témoin.

De la même manière, comme à t_0 , à t_3 , les collemboles (*F. candida*) n'ont pas évité les modalités (avec des taux d'évitement de T, TV, TB et TBV qui sont restés nuls). Si les capacités des modalités à attirer les organismes ont toutes évoluées, ces évolutions n'ont été significatives que pour T et TB au sein desquels la proportion d'organismes ayant privilégié le sol d'essai a augmenté entre t_0 et t_3 . À t_3 , le nombre d'organismes observé dans TB est resté comparable à celui du témoin. Bien que la capacité de T à supporter les collemboles se soit améliorée entre t_0 et t_3 , elle demeure inférieure à celle du sol témoin à l'issue de l'expérimentation (t_3). La distribution moyenne des organismes dans TV à t_3 a été légèrement plus élevée qu'à t_0 , sans que cette différence ne soit significative. À l'inverse, la proportion d'organismes retrouvés dans TBV à t_3 a été inférieure à celle retrouvée dans TB à t_0 , sans toutefois que cette diminution ne soit significative. À t_3 , seul TB présente une proportion d'organismes significativement supérieure à celle des autres Technosols, lesquels présentent tous une aptitude comparable (entre eux) à attirer les collemboles après un an d'évolution.

Les résultats ont montré qu'à leur mise en place, les Technosols risquaient de ne pas être immédiatement explorés par des ingénieurs épigés et épi-anéciques susceptibles, entre autres, d'initier divers processus en lien avec la décomposition de la matière organique et la structuration des Technosols. Ils témoignent néanmoins de la rapidité d'évolution des Technosols construits et de leur potentielle colonisation après une année évolutive.

4.3.2. Évaluation de la survie, du maintien et de la reproduction des organismes d'intérêt étudiés dans les Technosols construits

Les tests d'évitement ont été complétés, pour une partie des organismes (i.e. *E. foetida*, *P. scaber* et *L. terrestris*), par des tests de survie. Ces tests ont consisté à observer la capacité des organismes d'intérêt à assurer leur fitness dans les sols d'essai. Selon les organismes, les tests ont reposé sur la détermination de leur taux de mortalité ou sur leur taux moyen de survie dans les sols, sur leur prise de masse et sur l'évaluation de leur reproduction. Pour rappel, les essais relatifs à *E. foetida* et *P. scaber*, ont été menés au laboratoire tandis que les essais sur *L. terrestris* ont été réalisés en micro- et mésocosmes.

- **À la mise en place des Technosols (t₀) :**

Les résultats des tests de survie, de biomasse et de reproduction menés sur l'ingénieur de l'écosystème *E. foetida* à t₀ sont présentés dans le tableau 44. À t₀, le taux de mortalité des vers a été de 100 % après 14 jours dans les deux Technosols construits alors qu'il a été de 0 % dans le sol maraîcher témoin et de 0 % dans le sol standard ISO. Ce taux de mortalité a d'ailleurs été atteint dès 7 jours au sein des deux Technosols construits. Par conséquent, à leur mise en place, les Technosols construits ont présenté une fonction d'habitat nulle pour les vers, laquelle présentait nécessairement une différence significative avec celle du sol maraîcher témoin. Les variations de biomasses et la reproduction de l'ingénieur *E. foetida* n'ont donc pu être analysées dans T et TB à t₀.

Tableau 44 : Paramètres suivis dans l'analyse de la survie, de la biomasse et de la reproduction de *Eisenia foetida* dans les différentes modalités d'essai à t₀

	t ₀					
	14 jours			28 jours		
	T (TV)	TB (TBV)	Témoin	T (TV)	TB (TBV)	Témoin
Nombre de vers vivants	0 ± 0 (b)	0 ± 0 (b)	10 ± 0 (a)	0 ± 0 (b)	0 ± 0 (b)	10 ± 0 (a)
Taux de mortalité (%)	100 (a)	100 (a)	0 ± 0 (b)	nd	nd	nd
Biomasse moyenne des vers vivants (g)	nd	nd	4,49 ± 0,18	nd	nd	5,36 ± 0,31
Biomasse moyenne d'un ver (g)	nd	nd	0,45 ± 0,02	nd	nd	0,54 ± 0,03

Moyenne ± ET ; T, sans bentonite, TV, sans bentonite avec vers (*L. terrestris*), TB, avec bentonite, TBV, avec bentonite et vers (*L. terrestris*). Les lettres indiquent une différence significative entre les Technosols au regard d'un paramètre

La survie des cloportes a été analysée au regard de leur temps moyen de survie dans les sols d'essais. Les résultats de l'expérimentation sont présentés dans le tableau 45. Contrairement aux vers épigés, dès t₀, les cloportes ont présenté un temps de survie moyen comparable dans les Technosols construits et dans le sol maraîcher témoin.

Tableau 45 : Temps moyen de survie des cloportes dans les Technosols à t_0 et dans le sol témoin

	Témoin	t_0	
		T	TB
Temps moyen de survie (jours)	19 ± 3 (a)	15 ± 2 (a)	20 ± 3 (a)

Moyenne ± ET ; T, sans bentonite, TB, avec bentonite. Les lettres indiquent une différence significative entre le temps moyen de survie des cloportes dans les Technosols à t_0 et dans le sol maraîcher témoin

L'aptitude de *L. terrestris* à assurer sa fitness dans les Technosols (T et TB) a été évaluée dans les micro- et mésocosmes. Le tableau 46 regroupe les données relatives à la mortalité et à la reproduction des organismes en micro- et mésocosmes. Précisons que pour les essais en microcosmes, il ne peut être considéré que les analyses correspondent à un pas de temps précis tels que ceux mentionnés pour les essais en mésocosmes (i.e. t_0 et t_3) puisque pour cette expérimentation, les Technosols (en microcosmes) n'ont pas été cultivés et n'ont évolué que sous l'action de bioturbation des vers et sous les effets de l'eau d'irrigation (cf. figure 30). Cette expérimentation illustre ainsi davantage la capacité des vers de l'espèce *Lumbricus terrestris* à se maintenir dans le temps (6 mois) au sein des Technosols.

Tableau 46 : Taux de mortalité et capacité reproductrice des vers de l'espèce *Lumbricus terrestris* dans les Technosols construits selon leur disposition en mésocosmes ou microcosmes

	T	TB
Taux de mortalité mésocosmes (%)	98 ± 3 (a)*	83 ± 12 (b)*
Taux de mortalité microcosmes (%)	57 ± 12	53 ± 12
Nombre moyen de juvéniles par mésocosme	4 ± 7	4 ± 2
Nombre moyen de juvéniles par microcosme	2 ± 1	2 ± 1

Moyenne ± ET ; T, sans bentonite, TB, avec bentonite. Les lettres indiquent une différence significative entre les taux de mortalité des vers dans les Technosols selon l'expérimentation menée en méso- ou microcosme. Le signe * montre une différence significative dans les taux de mortalité des vers observés selon la réalisation de l'expérimentation de survie dans les méso- ou microcosmes

Après 6 mois, les taux de mortalité des vers ont différencié significativement selon leur implantation en micro- ou mésocosmes, avec des taux de mortalité très élevés dans les mésocosmes (> 80 %) et importants en microcosmes (> 50 %) pour les deux Technosols. Les essais menés en mésocosmes ont mis en évidence une différence significative entre les taux de mortalité des vers selon le Technosol dans lequel ils avaient été implantés, avec une mortalité significativement plus importante dans T que dans TB. Ces essais comportent néanmoins des limites qui ne permettent pas d'établir d'association entre la mortalité des organismes et les paramètres des Technosols construits. En effet, les conditions environnementales lors de la première inoculation (conditions particulièrement chaudes dans la serre expérimentale avec la température ambiante la plus élevée enregistrée à 49,8°C) ont engendré la mort des individus (retrouvés secs en surface dès le lendemain de l'inoculation). Dans la mesure où les résultats du tableau 46 tiennent compte de la part d'individus morts à cette période, il est impossible de connaître la véritable proportion d'individus dont la mort résulte des paramètres des Technosols.

- **Après l'initiation de premiers processus pédogénétiques (en un an) à t₃ :**

Le tableau 47 présente les paramètres suivis dans l'analyse de la survie, de la biomasse et de la reproduction de *Eisenia foetida* pour les différentes modalités à t₃.

Les tests ont mis en évidence un taux de mortalité de *E. foetida* significativement plus faible dans les modalités à t₃ qu'à t₀. À t₃, la mortalité des organismes dans TB et TBV était comparable à celle du sol maraîcher témoin. Malgré l'absence de différence significative entre T, TV, TB et TBV, les taux de mortalité de T et TV étaient quand même significativement supérieurs à celui du sol maraîcher témoin.

Tableau 47 : Paramètres suivis dans l'analyse de la survie, de la biomasse et de la reproduction de *Eisenia foetida* dans les différentes modalités d'essai à t₃

	t ₃									
	14 jours					28 jours				
	T	TV	TB	TBV	Témoin	T	TV	TB	TBV	Témoin
Nombre de vers vivants	8 ± 1	8 ± 1	9 ± 0	9 ± 1	10 ± 0	8 ± 1	7 ± 1	9 ± 1	7 ± 0	10 ± 0
Taux de mortalité (%)	23 ± 6 (b)	23 ± 6 (b)	10 ± 0 (ab)	10 ± 10 (ab)	0 ± 0 (a)	nd	nd	nd	nd	nd
Biomasse moyenne des vers vivants (g)	1,47 ± 0,52	2,00 ± 0,84	1,57 ± 0,40	1,60 ± 0,07	4,49 ± 0,18	1,42 ± 0,68	2,06 ± 0,87	1,47 ± 0,48	1,09 ± 0,24	5,36 ± 0,31
Biomasse moyenne d'un ver (g)	0,19 ± 0,07	0,26 ± 0,10	0,17 ± 0,04	0,18 ± 0,02	0,45 ± 0,02	0,19 ± 0,08	0,28 ± 0,10	0,17 ± 0,05	0,16 ± 0,03	0,54 ± 0,03

Moyenne ± ET ; T, sans bentonite, TV, sans bentonite avec vers (*L. terrestris*), TB, avec bentonite, TBV, avec bentonite et vers (*L. terrestris*). Les lettres indiquent une différence significative entre les Technosols au regard d'un paramètre

La réalisation de ces tests a également permis d'évaluer la croissance des vers au moyen de l'analyse de leur biomasse (tableau 47). Les données de biomasse ont été pondérées par le nombre de vers et ont permis de déterminer les variations de biomasse des vers selon les sols d'essai (T, TV, TB, TBV et le témoin). Les variations ont été en moyenne de - 4 ± 25 % dans T, + 12 ± 43 % dans TV, - 13 ± 5 % dans TB et - 10 ± 7 % dans TBV à t₃ en 28 jours. Les variations de biomasse dans le sol maraîcher témoin ont été de + 48 ± 6 % sur le même espace de temps. En raison de l'importance des écarts-types, les tests statistiques n'ont pas mis en évidence de différence significative entre les variations de biomasse des vers selon les substrats d'essai. Au regard de ces résultats, il semble néanmoins que les vers aient eu tendance à prendre de la biomasse (et donc à s'alimenter) uniquement dans le sol témoin. Ces résultats pourraient indiquer une moindre attractivité des MO des Technosols par rapport à celles du sol témoin.

La reproduction des organismes dans les sols d'essai a également été évaluée ; néanmoins, aucun cocon ou juvénile n'a été observé à l'issue des 56 jours d'expérimentation.

Concernant les résultats obtenus sur le décomposeur *P. scaber*, les temps de survie moyens dans les 4 modalités (T, TV, TB et TBV) ont été significativement plus importants que dans les Technosols à t₀ et dans le sol témoin avec des valeurs moyennes de 48 ± 7 jours dans

T à t_3 , 45 ± 10 jours dans TV à t_3 , 71 ± 9 jours dans TB à t_3 , 66 ± 10 jours dans TBV à t_3 , 15 ± 2 jours dans T à t_0 , 20 ± 3 jours dans TB à t_0 et 19 ± 3 jours dans le témoin (figure 40).

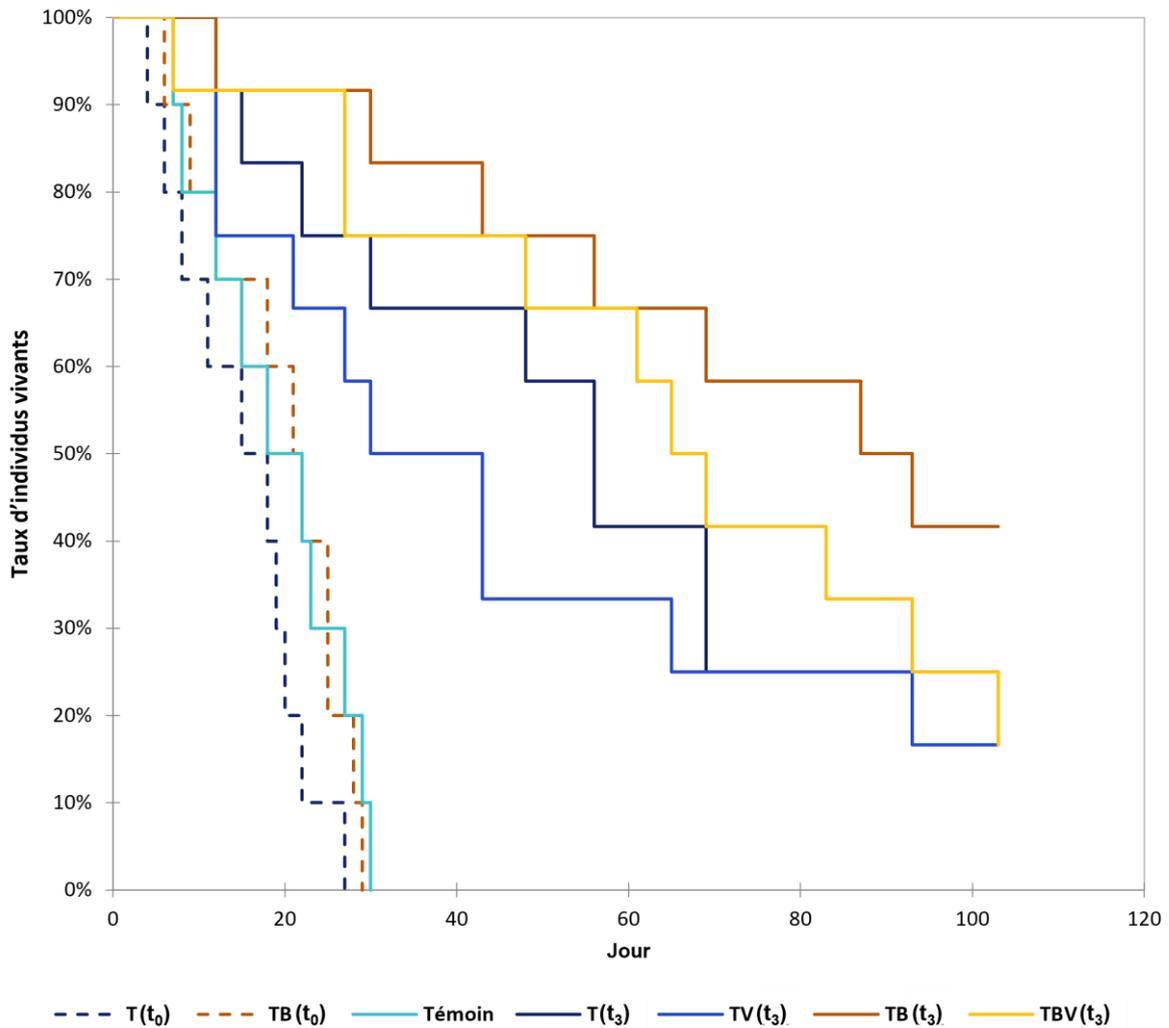


Figure 40 : Courbes de survie des cloportes à t_0 et à t_3 selon la modalité testée

4.3.3. Discussion des paramètres physico-chimiques des Technosols construits ayant influencé la dispersion et la capacité des organismes d'intérêt à assurer leur fitness

Les résultats ont été confrontés aux paramètres physico-chimiques des sols d'essai à t_0 et à t_3 en vue d'étudier leur influence sur la dispersion, la survie, la croissance et la reproduction des organismes modèles. L'analyse statistique au moyen d'ACP est présentée dans la figure 41.

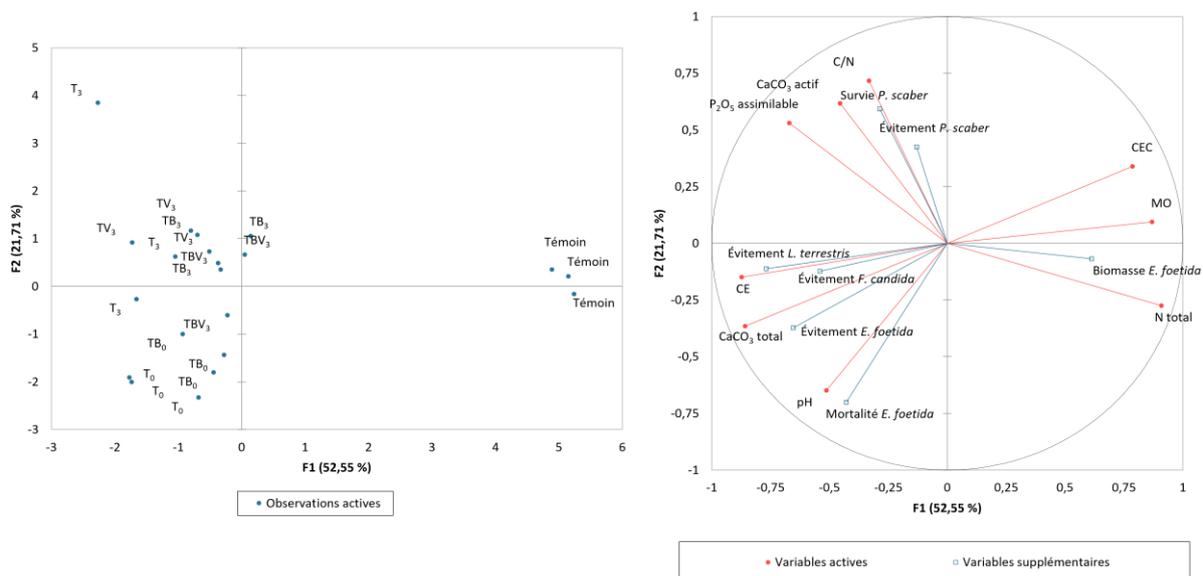


Figure 41 : Analyses en composantes principales des 7 modalités testées (T et TB à t_0 ; T, TV, TB et TBV à t_3) et du sol témoin sur la base de 9 de leurs paramètres physico-chimiques (pH, CE, CaCO_3 total et actif, MO, N total, C/N, CEC et P_2O_5 assimilable) et des réponses des organismes d'intérêt aux tests visant à évaluer la fonction d'habitat des sols d'essai. Axe 1 = 53 %, axe 2 = 22 %.

L'analyse en composantes principales des 7 sols d'essai (T et TB à t_0 , T, TV, TB et TBV à t_3 et le sol maraîcher témoin) sur la base de 9 de leurs paramètres physico-chimiques (pH, CE, CaCO_3 total et actif, MO, N total, C/N, CEC et P_2O_5 assimilable) a permis d'observer une distinction entre les Technosols construits et le sol maraîcher témoin le long de l'axe 1 (53 %) ainsi qu'entre les Technosols construits à t_0 et leurs modalités à t_3 le long de l'axe 2 (22 %) (figure 41). L'ACP montre que les comportements d'évitement de *E. foetida*, *L. terrestris* et *F. candida* ont été régis par les mêmes paramètres physico-chimiques. Un fort taux d'évitement des organismes a notamment été mis en évidence face aux valeurs élevées de pH, CE et de CaCO_3 total des Technosols. L'analyse montre qu'en plus d'être des facteurs limitants l'exploration des sols par les vers, ces paramètres sont des éléments toxiques à l'origine d'une forte mortalité pour *E. foetida*. Le rôle favorable des teneurs en matières organiques dans la dispersion des ingénieurs de l'écosystème (i.e. *E. foetida* et *L. terrestris*) dans les sols a également été mis en évidence. L'ACP montre par ailleurs que la propagation des vers et leur prise de masse dans le sol maraîcher témoin résultent très certainement de sa part plus importante en matière organique ainsi que de sa teneur plus élevée en N total et de sa plus forte CEC. À l'inverse, les fortes teneurs en P_2O_5 des modalités à t_3 ont eu un effet négatif sur la croissance des vers (i.e. biomasse).

Les résultats obtenus sur la dispersion et la survie des organismes dans les sols d'essai sont en accord avec les travaux de Edwards et Bohlen (1996) et Jänsch *et al.* (2005) qui montrent les effets des propriétés physiques et chimiques des sols (i.e. pH, cations échangeables, humidité, température, texture, capacité de rétention en eau, teneurs en MO

et nutriments) sur la dispersion des organismes modèles utilisés dans les tests écotoxicologiques et leur survie dans les milieux. D'après Edwards et Bohlen (1996), les teneurs en MO constituent l'un des facteurs favorisant l'arrivée des vers dans les sols. En effet, en raison de leur régime alimentaire essentiellement constitué de litière et de résidus organiques (Bouché, 1977 ; Chelinho *et al.*, 2011 ; Reynolds *et al.*, 1977), les vers présentent une appétence plus élevée pour les sols riches en MO. Les corrélations entre les variations de masse d'*E. foetida* et les teneurs en MO établies dans ces travaux de thèse sont également en adéquation avec les travaux de Matos-Moreira *et al.* (2012) qui ont montré une augmentation significative de la biomasse de ce ver lorsqu'il était exposé à d'importantes quantités de déchets organiques. De la même manière, Contreras-Ramos *et al.* (2009) ont observé une augmentation de la masse corporelle de cette espèce dans des milieux contaminés amendés tandis que Pey (2010) a observé une augmentation de la biomasse de ces vers dans des Technosols élaborés incluant du compost de déchets verts. Au regard de ces travaux, la corrélation négative entre taux de mortalité et CEC des substrats d'essai est attribuée à la disponibilité en nutriments indirectement traduite par la CEC des sols. Ainsi, plus la CEC est élevée, plus une importante quantité de nutriments a été mise à disposition pour les vers dans les substrats, plus ces derniers ont pu s'alimenter et se maintenir dans les milieux. Plusieurs auteurs insistent également sur le rôle des teneurs en matière organique et de la texture des sols sur les comportements d'évitement de *F. candida* (Domene *et al.*, 2011, 2012 ; Jänsch *et al.*, 2005 ; Natal-da-Luz *et al.*, 2008). Les résultats de ces travaux concordent et mettent en évidence un comportement d'évitement de *F. candida* lorsque ce dernier est exposé à des sols aux trop faibles teneurs en MO.

Les vers ne se répartissent pas de la même manière dans le sol selon leur régime alimentaire. En effet, les vers endogés étant géophages, ils ingèrent des particules organiques et minérales et préfèrent de surcroît les sols riches en argile alors que les vers épigés qui s'alimentent exclusivement à partir de MO sont peu présents dans les sols minéraux (Klok *et al.*, 2007). Pourtant, si les Technosols avec bentonite sont évités par les vers épi-anéciques de l'espèce *Lumbricus terrestris*, ils le sont moins que les Technosols sans bentonite. Les hypothèses émises par Klok *et al.* (2017) pourraient néanmoins expliquer pour partie le comportement d'évitement des vers vis-à-vis de TB à t_0 . En effet, ils soulignent que l'argile présente une pénétrabilité réduite par rapport à des sols plus meubles, laquelle nécessite une dépense énergétique plus conséquente des organismes pour se déplacer dans les substrats. Par ailleurs, Scharenbroch et Johnston (2011) montrent que bien que *L. terrestris* soit une espèce décrite comme ubiquiste et invasive, elle ne s'accommode pas aux caractéristiques des sols urbains construits. Si les paramètres tels que la texture du sol et leurs teneurs en éléments grossiers n'ont pas fait l'objet d'une analyse évolutive dans cette expérimentation,

ils semblent conditionner la présence de vers. Les lombrics tendent notamment à éviter les substrats à dominante sableuse et aux fortes teneurs en éléments grossiers. D'après Bрами *et al.* (2017) la réponse comportementale des vers résulterait de leur sensibilité accrue aux particules grossières, lesquelles pourraient blesser leur corps mou. La part importante d'éléments grossiers et les fortes teneurs en sable des sols construits à partir d'artefacts ne conviennent pas à ces organismes puisqu'ils constituent des matériaux qualifiés d'« abrasifs », à même de les blesser. En conséquence, la part d'argile plus conséquente dans les Technosols construits élaborés à partir de bentonite pourrait expliquer la tendance des vers à privilégier ces sols à terme (t₃).

Si les vers tendent à se propager plus facilement dans les sols aux teneurs élevées en MO, notons que d'importantes quantités de MO sont susceptibles de modifier le pH de ces sols, leur capacité de rétention en eau ainsi que leur agrégation. En conséquence, les vers s'accommodent de pH variant entre 4 et 9 selon les expérimentations (Edwards, 1988 ; Kaplan *et al.*, 1980 in Jänsch *et al.*, 2005). Ces constats ont également été effectués par Eijsackers *et al.* (1983) et Courtney *et al.* (2020) qui ont rapporté un effet inhibiteur de l'alcalinité des substrats sur la colonisation et l'établissement des communautés d'*Eisenia foetida*. Ainsi, bien que les vers épigés semblent, à première vue, relativement tolérants aux faibles valeurs de pH (Auclerc *et al.*, 2011), ils le sont en revanche beaucoup moins pour les sols alcalins. *Lumbricus terrestris* a été identifié dans des sols dont les pH varient de 3,6 à 7,4 et semble fuir les milieux dont les pH ne s'inscrivent pas dans cette gamme de valeurs (Bouché, 1972). Cette première observation tendrait à expliquer les taux d'évitement très élevés des Technosols construits à t₀.

Plusieurs travaux ont également témoigné de l'effet du pH sur la dispersion des collemboles dans les sols. En revanche, tous ne s'accordent pas sur les gammes de valeurs et sur leurs conséquences sur l'implantation de ces communautés. Ainsi, si Jänsch *et al.* (2005) considèrent que les collemboles de l'espèce *F. candida* auraient une préférence pour des sols acides mais qu'ils s'accommoderaient de pH compris entre 3,2 et 7,65 (avec un optimum fixé à 5,5 (Sandifer & Hopkin, 1996 ; Waalewijn *et al.*, 2013)), les résultats de Luo *et al.* (2022) montrent que ces organismes fuient inévitablement les milieux acides (pH < 4), ceux de Qiao *et al.* (2022) attestent de la présence de cette espèce parmi des milieux aux pH plus alcalins tels que les espaces verts urbains ou les Technosols tandis que les résultats de Domene *et al.* (2011) montrent que *Folsomia candida* est une espèce insensible aux propriétés du sol. Ces divers résultats ne permettent pas d'établir de valeurs de pH au-delà desquelles les collemboles éviteraient les milieux (Domene *et al.*, 2012). Les auteurs précisent d'ailleurs qu'en raison des interactions complexes entre les variables du sol, il est impossible de définir de valeurs optimales pour l'implantation des communautés dans les sols.

Outre le rôle du pH dans la propagation des organismes dans les sols, différents travaux ont montré qu'il pouvait s'agir d'un facteur limitant qui pouvait affecter l'abondance et la distribution des vers dans les sols. La plupart d'entre eux soulignent souvent la faible résistance des vers à des pH trop acides (Wu *et al.*, 2020) et attribuent le taux de mortalité à l'action combinée du faible pH et de la libération progressive de substances toxiques telles que des métaux qui affectent les organismes en conséquence (Spurgeon & Hopkin, 1996). Dans ces études, les atteintes à la survie, à la biomasse et à la reproduction des organismes ne sont pas directement imputées au pH mais plutôt à l'influence de ce paramètre (lorsqu'il est acide) sur la biodisponibilité de substances létales. Wu *et al.* (2020) établissent néanmoins des limites à partir desquelles la survie, la croissance et la reproduction sont altérées (avec des valeurs respectives de 3,0, 4,0 et 5,2). Rares sont les travaux qui ont porté sur la toxicité des pH alcalins sur les vers. Néanmoins, Kaplan *et al.* (1980) ont observé un taux de mortalité absolu des vers de l'espèce *E. foetida* dans des sols dont le pH était supérieur à 9. En 1988, les mêmes constats ont été réalisés par Edwards qui témoignait de la capacité de ces organismes à se maintenir dans des plages de pH comprises entre 4 et 9. Finalement, Courtney *et al.* (2020) ont constaté un taux de mortalité particulièrement élevé de *E. foetida* dans des sols alcalins dont le pH variait entre 8,4 et 10. Il semble ainsi que, comme en conditions trop acides, les substrats présentant une basicité trop élevée puissent affecter négativement le maintien des populations d'*E. foetida* dans les sols. Rusek et Marshall (2000) montrent notamment qu'en conditions acides, certains processus physiologiques opérés par les vers de cette espèce (tels que la production de mucus) ne se produisent plus de manière optimale. Ces constats sont corroborés par les résultats de Wu *et al.* (2020) qui montrent qu'un pH trop acide limite d'abord la production de cocon, puis la croissance et finalement la survie de cette espèce. De la même manière, il est envisagé que de tels processus pourraient potentiellement se réaliser dans des conditions de basicité trop élevées. À t_0 , ces effets ne seraient toutefois pas perceptibles sur la production de cocon et la prise de masse des organismes puisque le pH excédait déjà la gamme de valeur dans laquelle cette espèce était susceptible d'assurer sa survie. En revanche, les effets de la toxicité du pH ont été perceptibles à t_3 puisque les organismes sont parvenus à se maintenir dans les substrats avec un taux de mortalité significativement plus faible mais une variation de biomasses négative dans T, TB et TBV ainsi qu'une production de cocon nulle dans l'ensemble des modalités. Dans le cadre du présent travail, il semble que le pH trop alcalin des Technosols construits à t_0 ait suffi à provoquer la mort des vers, laquelle aurait été précédée d'une perte de masse des organismes.

L'effet des teneurs élevées en CaCO_3 total sur la survie d'*Eisenia foetida* n'est pas décrit dans la littérature. Dans le cadre de cette étude, la corrélation positive entre ce paramètre et le taux de mortalité des vers est attribuée à la dépendance entre teneur en CaCO_3 et pH.

La CE a également été décrite comme une limite à l'établissement de population d'*Eisenia foetida* lorsque sa valeur était trop importante. Owojori *et al.* (2009) rapportent notamment que dans leurs essais sur les CE de différents sols naturels, la survie et la biomasse d'*E. foetida* étaient significativement affectées à partir de 1030 $\mu\text{S cm}^{-1}$ et que la mortalité des individus était totale au-delà de 1310 $\mu\text{S cm}^{-1}$. Les auteurs ajoutent par ailleurs que dès 520 $\mu\text{S cm}^{-1}$, les vers n'ont plus produit aucun cocon. En outre, les auteurs signalent que si les agronomes considèrent les sols dont la conductivité électrique est inférieure à 2000 $\mu\text{S cm}^{-1}$ comme non salins et sans danger à l'égard des végétaux, ces degrés de salinité devraient être réexaminés au regard des organismes de la faune du sol qui y sont plus sensibles. Une conductivité électrique de 2000 $\mu\text{S cm}^{-1}$ est d'ailleurs décrite comme létale pour *Eisenia foetida* (Owojori *et al.*, 2008). D'après les travaux de Owojori *et al.* (2008), *Eisenia foetida* est toutefois capable de survivre dans des substrats artificiels aux valeurs de CE élevées puisque dans leur expérience, les vers inoculés dans le sol artificiel ISO (dont la CE a été élevée à 1310 $\mu\text{S cm}^{-1}$) ont survécu. Dans le cadre de ce travail, il semble que les actions combinées des valeurs de pH et de CE ont pu déclencher des réactions physiologiques chez ces derniers, entraînant une diminution de leur biomasse avant d'occasionner leur mort dans les conditions les plus extrêmes. Piggott *et al.* (2015) insistent cependant sur la difficulté de prédire l'effet combiné de divers facteurs limitant puisque ces derniers peuvent interagir de multiples manières (additive, synergique ou encore antagoniste). À t_3 , avec des valeurs plus proches des gammes dans lesquelles ces animaux sont susceptibles de se maintenir pour le pH et, pour partie, pour la conductivité électrique, il semble que les organismes soient parvenus à se maintenir tout en traduisant les limites des Technosols construits pour leur survie au regard de leur perte de biomasse et de leur incapacité à se reproduire dans ces sols.

Comme les ingénieurs de l'écosystème, les collemboles micro-fragmenteurs ont évité les sols aux CE trop élevées. Ces résultats s'accordent avec les observations de plusieurs études qui ont montré l'impact négatif de la CE sur la dispersion des collemboles dans les sols (Bastos *et al.*, 2022 ; Owojori *et al.*, 2009 ; Owojori & Reinecke, 2009). Bastos *et al.* (2022) ont notamment rapporté que les collemboles de l'espèce *Folsomia candida* avaient présenté un comportement d'évitement significatif à l'égard de biochars, attribué à un pic important (300 $\mu\text{S cm}^{-1}$) de conductivité électrique susceptible de générer un stress osmotique des individus. Dans cette même étude, la conductivité électrique induit d'ailleurs une réduction du nombre de juvéniles produits par *F. candida* lors d'un test de reproduction à partir de 600 $\mu\text{S cm}^{-1}$.

L'effet limitant de la conductivité électrique sur la dispersion, la survie, la reproduction et la croissance d'organismes de la faune du sol a également été souligné dans différentes études (Bastos *et al.*, 2022 ; Owojori & Reinecke, 2009 ; Owojori *et al.*, 2008). Une conductivité

électrique supérieure à $2000 \mu\text{S cm}^{-1}$ est d'ailleurs décrite comme létale pour *Eisenia foetida* (Owojori *et al.*, 2008). Si ce paramètre constitue une première information quant à la possible réticence des organismes à explorer le milieu en raison d'une potentielle toxicité liée aux teneurs en sels, il convient néanmoins de déterminer les sels constitutifs du milieu pour identifier l'élément limitant du substrat d'essai (Di Carlo *et al.*, 2020 ; Owojori & Reinecke, 2014). Les teneurs en Ca échangeable semblent influencer favorablement la colonisation des milieux par les vers (Reich *et al.*, 2005). De nouveau, les teneurs supérieures en Ca échangeable dans les sols incluant une part de bentonite à t_3 pourraient avoir influencé la colonisation préférentielle de ces substrats par les vers.

E. foetida est une espèce sensible aux conditions d'humidité de son milieu. En effet, il a été relaté que face à une dessiccation du milieu, les vers étaient susceptibles d'entrer en diapause (c'est-à-dire provoquer un ralentissement de leur métabolisme) (Booth *et al.*, 2000). De plus, il a été montré que les vers consommaient de l'eau pour respirer, produire du mucus ou encore pour se déplacer dans leur milieu. Or, la consommation d'eau par ces organismes se traduit par une perte de biomasse (Mcdaniel *et al.*, 2013). En raison de la compacité des Technosols et des fortes teneurs en argile dans TB et TBV, les vers ont pu avoir à produire plus de mucus pour parvenir à se déplacer et ont probablement consommé plus d'eau. Il semble ainsi que la dépense énergétique des vers liée à leur déplacement dans les milieux soit en opposition à la prise de masse des organismes. Certains auteurs soulignent aussi le rôle de l'humidité du sol (Domene *et al.*, 2011, 2012 ; González-Alcaraz *et al.*, 2019 ; Joimel *et al.*, 2022) sur le comportement d'évitement, sur l'abondance ou encore sur la reproduction des collemboles. Les résultats de ces travaux concordent et mettent en évidence un comportement d'évitement de *F. candida* lorsque ce dernier est exposé à des sols aux taux d'humidité trop élevés ou trop faibles.

Domene *et al.* (2012) ont montré que les sols artificiels utilisés dans le cadre des tests d'évitement étaient souvent rejetés par les collemboles face aux sols naturels d'essai. Dans le cadre de cette étude, l'absence de rejet des Technosols par les collemboles montre que, bien qu'il s'agisse de sols artificiels, ils ne sont pas fuis par les collemboles. La présence de ces organismes dans les Technosols est recherchée dans le cadre de cette démarche expérimentale puisqu'il s'agit d'insectes à l'origine de la décomposition de la MO et du recyclage des nutriments (Filsler, 2002), lesquels favorisent la fertilité de ces sols néo-construits.

Précisons par ailleurs que si les mêmes corrélations ont été observées entre pH, CE et comportement d'évitement des vers et des collemboles, la réponse de *F. candida* n'a pas été aussi singulière que celle des vers puisqu'au bilan les collemboles n'ont pas évité les

Technosols construits (avec des taux d'évitement nul). Il semble ainsi que le principal facteur d'influence de la présence ou de l'absence de ces organismes soit de plus fortes teneurs en MO qui constituent la base de leur alimentation.

La compaction des sols induit l'évitement des communautés de vers (Edwards, 2004). Or, peu de temps après leur mise en place, les Technosols construits ont subi une importante compaction, supérieure dans T par rapport à TB. Cette compaction a pu limiter la propagation des vers dans les Technosols à leur mise en place et à t_3 . Néanmoins, avec l'action de bioturbation des vers inoculés dans TV et TBV pendant 6 mois, ces modalités pourraient avoir bénéficié de meilleures porosité, aération, structure, agrégation qui ont pu favoriser l'arrivée des vers à t_3 .

Le effets négatifs des teneurs en P_2O_5 assimilable des Technosols sur la prise de masse des vers sont en contradiction avec les résultats de Iordache (2018) qui montrent que les teneurs en phosphore des sols augmentent la biomasse d'*Eisenia foetida* alors que les teneurs en potassium ont tendance à la réduire. Rappelons qu'entre t_0 et t_3 , les teneurs en P_2O_5 assimilable dans TB et TBV sont restées relativement stables tandis qu'elles ont augmenté pour T et TV. Il ne semble ainsi pas pertinent d'attribuer une plus forte importance à ce facteur.

En dépit de l'évolution significative de la capacité des Technosols construits à assurer la survie du ver *Eisenia foetida* entre t_0 et t_3 , les résultats traduisent que les conditions demeurent insuffisantes pour l'implantation pérenne de ces organismes dans les Technosols après un an d'évolution. Il est à préciser que ce ver a été utilisé en vue de comparer les résultats des Technosols aux données de la littérature. Rappelons toutefois qu'il ne s'agit pas d'un ver largement répandu dans les sols agricoles et que l'étude de *Lumbricus terrestris* a été incluse à la démarche pour simuler le comportement d'un ver davantage susceptible de s'implanter spontanément dans les substrats et d'y améliorer la fertilité. En effet, selon les paramètres, les réponses des organismes diffèrent, c'est pourquoi il convenait d'observer différents acteurs du réseau trophique (Heimlich, 1985).

Pour rappel, en raison de leur cycle de vie plus long, les expérimentations relatives à la survie de *L. terrestris* n'ont pas été menées au laboratoire et ont consisté à dénombrer les individus à l'ouverture des micro- et mésocosmes après une implantation des vers de 6 mois. Pour ces essais, les tests statistiques ont mis en évidence une différence significative entre la survie des vers selon les Technosols dans lesquels ils avaient été inoculés pour l'expérimentation menée en mésocosmes (cf. tableau 46). En revanche, aucune différence significative entre les taux de mortalité de *Lumbricus terrestris* n'a été mise en évidence entre les modalités d'essai dans l'expérimentation réalisée en microcosmes (cf. tableau 46). Par

ailleurs, des différences significatives ont été observées selon l'inoculation des vers en micro- ou mésocosme. Dans les microcosmes, les vers ont en effet présenté un taux de mortalité significativement inférieur à celui des mésocosmes.

En raison des conditions défavorables à l'incorporation des vers lors de leur première inoculation et de la mort prématurée d'une partie des organismes à cette période, il n'est pas possible de conclure quant aux différences statistiques observées entre les taux de mortalité des vers dans les mésocosmes. De ce fait, seules des hypothèses ont été émises pour ces expérimentations. En premier lieu, il semble plus approprié de considérer que la survie des vers ne diffère pas selon le Technosol d'essai puisque les taux de mortalité des organismes dans T et TB pour l'expérimentation réalisée en microcosmes n'ont pas été différenciés au moyen des analyses statistiques. Un poids plus important a été attribué à ces résultats puisque le nombre total d'individus à introduire dans les Technosols était plus faible que dans les mésocosmes et que de ce fait, les vers ont très certainement profité de conditions plus favorables pour pénétrer dans les sols. En conséquence, la part de mortalité attribuable aux conditions ambiantes en a été atténuée. Dans un second temps, les différences significatives observées entre les taux de mortalité des vers selon leur implantation en micro- ou mésocosme pourrait résulter des différences d'humidité des Technosols selon les contenants. En effet, l'humidité est l'un des facteurs clé à la survie, la croissance et la reproduction des vers (Scharenbroch & Johnston, 2011). Or, dans les microcosmes (d'un volume de 0,04 m³), il a été veillé à maintenir un taux d'humidité de 60 % tandis que dans les mésocosmes (d'un volume d'environ 1 m³), l'objectif était de maintenir une humidité d'au moins 40 %. Les vers placés en mésocosmes ont probablement subi des phénomènes de dessiccation plus sévères que ceux des microcosmes. La majorité des vers vivants dans les mésocosmes se situaient d'ailleurs dans les horizons profonds lors de leur dénombrement. La présence de ces organismes en profondeur est attribuée à un taux d'humidité plus élevé que dans les horizons de surface.

Parmi les vers vivants (d'espèce *L. terrestris*) dénombrés à l'issue de l'expérimentation « survie », des individus de très petite taille et dépourvu de clitellum ont été observés. Ces individus n'ont ainsi pas été pris en compte dans l'évaluation du taux de mortalité des vers initialement inoculés puisqu'il s'agissait de juvéniles. En moyenne, 4 ± 7 juvéniles ont été comptés dans T en mésocosme, 4 ± 2 juvéniles dans TB en mésocosme et 2 ± 1 juvéniles dans T et TB en microcosmes. Aucune différence significative n'a été mise en évidence entre les reproductions des vers selon les Technosols supports. Ces résultats traduisent que les caractéristiques des Technosols rassemblaient des conditions propices à la reproduction des organismes.

Ainsi, contrairement au ver de compost *Eisenia foetida* (décrit comme plus robuste dans la littérature), *Lumbricus terrestris* est parvenu à assurer sa fitness au sein des Technosols construits. Ces résultats contribuent à montrer le potentiel de ce ver à se maintenir dans des habitats artificiels déjà décrit par Scharenbroch et Johnston (2011). Puisqu'il s'agit du ver dominant la plupart des sols urbains (Smetak *et al.*, 2007), et que les tests d'évitement et de survie ont montré sa capacité à explorer les Technosols construits après que ces derniers aient évolué pendant un an, puis à s'y maintenir et à s'y reproduire, il est supposé qu'en conditions *in situ*, les Technosols seraient aptes à supporter ces communautés. En conséquence, avec l'arrivée de ces vers épi-anéciques, la fertilité des Technosols pour un usage en maraîchage pourrait être améliorée, notamment à travers les modifications favorables de leurs structure, densité, porosité ou encore de la formation d'agrégats stables et la mise à disposition de nutriments essentiels au développement des cultures (Deeb *et al.*, 2016, 2017 ; Jangorzo *et al.*, 2018 ; Pey *et al.*, 2012 ; Ulrich *et al.*, 2021 ; Watteau *et al.*, 2019).

Si les ingénieurs et décomposeurs de l'écosystème ont partagé plusieurs facteurs déterminant leur dispersion et survie dans les sols d'essai (e.g. pH et CE), les organismes ont globalement présenté des comportements très différents. Ces différences peuvent pour partie être expliquées par leurs caractéristiques physiologiques ainsi que leurs voies d'exposition divergentes (Loureiro *et al.*, 2005). Munis d'une cuticule externe protectrice, les isopodes terrestres sont effectivement décrits comme étant moins sensibles à différents facteurs limitant la propagation des annélides (Bastos *et al.*, 2022). En ce sens, les auteurs considèrent les isopodes comme un groupe test complémentaire aux autres organismes communément utilisés pour la réalisation des tests écotoxicologiques puisqu'ils les décrivent comme moins vulnérables aux substances toxiques en raison de la moindre exposition de leurs corps aux éléments. Comme les cloportes, les collemboles sont munis d'une cuticule externe protectrice. Par ailleurs, *Folsomia candida* est une espèce eu-édaphique, c'est-à-dire qu'il s'agit d'une espèce qui vit dans les profondeurs du sol (Cortet, 2010). Contrairement à d'autres espèces épi- ou hémi-édaphiques, *F. candida* ne présente pas le même degré d'exposition aux différents paramètres du sol. Cette espèce est plus particulièrement exposées aux eaux interstitielles du sol et peut ainsi être plus affectée par le taux d'humidité que les espèces de surface (i.e. épi- et hémi-édaphiques). Styrišave *et al.* (2010) rapportent néanmoins que contrairement aux vers, les collemboles ne s'alimentent pas via l'ingestion de particules de sol et que, pour cette raison, ils sont très certainement moins vulnérables aux effets directement induits par les paramètres du sol.

Peu d'études se sont focalisées sur l'influence des paramètres physico-chimiques des sols sur leur colonisation par les cloportes. Les quelques recherches qui s'y sont intéressées montrent néanmoins que le comportement des cloportes est d'abord régi par le taux

d'humidité du substrat puis dans un second temps par la température du sol, la disponibilité en nourriture, l'acidité du sol et la disponibilité en calcium, nécessaire à la formation de leur exosquelette (Brigić *et al.*, 2017). Dans les tests d'évitement sur *P. scaber*, l'humidité des sols a été maintenue à 40 % de la CAC et ne peut avoir influencé le comportement des cloportes. Notons néanmoins qu'en conditions *in situ*, l'humidité est un facteur clé pour l'implantation des cloportes. En effet, ces anciens organismes marins présentent un taux d'évaporation cuticulaire élevé ; ainsi, des taux d'humidité trop faibles limitent leur propagation face à un risque accru de dessiccation (Broly *et al.*, 2013 ; Hornung, 2011). En revanche, si une humidité trop faible des sols favorise le comportement d'évitement des cloportes (Morgado *et al.*, 2015), des taux trop élevés occasionnent également le détournement des organismes (Brigić *et al.*, 2017 ; Ferreira *et al.*, 2016), probablement en raison d'une réduction des disponibilités de sites de nidification (Främb, 1994). Dans le cadre de cette expérience menée au laboratoire, les facteurs qui avaient limité l'exploration des substrats par les vers n'ont pas influencé les isopodes. En effet, ces derniers n'ont pas présenté de comportement d'évitement face au Technosols construits et ont plutôt eu tendance à privilégier leur colonisation. Ces observations sont corroborées par les résultats de Škarková *et al.* (2016), qui ont montré que la distribution des cloportes n'était pas influencée par le pH ni par la conductivité électrique des sols. Il semble, d'après la littérature que le comportement de *P. scaber* soit plutôt influencé par la source de nourriture à disposition dans le sol d'essai. En effet, Bastos *et al.* (2022) attribuent le comportement exploratoire des cloportes à leur possibilité d'accès à une source nutritive fraîche. Les sols récemment amendés présentent ainsi un potentiel attractif plus élevé pour ces organismes. En conséquence, la préférence des cloportes à explorer les Technosols construits plutôt que le sol standard tiendrait en l'intégration de matières organiques de nature, composition et maturité différentes au sein des formulations de Technosols. Si le comportement des cloportes est étroitement lié à leur mode alimentaire, ces organismes sont plus sensibles à la toxicité de leur substrat support qu'à celle de leurs aliments (van Gestel *et al.*, 2018). Ainsi, le comportement favorable des cloportes à coloniser les Technosols tend à prouver leur innocuité vis-à-vis de ces organismes.

De la même manière, aucun paramètre n'a altéré la survie des isopodes. Ceci peut être partiellement expliqué par les modes de vie différents des organismes (en surface ou dans le sol) ainsi que par la protection des cloportes par leur cuticule externe. De plus, la croissance et la survie des isopodes sont généralement associées à la qualité et à la quantité d'aliments disponibles (Merriam, 1971). Ainsi, les ressources nutritives des modalités ont été adéquates pour assurer la survie de ces organismes. D'ailleurs, lorsque les conditions microclimatiques sont adaptées aux communautés d'isopodes, il a été montré que ces derniers se maintenaient dans leur milieu (Brigić *et al.*, 2017). Les taux de survie des cloportes significativement plus

élevés dans les modalités à t_3 qu'à t_0 pourraient en partie résulter des teneurs plus importantes en Ca^{2+} des Technosols après un an. En effet, une disponibilité moindre en calcium peut limiter la survie des cloportes puisque ceux-ci ont besoin de cet élément pour la synthèse de leur exosquelette (ibid). Les taux de survie des cloportes plus élevés à t_3 pourraient également dépendre des plus fortes activités microbiennes des modalités à cette période, lesquelles influencent positivement la longévité des organismes (Zimmer & Topp, 1997). Pour s'alimenter, les animaux saprophages dépendent effectivement de certaines enzymes (comme la cellulase) nécessaire à l'hydrolyse des composés structuraux des végétaux, lesquelles sont synthétisées par les micro-organismes du sol (Beck, 1993 ; Topp, 1981).

Les résultats de l'expérimentation « survie » réalisée sur les cloportes mettent en évidence la capacité de ces organismes à s'implanter dans les Technosols construits de manière pérenne dès leur mise en place. Ces observations pourraient signifier une amélioration plus rapide de la fertilité des Technosols puisque les cloportes agissent en tant que macrofragmenteurs et contribuent à l'apport de MO dans les sols, lesquelles favorisent l'activité des micro-organismes et la mise en place du cycle des nutriments. Van gestel *et al.* (2018) signalent que l'une des propriétés limitantes à l'implantation des communautés de cloportes en conditions *in situ* est le taux d'humidité des substrats. Hassall *et al.* (2010) précisent que lorsqu'ils sont exposés à un environnement trop sec, les cloportes se rassemblent et forment des agrégats pour limiter l'évaporation. Lors de l'ouverture des mésocosmes, plusieurs cloportes issus d'une réelle colonisation spontanée ont été observés. Ces derniers n'étaient pas regroupés et ne formaient pas d'agrégats. Ainsi, l'humidité des Technosols construits de l'expérimentation en mésocosmes étaient adéquates pour ces organismes et montrent qu'ils ne souffriraient pas d'un manque d'humidité si les Technosols étaient mis en place *in situ*.

4.4. ÉVALUATION DE LA QUALITE DES TECHNOSOLS CONSTRUITS POUR UN USAGE EN MARAICHAGE AU REGARD DE COMMUNAUTES DE LA FAUNE ISSUES D'UNE COLONISATION SPONTANEE

Les essais en conditions contrôlées (i.e. tests d'évitement et de survie) ont été complétés par la caractérisation de la faune spontanément installée dans les mésocosmes. Les analyses ont plus particulièrement porté sur la détermination d'organismes de la macrofaune et de la mésofaune.

Soulignons que le dispositif expérimental comportait de nombreuses barrières à la dispersion des organismes (toile de paillage au sol, serre et mésocosmes). De ce fait, les résultats n'ont pas reflété la dynamique de colonisation des modalités par les différents taxons

si l'expérimentation avait été mise en place *in situ*. Néanmoins, il s'agit de premières observations susceptibles de renseigner sur la fonction d'habitat des modalités à t₃. Il ne convient pas de comparer ces résultats au sol maraîcher témoin, en revanche les modalités ont été comparées entre elles.

4.4.1. Caractérisation de la macrofaune

La figure 42 présente les taxons identifiés ainsi que leur abondance dans les modalités.

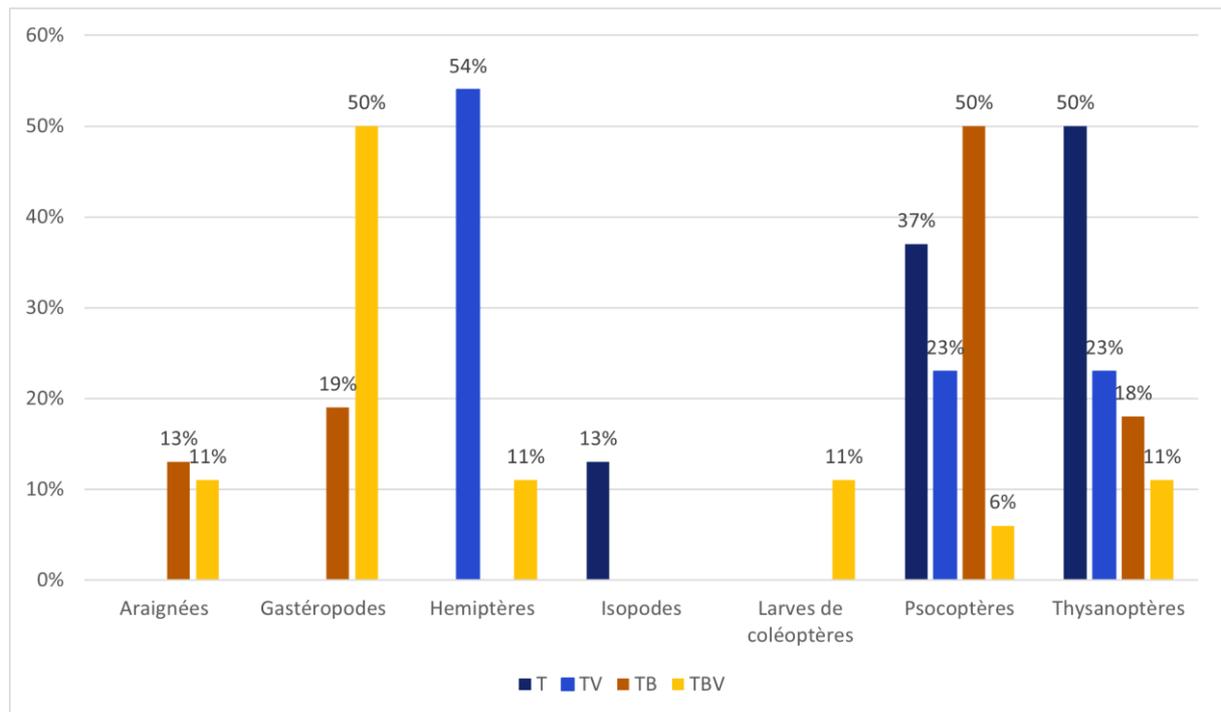


Figure 42 : Abondance relative des taxons de la macrofaune observés parmi les 4 modalités (T, TV, TB et TBV) à t₃

Au total, 7 taxons ont été identifiés dans les modalités. Les taxons les plus fréquemment rencontrés ont été les psocoptères (67 % dans T, TV et TB et 33 % dans TBV) et les thysanoptères (67 % dans TV, TB et TBV et 33 % dans T). Des araignées et gastéropodes ont été observés dans une moindre mesure dans TB et TBV. Les araignées ont été rencontrées dans 33 % des cas dans TB et 67 % dans TBV et les gastéropodes ont été observés dans 67 % des cas dans TB et TBV. Les taxons les plus abondants ont été les thysanoptères et psocoptères dans T (respectivement 50 % et 37 %), les hémiptères dans TV (54 %), les psocoptères dans TB (50 %) et les gastéropodes dans TBV (50 %) (figure 42). Les taxons les plus abondants dans les modalités ont très certainement colonisé les milieux en raison des cultures maraîchères qui s'y développaient et qui constituent, pour la plupart des organismes observés, l'essentiel de leur régime alimentaire, à l'exception des araignées qui sont prédatrices.

Le QBS-ar des modalités a été calculé à partir des taxons observés. Pour rappel, cet indice s'appuie sur la diversité de microarthropodes observée dans un sol en vue d'en évaluer

le degré de vulnérabilité. Il renseigne donc sur la qualité biologique des sols étudiés. Les valeurs de cet indice, de 8 ± 7 pour T, 8 ± 2 pour TB, 11 ± 6 pour TB et 15 ± 11 pour TBV, sont très faibles et aucune différence significative n'a été mise en évidence entre les modalités au regard de ces scores. D'après Parisi *et al.* (2005), des valeurs entre 100 et 200 témoignent d'un écosystème stable et de bonne qualité. La macrofaune retrouvée dans les modalités à t_3 témoigne d'une faible stabilité des systèmes. Relevons néanmoins que certains organismes sont parvenus à s'implanter dans les modalités malgré les nombreuses barrières à franchir. Bien que les modalités n'aient pas été disposées *in situ* et que la comparaison des modalités de cette étude aux Technosols de la littérature comporte des limites, Hedde *et al.* (2019) n'ont observé aucun taxon dans leur piège à l'implantation de deux Technosols construits *in situ* puis entre 17 et 20 taxons après 1 an et demi. De la même manière, Pruvost *et al.* (2020) n'ont observé aucun taxon après l'implantation de leurs Technosols construits *in situ* puis ont observé une diversité spécifique et une abondance des taxons comparables à celles d'un sol naturel adjacent à leurs Technosols après une évolution des Technosols de 3 ans. Ainsi, les organismes de la macrofaune sont capables de coloniser les Technosols construits rapidement après leur mise en place et de plus en plus au cours de leur évolution temporelle (Hedde *et al.*, 2019 ; Pruvost *et al.*, 2020). Burrow *et al.* (2018) précisent que la connexion des Technosols aux paysages environnants par le biais de corridors écologiques favorisait une colonisation plus rapide de ces milieux artificiels par les espèces endogènes. De plus, cette connectivité est à l'origine d'une abondance et d'une richesse spécifiques supérieures à celles de sols « déconnectés ».

La dispersion des organismes de la faune dans les Technosols dépend également des teneurs en MO. En effet, les dynamiques de colonisation les plus importantes ont été observées au sein des Technosols aux plus fortes teneurs en MO (Pruvost *et al.*, 2020 ; Vergnes *et al.*, 2017).

4.4.2. Caractérisation de la mésofaune

La caractérisation de la mésofaune a porté sur l'identification des collemboles (à l'espèce) et sur la détermination des groupes trophiques de la nématofaune (qui s'est appuyée sur leur régime alimentaire).

Collemboles

À t_3 , les quatre modalités ont présenté une très faible diversité spécifique de collemboles avec en moyenne 1 espèce dans T, 2 dans TV, 1 dans TB et 2 dans TBV. En termes d'abondances, 2830 ± 2451 individus m^{-2} ont été observés dans T, 3655 ± 408 dans TV, 2476 ± 2320 dans TB et 1651 ± 1081 dans TBV, sans présenter de différence significative. Les trois espèces identifiées ont été *Brachystomella parvula*, *Ceratophysella denticulata* et *Proisotoma*

minuta (figure 43). Les espèces les plus fréquemment observées ont été *C. denticulata* et *P. minuta* (observées à des fréquences de 67 % chacune dans T, 100 % chacune dans TV 67 % chacune dans TB et respectivement 100 % et 67 % dans TBV). L'espèce la plus abondante dans T, TB et TBV a été *P. minuta* avec des abondances respectives de 63 %, 76 % et 57 % (figure 44). Dans TV, l'espèce la plus abondante a été *C. denticulata* avec une abondance de 50 %. Ces trois espèces sont hémi-édaphiques et très communes (Hopkin, 2007). Santorufo *et al.* (2021) ont également observé une majorité d'espèces hémi-édaphiques dans des Technosols construits de 4 ans. Il s'agit de collemboles pigmentés, dotés d'une furca²⁰, et d'ocelles²¹ (figure 45), pratiquant la reproduction sexuée et se déplaçant en sautant ou en marchant. Ces traits fonctionnels témoignent plutôt d'un milieu exposé à des perturbations (Hopkin, 2007 ; Potapov, 2001). En effet, la pigmentation des collemboles leur permet de se protéger contre les rayons UV, la présence d'une furca dévoile leur potentiel à fuir face à d'éventuels prédateurs et leur nombre d'ocelles est un témoin direct de leurs stratégies de dispersion et de survie (à travers leur aptitude visuelle). Seules leurs capacités reproductrices n'illustrent pas leur aptitude à la colonisation rapide ou la recomposition à la suite d'une perturbation.

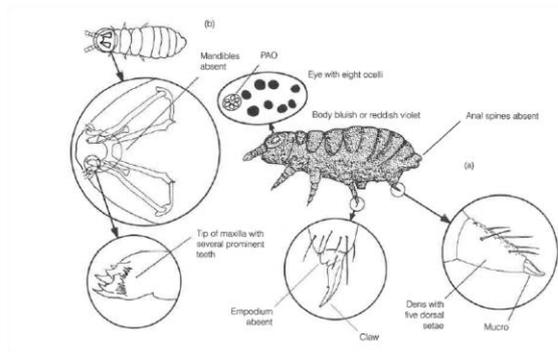
En tenant compte de la multiplicité des barrières à la dispersion de ces organismes, il est très probable que les collemboles des modalités soient issus des matériaux parents. *C. denticulata* et *P. minuta* sont d'ailleurs des espèces très répandues dans les déchets organiques, litières et déjections animales (Hopkin, 2007 ; Potapov, 2001). Leur observation à t₃, indique cependant que ces organismes sont parvenus à se maintenir dans les milieux dès leur mise en place.

Par rapport aux données de la littérature, ces résultats sont très inférieurs à ceux de sols urbains. À titre d'exemple, Joimel *et al.* (2017) ont dénombré respectivement 18000 et 19000 individus par m² dans les sols de jardins potagers urbains et sols urbains et industriels.

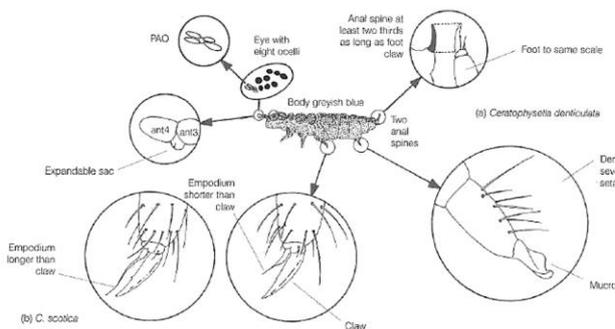
²⁰ Organe saltatoire

²¹ Les yeux des collemboles peuvent contenir jusqu'à 8 ocelles. Certaines espèces en ont moins, d'autres sont aveugles.

Brachystomella parvula



Ceratophysella denticulata



Proisotoma minuta

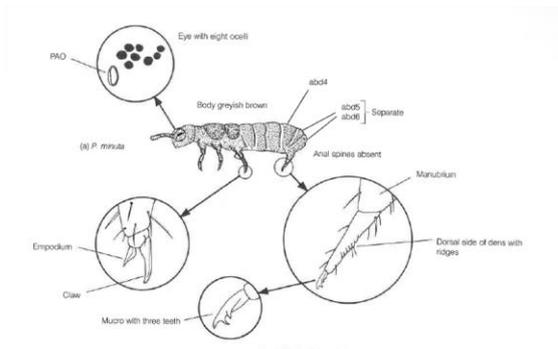


Figure 43 : Illustrations des collemboles observés dans les modalités (Hopkin, 2007) et photographies associées (issues des observations au laboratoire)

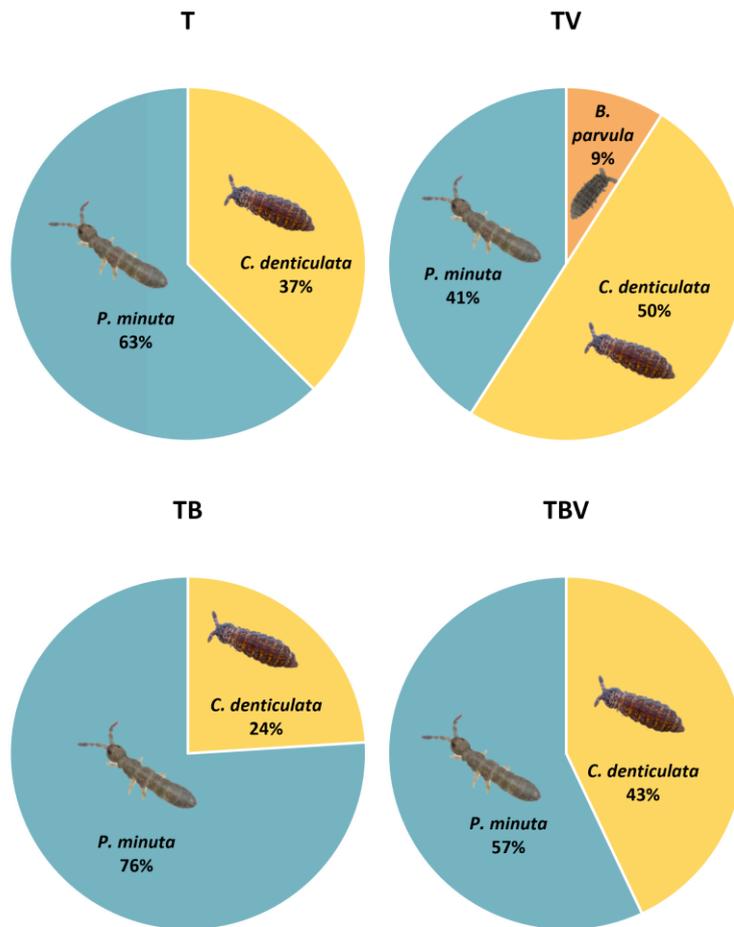


Figure 44 : Abondance moyenne des espèces de collemboles identifiées dans les modalités (n = 3). T, sans bentonite, TV, sans bentonite avec vers (*L. terrestris*), TB, avec bentonite, TBV, avec bentonite avec vers (*L. terrestris*)

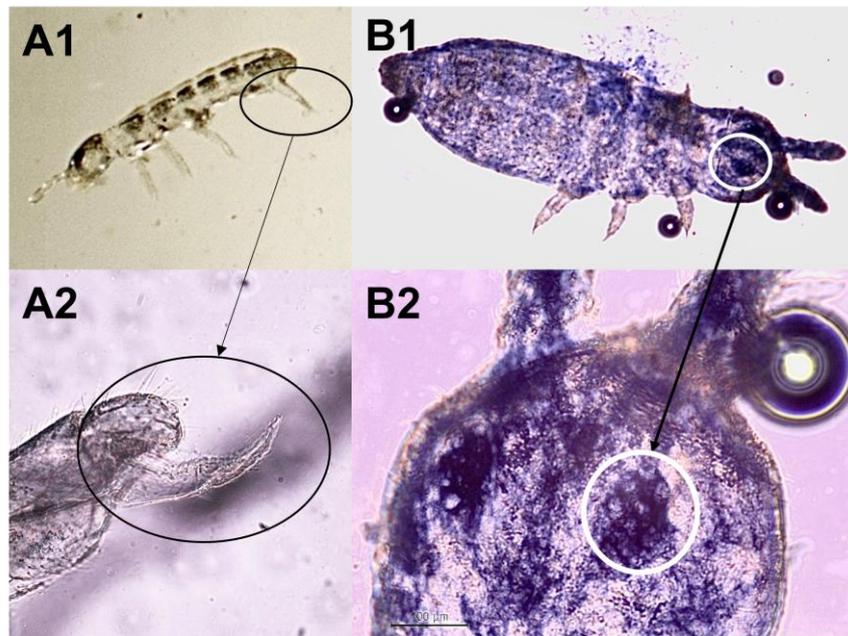


Figure 45 : Détails anatomiques des collemboles observés au stéréo-microscope de recherche à épifluorescence (NIKON SMZ18) (A1, A2) furca, (B1, B2) Ocellus

Si les collembolés issus des matériaux parentaux sont parvenus à assurer leur fitness dans les modalités d'essai, il est fort probable qu'en conditions *in situ*, d'autres espèces auraient été aptes à coloniser ces milieux. De plus, les apports réguliers de MO impliqués par les pratiques du micro-maraîchage bio-intensif pourraient engendrer l'implantation d'un plus grand nombre de collembolés (abondance) mais aussi d'espèces plus diversifiées (diversité spécifique), de même que l'évolution temporelle des sols (Joimel *et al.*, 2022). La matrice urbaine pourrait représenter un frein à la dispersion des collembolés lors de la mise en place des Technosols au sein des fermes urbaines déployées par Veolia (Sterzyńska *et al.*, 2018). L'implantation des Technosols dans la matrice urbaine devra de ce fait faire l'objet d'une réflexion préalable, de même que la gestion optimale des espaces pour favoriser l'arrivée de ces organismes (Burrow *et al.*, 2018).

Nématofaune

Pour évaluer le réseau trophique, l'analyse de la nématofaune a consisté à déterminer l'abondance des organismes selon les différents groupes trophiques (tableau 48) puis à déterminer les valeurs des indices nématofauniques de chaque sol d'essai (tableau 49).

Tableau 48 : Abondance des différents types de nématodes dans les modalités du dispositif expérimental (T, TV, TB et TBV) et dans le sol maraîcher témoin (moyenne \pm ET)

	T	TV	TB	TBV	Témoin
Libres	5918 \pm 2822	3792 \pm 1070	3543 \pm 998	3821 \pm 1273	1282 \pm 647
Bactérovores	5710 \pm 2817	3620 \pm 1012	3457 \pm 1040	3596 \pm 1221	972 \pm 482
Bactérovores opportunistes	5693 \pm 2797	3603 \pm 1021	3040 \pm 881	3266 \pm 1509	187 \pm 60
Bactérovores autres	17 \pm 29 (b)	16 \pm 28 (b)	416 \pm 162 (a)	330 \pm 291 (a)	785 \pm 511
Fongivores	208 \pm 45	172 \pm 75	86 \pm 76	226 \pm 183	257 \pm 167
Omnivores-Prédateurs	0 \pm 0	0 \pm 0	0 \pm 0	0 \pm 0	53 \pm 13
Phytophages	29 \pm 26	130 \pm 78	92 \pm 98	140 \pm 166	766 \pm 203
Phytoparasites	0 \pm 0	0 \pm 0	11 \pm 18	0 \pm 0	72 \pm 124
Phytophages facultatifs	29 \pm 26	130 \pm 78	82 \pm 102	140 \pm 166	694 \pm 297
Total	5947 \pm 2822	3922 \pm 1066	3635 \pm 901	3961 \pm 1437	2049 \pm 846

Tableau 49 : Valeurs des différents paramètres nématofauniques des modalités du dispositif expérimental (T, TV TB et TBV) et du témoin (moyenne \pm ET)

	T	TV	TB	TBV	Témoin
EI	99 \pm 1 (a)	99 \pm 0 (a)	96 \pm 0 (b)	95 \pm 3 (b)	55 \pm 17
SI	0 \pm 0	0 \pm 0	0 \pm 0	0 \pm 0	41 \pm 14
MI	1,05 \pm 0,03 (b)	1,05 \pm 0,01 (b)	1,14 \pm 0,01 (a)	1,17 \pm 0,11 (a)	2,06 \pm 0,22
IVD	96 \pm 3	95 \pm 2	97 \pm 3	94 \pm 5	81 \pm 8
H'	0,77 \pm 0,12	1,09 \pm 0,14	1,24 \pm 0,43	1,04 \pm 0,43	1,80 \pm 0,13
N	5 \pm 3	6 \pm 1	6 \pm 2	5 \pm 3	12 \pm 1

EI, indice d'enrichissement, SI, indice de maturité, MI, indice de maturité, IVD, indice des voies de décomposition de la MO, H', indice de diversité de Shannon, N, nombre de familles. Vert : l'indice traduit un milieu relativement équilibré, rouge : l'indice traduit un milieu instable.

À t_3 , de très fortes abondances en nématodes libres ont été observées dans les quatre modalités. Ces résultats traduisent un niveau d'activité biologique extrême dans les Technosols. Dans T, les nématodes libres ont eu tendance à être plus abondants que dans les autres modalités ($\times 1,5$) sans que cette différence n'ait été significative. Dans toutes les

modalités, les nématodes dominants ont été les bactérivores, plus particulièrement les nématodes bactérivores opportunistes. Ces résultats illustrent une forte activité de transformation des matières organiques ainsi qu'une forte disponibilité en nutriments dans les Technosols à t₃. À l'inverse, les nématodes fongivores ont été observés en faible abondance. L'absence de nématodes omnivores-prédateurs (sous le seuil de détection) dans l'ensemble des modalités est attribué à leur absence dans les matériaux parents utilisés pour l'élaboration des Technosols et à leur plus faible potentiel de colonisation que celui des nématodes microbivores (bactérivores et fongivores). La majorité de nématodes bactérivores dans les modalités pourraient résulter des conditions d'humidité des sols (insuffisantes pour le développement de champignons). Par ailleurs l'absence de prédateurs pourrait indiquer que le système est encore trop jeune pour accueillir ce groupe. En effet, les prédateurs tendent à coloniser les milieux lorsqu'ils atteignent un certain équilibre populationnel et permettent d'assurer l'équilibre des populations proies-prédateurs. Leur présence dans le sol maraîcher témoin semble d'ailleurs appuyer cette hypothèse. Les modalités comprenant une part de bentonite ont présenté une abondance de nématodes bactérivores autres (i.e. non opportunistes) significativement plus élevée que celles en étant exemptes. Par ailleurs, la présence de bentonite dans les formulations, l'inoculation de vers dans les modalités ou la combinaison de ces deux facteurs semble(nt) avoir induit de plus faibles abondances de nématodes bactérivores opportunistes. Néanmoins il ne s'agit que de tendances car les différences entre modalités n'ont pas été significatives. Dans l'ensemble des modalités, les nématodes phytophages ont été peu abondants. Il s'agissait principalement de nématodes phytophages facultatifs, lesquels ne représentent pas un risque pour les cultures maraîchères. Le plus faible développement de ces communautés résulte probablement de leur absence des matériaux parents des Technosols construits.

Les résultats de l'analyse nématofaunique ont permis d'évaluer le réseau trophique des modalités d'essai (tableau 49). Dans l'ensemble, l'indice d'enrichissement (EI) est très élevé à t₃. Ce résultat met en évidence des flux de nutriments extrêmes (> 90), lesquels sont à associer à une très forte disponibilité de nutriments apportés par les matières organiques introduites dans les Technosols construits. L'indice de structure (SI) est nul pour chaque modalité. Ces scores montrent qu'il s'agit de milieux particulièrement perturbés et dans lesquels les réseaux trophiques sont très peu développés. L'indice de maturité (MI) des modalités est également très bas. Il témoigne de l'instabilité des Technosols construits à travers des communautés de nématodes très peu matures. Ces résultats sont caractéristiques de sols construits très jeunes. Au contraire, l'indice de voie de décomposition (IVD) des modalités est très élevé et traduit un déséquilibre des voies de décomposition de la MO entre la composante fongique et microbienne, lesquelles sont dominées par l'activité bactérienne.

Ces résultats confirment l'hypothèse selon laquelle les conditions d'humidité des modalités auraient été insuffisantes pour permettre le développement des fonges.

En moyenne, il a été observé un faible nombre de familles ($N < 7$) dans les modalités ainsi qu'un indice de diversité de Shannon (H') très faible ($< 1,5$) dans l'ensemble des modalités. Ces résultats indiquent qu'une famille de nématodes (Rhabditidae) tend à dominer les communautés nématofauniques des modalités d'essai. Aucune différence statistique n'a été observée entre les différents indices suivis. Néanmoins, T tend à présenter des valeurs de MI et H' inférieures aux autres modalités et une valeur de EI supérieure.

L'inclusion d'une part de bentonite dans les modalités d'essai a induit un indice d'enrichissement (EI) légèrement inférieur à celui des modalités exemptes de ce matériau. Les flux de nutriments sont ainsi légèrement ralentis par la présence de bentonite. L'apport de bentonite dans les Technosols a également provoqué un indice de maturité (MI) plus élevé, lequel renseigne des milieux légèrement moins perturbés (liés à la présence en plus forte abondance de nématodes bactérivores autres). Les autres indices nématofauniques n'ont pas été influencés par ce facteur, de même que l'inoculation de vers n'a pas engendré de différence significative entre les modalités.

Par rapport aux Technosols construits, le sol maraîcher témoin se caractérise par une abondance de nématodes libres plus faible (1282 ± 647 nématodes 100 g^{-1} sol sec). Le nombre de nématodes libres dans le sol témoin est quand même élevé et indique un niveau d'activité biologique élevé. Les groupes dominants dans ce sol ont été les nématodes bactérivores, ce qui est usuel en maraîchage lorsque les apports de matières organiques labiles sont importants. Les nématodes phytophages ont également été observés en grand nombre dans ce sol, plus particulièrement les nématodes phytophages facultatifs, dont l'abondance résulte très certainement du couvert végétal plus important dans ce sol. En raison des abondances dominantes de ces deux groupes, l'indice de diversité de Shannon est intermédiaire ($H' = 1,80 \pm 0,13$).

Dans l'ensemble, le diagnostic du réseau trophique est satisfaisant dans ce sol. L'indice de structure (SI) y est moyen (41 ± 14) et montre un milieu modérément perturbé ; l'indice d'enrichissement (EI) y est également moyen (55 ± 17) et reflète des flux de nutriments équilibrés ; l'indice de maturité (MI) y est élevé ($2,06 \pm 0,22$) et indique un milieu relativement stable ; l'indice des voies de décomposition des MO est satisfaisant (81 ± 8) et montre que les voies de décomposition de la MO sont équilibrées entre la composante fongique et bactérienne. Les nématodes phytoparasites ne sont présents qu'en faible abondance et ne sont pas susceptibles d'engendrer de dégâts sur les cultures.

4.5. BILAN

Ce chapitre a traité les questions scientifiques suivantes : (i) Les couches organo-minérales de surface des modalités d'essai sont-elles en mesure de permettre à différentes catégories d'organismes d'intérêt d'assurer leur fitness ? En d'autres termes, ces couches constituent-elles un lieu d'accueil susceptible de permettre la survie, le maintien et la reproduction de ces organismes ? Ont-elles une fonction d'habitat pour les organismes sélectionnés ? (ii) les organismes de la faune invertébrée sélectionnés pour leur intérêt ont-ils une préférence pour l'une des modalités ? Si oui, quelle en est la raison ? (iii) les couches organo-minérales assurent-elles une fonction d'habitat comparable à celle du sol témoin au regard des organismes retenus ? (iv) l'acquisition de cette fonction est-elle dépendante du temps d'évolution des modalités ? (v) que traduit la chaîne trophique spontanément installée dans le dispositif expérimental en mésocosmes ?

Plusieurs essais (i.e. tests d'évitement, de survie, de biomasse et de reproduction et analyse de bioindicateurs d'intérêt issus de la colonisation spontanée) en laboratoire, en micro- et mésocosmes ont été réalisés pour répondre à ces interrogations.

La synthèse des principaux résultats observés au moyen des tests d'évitement et de survie est présentée dans la figure 46. Il ressort des capacités de dispersion, de survie, de croissance et de reproduction différentes selon les organismes d'intérêt, dont certaines évoluent au cours du temps. Dans l'ensemble, les résultats montrent une meilleure propension des décomposeurs à se maintenir dans les Technosols construits dès leur mise en place par rapport aux ingénieurs de l'écosystème.

Les tests d'évitement visaient à simuler le comportement des organismes d'intérêt s'ils avaient été exposés aux Technosols construits *in situ*. Les organismes ont présenté des réponses contraires liées à leurs caractéristiques physiologiques et voie d'exposition différentes dont la synthèse est présentée en figure 47. Les résultats ont mis en évidence l'influence de différents paramètres physiques et chimiques des Technosols construits dans la capacité des organismes d'intérêt à se disperser. Des teneurs élevées en MO et en Ca dans les Technosols, de même qu'une plus forte capacité de rétention en eau semblent ainsi favoriser la dispersion d'au moins un des organismes d'étude tandis que des teneurs élevées en argile, sables, un pH alcalin ou une trop forte conductivité électrique limitent leur dispersion.

Les tests de survie, de biomasse et de reproduction visaient quant à eux à évaluer la capacité des organismes à assurer leur fitness dans les Technosols. Les résultats de ces tests ont montré que les couches organo-minérales de surface des modalités d'essai étaient en mesure de permettre à certaines catégories d'organismes d'assurer leur fitness (figure 48).

Les résultats ont montré qu'outre leur effet sur la dispersion des organismes d'intérêt, de plus fortes teneurs en MO, et en Ca influençaient favorablement la capacité de survie, de croissance et/ou de reproduction d'au moins un organisme d'intérêt. De la même manière, en complément de leur influence négative sur la capacité de dispersion des organismes d'étude, le pH alcalin, les plus fortes valeurs de conductivité électrique et des teneurs plus fortes en argile limitent la capacité de survie, de croissance et/ou de reproduction d'au moins un des organismes d'intérêt au sein des Technosols construits.

Les couches organo-minérales de surface des modalités ont-elles une fonction d'habitat pour différentes catégories de bioindicateurs ?
Assurent-elles une fonction d'habitat comparable à celle du sol maraîcher témoin au regard des bioindicateurs sélectionnés ?

Fonction d'habitat

Les couches organo-minérales de surface des modalités constituent-elles un lieu d'accueil susceptible de permettre la dispersion, la survie, le maintien et la reproduction des bioindicateurs d'intérêt ?

Capacité des organismes à se disperser dans les modalités

Les bioindicateurs sélectionnés ont-ils une préférence pour l'une des modalités ?
Si oui, quelle en est la raison ?
L'acquisition de cette fonction est-elle dépendante du temps d'évolution des modalités ?

Capacité des organismes à assurer leur fitness dans les modalités

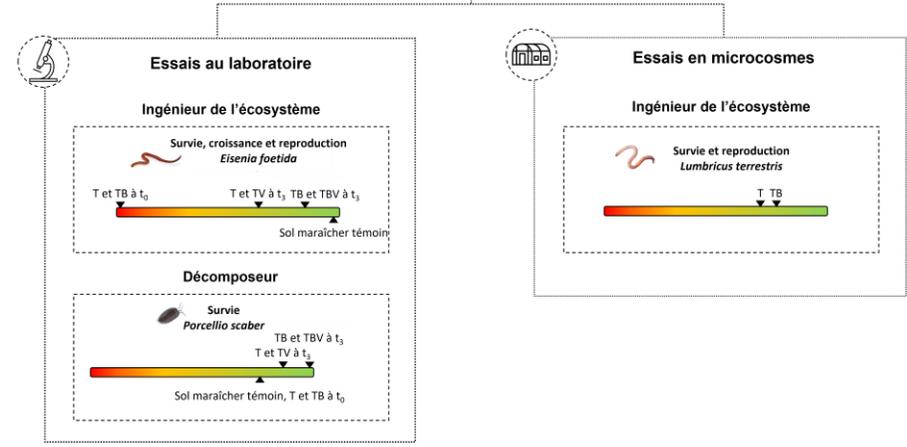
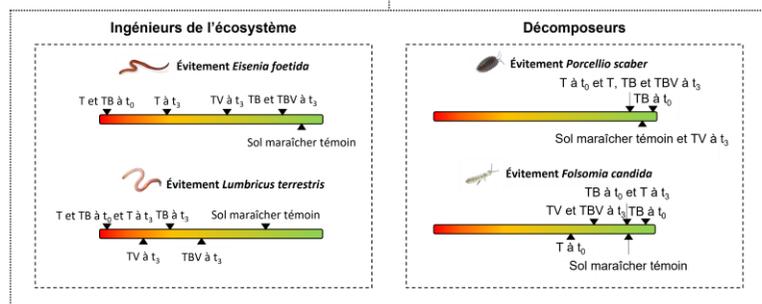


Figure 46 : Synthèse des tests visant à évaluer la fonction d'habitat des modalités

Des réponses contraires des organismes liées à leurs caractéristiques physiologiques et voies d'exposition différentes

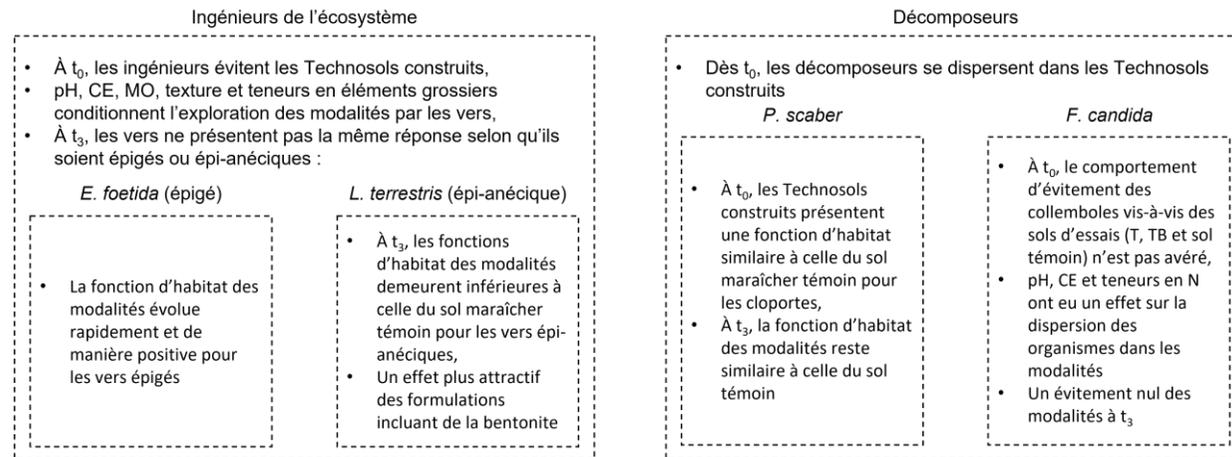
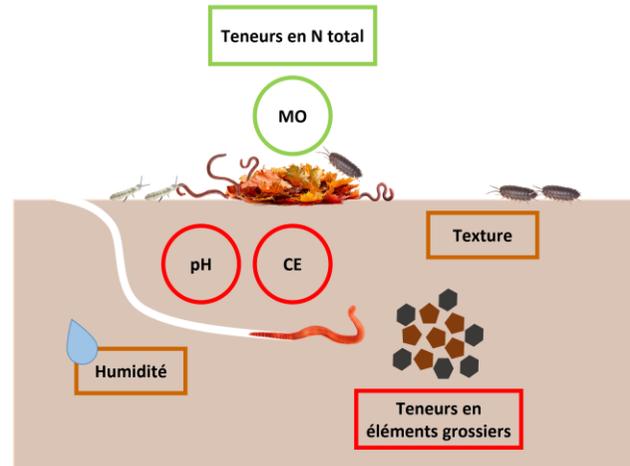


Figure 47 : Synthèse des comportements d'évitement des organismes d'intérêt face aux modalités d'essai

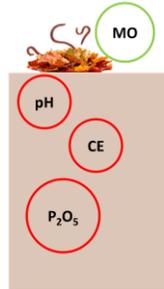
Les éléments encadrés en rouge sont les facteurs identifiés comme limitant l'exploration des modalités par au moins l'un des organismes, ceux encadrés en orange conditionnent favorablement ou défavorablement la dispersion d'au moins un organisme dans les modalités, ceux encadrés en vert favorisent la dispersion d'au moins un organisme dans les modalités.

Capacité des organismes à assurer leur fitness



Essais en laboratoire

Ingénieur de l'écosystème
E. foetida



Survie :

- À t_0 , une mortalité absolue atteinte au bout d'une semaine dans les Technosols,
- À t_3 , une mortalité significativement inférieure pour l'ensemble des modalités avec une tendance à la survie plus élevée dans les modalités incluant une part de bentonite,
- Une mortalité accrue par les effets de pH, CE et teneurs en CaCO_3 trop élevées,
- Une survie favorisée par les teneurs en MO

Croissance :

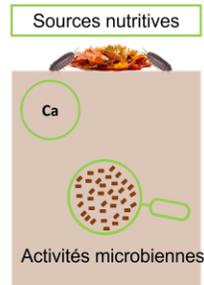
- À t_3 , les modalités ne semblent pas altérer la croissance des vers,
- Une croissance ralentie par des pH, CE et teneurs en P_2O_5 trop élevées (pH et CE influencent négativement la biomasse des vers dans le temps),
- Les teneurs en MO favorisent la croissance des vers

Reproduction :

- Une absence totale de reproduction des organismes aux deux pas de temps (t_0 et t_3)

La fonction d'habitat des modalités d'essai évolue positivement mais lentement

Décomposeur
P. scaber



Survie :

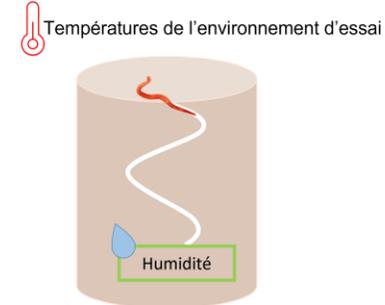
- Une survie comparable des cloportes dans le sol maraîcher témoin et les Technosols construits à t_0 ,
- Une survie plus importante dans les modalités à t_3 que dans le sol maraîcher témoin,
- Une survie des décomposeurs qui pourrait dépendre des sources nutritives des modalités, de leurs teneurs en Ca et de leurs activités microbiennes

En conditions in situ, dès t_0 , les cloportes seraient susceptibles de se disperser et de s'installer durablement dans les Technosols construits



Essais en microcosmes

Ingénieur de l'écosystème
L. terrestris



Survie :

- Une importante mortalité induite par les conditions expérimentales (fortes températures),
- Une survie plus importante des vers face à des taux d'humidité plus élevés,
- *L. terrestris* assure sa fitness dans les Technosols construits en 6 mois

Figure 48 : Synthèse des résultats relatifs aux tests de survie des organismes de la pédofaune étudiés

Les éléments encadrés en rouge sont les facteurs identifiés comme limitant la survie, la croissance et/ou la reproduction d'un des organismes dans les sols d'essai, ceux encadrés en vert favorisent la survie, la croissance et/ou la reproduction d'un des organismes dans les sols d'essais.

Sur la base des résultats, les hypothèses préalablement établies (i.e (i) les Technosols construits assurent une fonction d'habitat comparable à celle d'un sol maraîcher naturel cultivé en io-intensif et (ii) les Technosols construits sont colonisés spontanément par des organismes vivants d'intérêt) ne sont que partiellement validées. Il semble en effet qu'en conditions *in situ*, les ingénieurs de l'écosystème ne coloniseraient probablement pas les Technosols construits dès leur mise en place mais seraient susceptibles, pour les vers épi-anéciques, de s'y implanter de manière pérenne après un an. Des constats similaires ont d'ailleurs été faits et témoignent de l'incapacité des vers à s'implanter dans des sols urbains construits (Scharenbroch & Johnston, 2011). La réticence des organismes à explorer ces sols tiendrait en leurs valeurs de pH et CE trop élevées ainsi qu'à leur texture trop grossière. Ces résultats doivent impérativement être intégrés dans de futures démarches d'implantation des Technosols *in situ* dans la mesure où les vers épi-anéciques sont recherchés en maraîchage pour améliorer la fertilité des sols (Araujo *et al.*, 2022 ; Forey *et al.*, 2018 ; Jangorzo *et al.*, 2018 ; Marhan & Scheu, 2005 ; Pey *et al.*, 2013 ; Smetak *et al.*, 2007 ; Watteau *et al.*, 2014). Notons toutefois qu'avec la mise en place des pratiques inhérentes au micro-maraîchage bio-intensif, et plus précisément des apports récurrents et conséquents en matière organique, ces organismes seraient peut-être susceptibles d'explorer et de s'implanter durablement dans les milieux dans un intervalle de temps plus court.

À l'inverse, les résultats des tests menés sur les décomposeurs montrent que les cloportes et les collemboles seraient prompts à coloniser les Technosols construits rapidement après leur installation et à s'y implanter de manière durable. Si l'influence des actions des cloportes n'a pas été évaluée dans le cadre de ce travail, il est à envisager que ces derniers pourraient favoriser la mise en place d'un réseau trophique susceptible d'améliorer la fertilité des Technosols construits. Pour rappel, les cloportes sont des décomposeurs de la matière organique et mettent à disposition, par leur action de macro-fragmentation, divers nutriments essentiels aux activités des micro-organismes. Puisque les actions des organismes du sol aux différents niveaux hiérarchiques conditionnent le fonctionnement du sol et que les groupes de la faune des niveaux hiérarchiques supérieurs sont sensibles et déterminent les activités des niveaux sous-jacents, ces résultats semblent montrer la possible initiation d'une chaîne trophique favorable à l'amélioration de la fertilité des Technosols construits.

Parmi les ingénieurs de l'écosystème, les vers épigés *E. foetida* ont présenté une mortalité totale après 7 jours dans les Technosols construits à t_0 . À t_3 , ces organismes ont présenté une survie comparable à celle du sol témoin dans les modalités incluant une part de bentonite. La capacité de ces organismes à se maintenir dans les modalités d'essai dépendrait donc de leur temps d'évolution. L'absence totale de reproduction aux deux pas de temps suggère cependant que les conditions nécessaires à l'implantation pérenne de communauté

de vers n'étaient toujours pas réunies à t_3 . À l'inverse, les vers épi-anéciques *L. terrestris* ont survécu et se sont reproduits lors de l'expérimentation en microcosmes d'une durée de 6 mois. Ces résultats montrent que les modalités ont permis à ces vers plus sensibles d'assurer leur fitness. Les mêmes observations ont été faites pour le décomposeur *P. scaber* dont la survie a été comparable dans l'ensemble des sols d'essai dès la mise en place des Technosols construits à t_0 .

Finalement, l'analyse de la chaîne trophique a montré que :

- Les **modalités** présentent le fonctionnement biologique de sols jeunes et instables, à savoir (i) une activité biologique extrême et intense essentiellement orientée vers la transformation des matières organiques et le recyclage des nutriments par voie bactérienne, et (ii) une courte chaîne trophique avec absence d'organismes des niveaux supérieurs ;
- L'apport de bentonite joue en faveur d'une stabilisation des modalités avec l'établissement de nématodes bactérovores-autres ;
- L'apport de vers n'induit pas d'effet sur les communautés de nématodes en 6 mois ;
- Le **sol maraîcher témoin** présente un fonctionnement biologique approprié pour un usage en maraîchage, c'est-à-dire, avec une activité biologique élevée, des flux de nutriments équilibrés, des voies de décompositions équilibrées entre voie fongique et voie bactérienne, et une faible pression parasitaire.

CHAPITRE 5 : CONCLUSION ET DISCUSSION

Les chapitres précédents ont visé à évaluer la fonctionnalité de deux Technosols construits à partir de matériaux, de déchets et de sous-produits urbains en prenant en compte différentes modalités pour un usage en maraîchage. Les deux Technosols se différençaient par la présence ou l'absence de bentonite et les modalités par la présence ou l'absence de vers. Des indicateurs physiques, chimiques et biologiques ont été sélectionnés pour analyser les fonctions de production et de support de biodiversité des modalités. Plus spécifiquement, les indicateurs physiques et chimiques ont porté sur le pH, la conductivité électrique, les teneurs en calcaire total et actif, en matière organique, en azote total, le ratio C/N, la CEC, les cations échangeables et la stabilité structurale. Ces indicateurs ont été retenus pour renseigner la capacité des modalités à satisfaire les besoins nutritifs des cultures maraîchères ainsi qu'à leur offrir un milieu favorable au développement de leur système racinaire. Ces analyses ont été complétées par la détermination de paramètres biologiques pour évaluer le fonctionnement des Technosols et leur aptitude à supporter la biodiversité (i.e. cultures maraîchères et organismes de la faune du sol d'intérêt). Ce volet a consisté à évaluer les activités biologiques des Technosols (i.e. respirométrie, biomasse moléculaire fongique, activités enzymatiques), les biomasses des cultures, le taux d'évitement de deux ingénieurs de l'écosystème et deux décomposeurs d'intérêt ainsi que la capacité de trois organismes d'intérêt parmi la pédofaune à assurer leur fitness dans les différentes modalités.

Les résultats ont mis en évidence l'aptitude des modalités à assurer plusieurs fonctions essentielles pour le micro-maraîchage bio-intensif (i.e. production alimentaire et habitat pour divers organismes de la pédofaune d'intérêt). Plus spécifiquement, ils ont confirmé les résultats précédemment acquis dans la littérature scientifique en montrant que les Technosols présentaient des caractéristiques propres aux sols anthropisés, qui provenaient de la nature de leurs matériaux parents. Il s'agissait, à leur mise en place, de sols fortement à très fortement carbonatés, au pH alcalin, avec de faibles réserves nutritives (CEC). Pourtant, dès leur installation, les Technosols ont permis le développement d'un couvert végétal (i.e. phacélie). Au cours du temps, l'analyse de leurs paramètres physico-chimiques et biologiques a mis en évidence l'initiation de premiers processus pédogénétiques favorables à l'amélioration de leur fertilité. Le travail a également permis l'acquisition de nouveaux éléments significatifs quant à la conception et au fonctionnement des Technosols construits à vocation de production alimentaire comme en témoigne l'évolution des Technosols qui a permis la production de cultures maraîchères au cours de deux saisons culturales. L'analyse des denrées produites au cours de la deuxième saison culturale a montré un potentiel agronomique comparable des Technosols construits au sol maraîcher témoin (tant en termes

de quantité que de qualité). Une distinction a toutefois été établie avec, dans l'ensemble, des cultures de meilleure qualité dans les modalités incluant de la bentonite.

L'analyse de la composante biotique a quant à elle permis de montrer que les Technosols étaient susceptibles d'être rapidement colonisés par des organismes pionniers (i.e. décomposeurs micro- et macro-fragmenteurs). Les résultats de ces essais ont également montré que la capacité des Technosols à assurer la fonction d'habitat évoluait favorablement. Néanmoins, après une évolution d'un an, les conditions nécessaires à l'implantation durables des ingénieurs de l'écosystème ne semblent pas réunies (notamment à cause de pH et CE trop élevés). De nouveau, les essais ont montré une propension globale des organismes à se disperser plus facilement dans les modalités avec bentonite que dans celles qui en sont dépourvues. Par ailleurs, l'évaluation de leur chaîne trophique confirme qu'il s'agit de sols jeunes et instables qui ne disposent que d'une faible chaîne trophique avec une activité biologique extrême et intense dominée par les transformations bactériennes des MO. Cette analyse a aussi montré le rôle favorable de la bentonite pour la stabilisation des communautés de nématodes.

Dans l'ensemble, l'effet des vers sur une durée de 6 mois n'a pas été perçu.

Au regard des résultats obtenus après un an de mise en place des Technosols construits, un bilan peut être dressé avec l'idée de réaliser un diagnostic sur la fertilité des modalités étudiées pour la production maraîchère. Ainsi, ce chapitre vise à établir un indice de la qualité des Technosols en attribuant des scores aux 4 modalités (T, TV, TB et TBV). La finalité de ces scores est de savoir si les modalités proposées sont fertiles au regard des attentes du micro-maraîchage bio-intensif, d'identifier leurs forces et leurs faiblesses et de proposer des leviers d'action pour les améliorer. Les acteurs du micro-maraîchage bio-intensif définissent ce système agricole comme durable en raison de son caractère auto-fertile et relativement autonome. Cette définition suppose que pour être diagnostiqué fertile, le sol doit permettre une production satisfaisante et ne nécessiter qu'un faible apport d'intrants (voire nul) – à l'exception des amendements organiques qui constituent l'une des pratiques fondamentales de ce système. L'analyse de la fertilité des sols est classiquement décomposée selon ses composantes physiques, chimiques et biologiques. De ce fait, les paramètres étudiés dans la thèse et retenus pour la création de l'indice ont été regroupés selon ces catégories. Ces dernières ont été complétées par la composante sociétale qui tient compte des faisabilités économiques et environnementales des modalités. L'ensemble des paramètres qui ont permis l'élaboration de l'indice sont regroupés dans la figure 49.



Figure 49 : Ensemble des paramètres physico-chimiques, biologiques et sociétaux sélectionnés pour la création de l'indice de fertilité des modalités

Chaque paramètre a été noté selon un barème de 0 à 3 (0 étant la note la plus faible et 3 la plus élevée). Le tableau 50 présente les notes attribuées à différents intervalles de valeurs pour chacun des paramètres retenus. L'attribution des intervalles ainsi que des notes a été définie dans la mesure du possible à partir de données de la littérature et dans certains cas à partir des expérimentations de la thèse. Les paramètres comme le pH, la conductivité électrique, le ratio C/N et la CEC sont très bien documentés dans la littérature et des intervalles sont facilement identifiés comme bénéfiques ou non pour qualifier un sol de fertile. Ainsi, un sol sera d'autant plus fertile et se verra attribuer une note de 3, que son pH sera compris entre 6,5 et 7,5, qu'il présentera une CE < 1000 $\mu\text{S cm}^{-1}$, un ratio C/N entre 9 et 12 et une CEC > 20 $\text{cmol}^+ \text{kg}^{-1}$. Des notes plus ou moins dégressives seront attribuées lorsque les valeurs de ces paramètres s'écarteront des valeurs optimales. Concernant la teneur en matière organique, les intervalles ont été déterminés à partir de l'indice Z proposé par Rémy et Marin-Lafèche (1974) qui tient compte des teneurs en argile et en CaCO₃ des sols²². Les valeurs comprises entre 1,5 et 2,2 ont été considérées comme optimales (la note maximale de 3 leur a été donnée). En présence d'importants taux de MO combinés à de faibles teneurs en carbonates et en argile, une dévaluation de cet indice a ainsi été appliquée puisque ces conditions sont généralement considérées comme un risque d'augmentation des pressions parasites et des adventices. Les intervalles ainsi que les teneurs optimales en cations échangeables sont également bien documentés (Metson, 1961) et ont été intégrées dans les calculs. Il a été fait le choix de les compléter par l'évaluation des équilibres entre les éléments qui se traduit par les ratios Ca/Mg, K/Mg et (Ca+Mg)/K. La combinaison de ces données permet de vérifier que les sols d'essai disposent de teneurs suffisantes en chacun des cations

²² L'indice Z est calculé à partir de l'équation suivante :
$$\frac{MO}{12+1,4 \times \left(\frac{|A-209|}{100}\right)^{1,6} + \left(\frac{(CaCO_3)^2}{10000}\right) \times \left(0,3 - \left(\frac{(A-209)^2}{806,2}\right)\right)}$$

Avec MO, la teneur en MO (g kg^{-1}), A, la teneur en argile (g kg^{-1}) et CaCO₃, la teneur en CaCO₃ total (g kg^{-1})

d'une part et que les éléments sont à l'équilibre et ne risquent pas de générer de problème d'antagonisme (avec des teneurs excédentaires) d'autre part (Doucet, 2006). La détermination des notes liées aux ratios s'est appuyée sur l'échelle proposée par Doucet (2006) qui considère que le système est à l'équilibre avec des ratios Ca/Mg compris entre 2 et 9, K/Mg entre 0,1 et 0,5 et (Ca+Mg)/K entre 15 et 30. Pour les teneurs en P₂O₅ assimilable, les intervalles proposés par le Comifer (1993) ont été repris et complétés par une limite haute à 0,60 g kg⁻¹ au-delà de laquelle des phénomènes d'antagonismes ont été observés dans les expérimentations de la thèse. Les intervalles de valeurs correspondant à la stabilité structurale des sols ont été définis en tenant compte des classes de stabilité (qui s'appuient sur le diamètre moyen pondéré – MWD) établis dans la norme ISO 10930. D'après cette classification, un sol stable dispose d'un MWD > 2 mm. Pour les autres paramètres considérés, à savoir la respirométrie, la biomasse moléculaire fongique, les activités enzymatiques, la productivité (qui correspond aux biomasses des cultures maraîchères d'hiver) et la survie pour le cloporte *P. scaber*, les intervalles de valeurs et les notes associées ont été déterminés au regard des résultats obtenus dans les expérimentations de la thèse, à défaut de valeurs dans la littérature. Pour cela, basés sur la valeur la plus haute observée parmi les sols d'essais, des intervalles égaux ont été calculés pour chacun des paramètres. Ainsi, un sol sera qualifié de fertile s'il présente une respirométrie > 180 mg kg⁻¹ O₂ j⁻¹, une biomasse moléculaire fongique > 1,5 µg ergostérol g⁻¹, des activités enzymatiques > 3 nmol g⁻¹ min⁻¹, un taux d'évitement des organismes de la pédofaune sélectionnés < 20 %, une survie des vers de terre > 90 % et des cloportes > 50 jours. Une note relative aux aspects sociétaux a finalement été attribuée aux Technosols. Cette note a été déterminée en tenant compte des caractères économiques et environnementaux de mise en œuvre des sols. Un sol dont le coût d'installation et la part de matériaux ne s'inscrivant pas dans le cadre de l'économie circulaire est élevée a ainsi été dévalué.

Ce tableau a permis de synthétiser les résultats de fertilité de chacune des modalités qui sont présentés dans la figure 50. Les scores obtenus (i.e. fertilité moyenne notée sur 3) pour T, TV, TB et TBV correspondent à la moyenne des notes de chaque indicateur. Certains indicateurs (i.e. cations échangeables, activités biologiques, productivité, fonction d'habitat et aspects sociétaux) ont été constitués à partir du regroupement de plusieurs paramètres. Le détail de ces regroupements figure en annexe 5.

Tableau 50 : Notes attribuées aux valeurs des indicateurs physiques, chimiques et biologiques

Indicateurs	Note	0	1	2	3	2	1	0	Références
pH		< 4,5	4,5 – 5,5	5,6 – 6,4	6,5 – 7,5	7,5 – 8	8 – 9	> 9	Baize, 1988 Bruce & Rayment, 1982
CE ($\mu\text{S cm}^{-1}$)					< 1000	1000 - 2000	2000 – 4000	> 4000	Durand, 1983 Machada & Serralheiro, 2017 Maillard, 2001 Maynard <i>et al.</i> , 2007
MO Indice Z		< 1	1 – 1,3	1,3 – 1,5	1,5 – 2,2	2,2 – 2,7	> 2,7		Rémy & Marin-Lafleche, 1974
C/N		< 6	6 – 8	8 – 9	9 – 12	12 – 14	14 – 15	> 15	Damas & Coulon, 2016 LCA, 2008
P ₂ O ₅ assimilable (g kg ⁻¹)		< 0,04	0,04 – 0,08	0,08 – 0,12	0,12 – 0,15	0,15 – 0,30	0,30 – 0,60	> 0,60	Comifer, 1993 Cette étude
CEC (cmol+ kg ⁻¹)		< 6	6 - 12	12 - 20	> 20				Metson, 1961
Stabilité structurale MWD (mm)		< 0,8	0,8 – 1,3	1,3 – 2	> 2				NF EN ISO 10930
Cations échangeables									
CaO		< 0,6	0,6 – 1,4	1,4 – 2,8	> 2,8				Metson, 1961
MgO		0 – 0,12	0,12 – 0,22	0,22 – 0,52	> 0,52				Metson, 1961
K ₂ O		< 0,1	0,1 – 0,14	0,14 – 0,16	> 0,16				Metson, 1961
Na ₂ O		< 0,03	0,03 – 0,1	0,1 – 0,2	> 0,2				Metson, 1961
Ca/Mg		< 0,5	0,5 – 1	1 – 2	2 – 9	9 – 15	15 – 30	> 30	Doucet, 2006
K/Mg		< 0,025	0,025 – 0,05	0,05 – 0,10	0,10 – 0,50	0,5 – 0,75	0,75 – 1	> 1	Doucet, 2006
(Ca+Mg)/K		< 12	12 – 14	14 – 15	15 – 30	30 – 35	35 – 40	> 40	Doucet, 2006
Activités biologiques									
Respirométrie (mg kg ⁻¹ O ₂ j ⁻¹)		0 – 60	60 – 120	120 – 180	> 180				Cette étude
Biomasse moléculaire fongique ($\mu\text{g ergostérols g}^{-1}$)		0 – 0,5	0,5 – 1	1 – 1,5	> 1,5				Cette étude
Activités enzymatiques (nmol g ⁻¹ min ⁻¹)		0 – 1	1 – 2	2 – 3	> 3				Cette étude
Fonction d'habitat									
Évitement		> 60%	40 – 60 %	20 – 40 %	0 – 20 %				Calculs d'intervalles égaux à partir de la norme NF ISO 17512-1
Survie <i>E. foetida</i> (% mortalité)		> 50	25 – 50	10 – 25	0 - 10				Calculs d'intervalles égaux à partir de la norme NF ISO 11268-1
Survie <i>P. scaber</i> (Temps de survie moyen en jours)		0 – 15	15 – 35	35 – 50	> 50				Cette étude

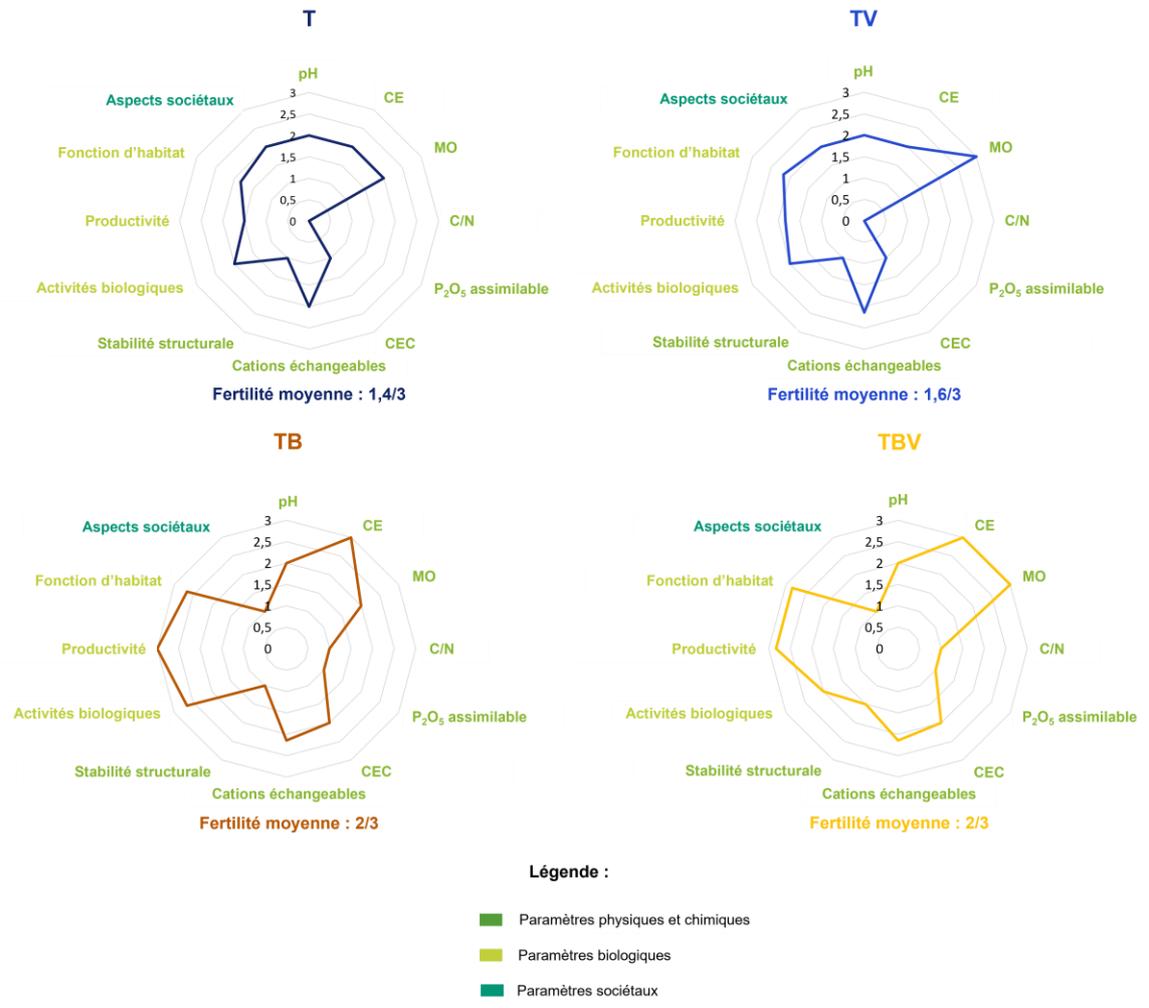


Figure 50 : Représentation en radars de la fertilité des Technosols construits selon les modalités T, TV, TB et TBV.

Les scores de fertilité sont compris entre 1,4 et 2,0 et sont classés comme suit : T (1,4) < TV (1,6) < TB = TBV (2,0). Ces résultats montrent que l'effet de la bentonite est bénéfique puisqu'il améliore la fertilité de 43 % par rapport à T et de 25 % par rapport à TV. L'influence des vers est légère mais perceptible dans les modalités sans bentonite. Elle augmente la fertilité de 14 %. Pour les modalités avec bentonite, la présence des vers ne montre pas de différence importante sur le score final.

Si ces scores reflètent la fertilité des Technosols après leur évolution d'un an, le micro-maraîchage bio-intensif repose sur l'idée selon laquelle la fertilité des sols n'est pas à un état stationnaire et que le sol évolue continuellement sous l'influence de multiples facteurs. Les acteurs de ce modèle considèrent le sol comme un système vivant qu'il convient de soutenir et s'opposent aux pratiques conventionnelles qui, selon eux, limitent leur vision du sol à un réservoir de minéraux solubles à renouveler à mesure qu'il est consommé. Le micro-maraîchage bio-intensif s'applique à améliorer la fertilité des sols en s'affranchissant de l'apport d'amendements minéraux et en s'appuyant uniquement sur des pratiques bénéfiques à la vie du sol et à son enrichissement en matière organique. Les pratiques fondamentales de ce système sont (i) la couverture du sol, (ii) l'apport de matière organique (plutôt que d'engrais), (iii) un travail du sol réduit et des interventions manuelles plutôt que mécaniques, (iv) la mise en place d'un système agroforestier, (v) la proscription de l'application de produits de synthèse, (vi) l'intensité biologique (mise en place de cultures denses et étagées, associations culturales bénéfiques et successions culturales) et (vii) l'instauration d'un agroécosystème complexe (associations des cultures, des arbres, des animaux, abondance de niches écologiques et entretien des interactions) (Hervé-Gruyer & Hervé-Gruyer, 2019). En ce sens, la discussion spécifique des scores attribués aux Technosols construits a inclus la mise en place de tout ou partie de ces pratiques pour améliorer la fertilité de ces sols dans le temps.

La modalité T présente la fertilité moyenne la plus faible (1,4 sur 3). D'un point de vue physico-chimique, il s'agit d'un sol très fortement carbonaté, avec un pH et une CE trop élevés au regard des conditions optimales définies pour un sol fertile. Ces facteurs risquent de limiter le prélèvement en nutriments des cultures. Ils risquent aussi de constituer un frein à l'enracinement des végétaux puisqu'une importante CE peut être le signe de fortes teneurs en sels qui peuvent provoquer une diminution de l'eau facilement disponible, un tassement du milieu et une instabilité structurale (par la dispersion de l'argile). La teneur en MO est en accord avec l'objectif visé de 5%, néanmoins, elle est trop faible par rapport à la texture du sol (i.e. teneur en argile) et à sa teneur en CaCO₃ total. Le ratio C/N de cette modalité est trop élevé, de même que ses teneurs en P₂O₅ assimilable. À l'inverse, sa CEC, et sa stabilité structurale sont trop faibles. De nouveau, ces résultats mettent en évidence un sol avec une faible réserve nutritive et une structure peu favorable à l'ancrage des cultures. Ses teneurs en

MgO, Na₂O et K₂O sont satisfaisantes alors que celles en CaO sont insuffisantes. L'analyse du ratio entre les cations échangeables montre que la répartition des cations est déséquilibrée. Ce sol présente des teneurs trop faibles en Ca²⁺ et trop élevées en K⁺. Ces déséquilibres peuvent être à l'origine de divers inconvénients culturels tels que des phénomènes d'antagonismes ou d'affaiblissement de la stabilité structurale. En effet, en excès, le potassium peut limiter l'assimilation de calcium, magnésium, fer, manganèse ou de zinc par les cultures ; en déficience de calcium, le pouvoir de floculation des colloïdes du sol peut aussi être amoindri (Colomb, 2017). Pour ces raisons, T présente une productivité relativement faible. Outre ces particularités, les activités biologiques de ce sol sont satisfaisantes (égales à celles du témoin), leur fonction d'habitat est trop faible et montre qu'il s'agit toujours d'un milieu inhospitalier pour divers organismes de la faune d'intérêt (pour en améliorer la fertilité). D'un point de vue sociétal, cette modalité présente le score le plus élevé parmi les modalités (2 sur 3). Ce score dépend du coût de mise en œuvre de ce sol ainsi que de sa faisabilité environnementale. L'évaluation du critère de faisabilité environnementale s'est appuyée sur la proportion de matériaux incorporés au sol qui s'inscrivent dans le cadre de l'économie circulaire. Le résultat de cet indice montre que la mise en œuvre de cette modalité est raisonnable tant d'un point de vue économique qu'environnemental. Au bilan, les points forts de ce sol sont ses bonnes teneurs en nutriments, ses activités biologiques relativement proches de celles du témoin et ses aspects sociétaux convenables. Ses faiblesses résident dans de mauvaises répartitions des éléments nutritifs, des teneurs en calcaire et un pH qui constituent un frein au bon développement des cultures maraîchères et à l'implantation de d'organismes de la pédofaune bénéfiques à la fertilité du sol. Pour améliorer la fertilité de T, il conviendrait d'y apporter de la MO afin d'acidifier le milieu et d'en augmenter la CEC et la stabilité structurale. T ayant déjà une forte teneur en P₂O₅, un apport de compost de déchets verts (préférentiellement d'été pour bénéficier de pH plus acide) est à privilégier ; celui-ci présente une faible CE, un pH adéquat et est un amendement à plus faible teneur en P₂O₅ que d'autres (e.g. MO de type déjections animales). Cet apport permettrait d'augmenter les teneurs en Ca²⁺ du sol tout en limitant les apports de K⁺ (déjà trop élevés). Il pourrait également être intéressant d'incorporer une part plus importante de compost de déchets verts dès l'élaboration de cette modalité pour modérer tous les inconvénients perçus à t₃ dans ce sol.

L'apport de vers dans cette modalité (TV) a légèrement amélioré sa fertilité (1,6 par rapport à 1,4). Dans l'ensemble, TV présente les mêmes scores que T pour chacun des paramètres, excepté pour ses teneurs en MO, sa productivité et sa fonction d'habitat. La présence des vers a limité les teneurs en CaCO₃ total de ce sol, ce qui a amélioré le score de l'indice Z. Les vers ont aussi eu un léger effet positif sur les cations échangeables avec un

meilleur équilibre entre les teneurs en K et Mg. Leur présence a également amélioré la dispersion de *E. foetida*. Étant donné que TV est constitué des mêmes matériaux parents que T, ce sol présente les mêmes avantages et inconvénients. Il est de ce fait recommandé d'appliquer les mêmes leviers d'action pour en améliorer la fertilité.

La fertilité moyenne de TB est de 2 sur 3. D'un point de vue physico-chimique, le pH de TB est très légèrement au-dessus des valeurs optimales, sa conductivité électrique est optimale pour la production maraîchère, ses teneurs en MO, sa CEC et ses cations échangeables sont satisfaisants tandis que les scores de son ratio C/N, de ses teneurs en P₂O₅ assimilable et de sa stabilité structurale sont faibles. Ces résultats mettent en évidence que ce sol dispose d'une meilleure réserve en nutriments, plus facilement disponibles pour les cultures maraîchères. Les teneurs en CaO, MgO, Na₂O et K₂O de cette modalité sont optimales. Cependant, les ratios entre cations échangeables montrent que des phénomènes d'antagonismes pourraient intervenir dans le développement des cultures (notamment avec de fortes teneurs en K⁺). Les fortes teneurs en P₂O₅ assimilables pourraient également perturber l'assimilation de certains nutriments (e.g. Fe ou Zn) par les cultures. La bentonite n'a pas révélé la totalité des effets escomptés : elle a permis d'atteindre les teneurs en Ca²⁺ optimales visées et à améliorer la CEC sans toutefois atteindre les objectifs guides. Par ailleurs, son effet sur la stabilité structurale n'est pas suffisant puisque son cortège argileux ne contient qu'une infime partie de smectites (minéraux argileux réputés pour favoriser la stabilité structurale des sols notamment lorsqu'il est saturé en Ca²⁺). Sur le plan biologique, les scores des activités biologiques, de productivité et de fonction d'habitat montrent qu'il s'agit d'un milieu favorable à la biodiversité (végétale et animale). Cette modalité pâtit de son faible score pour les aspects sociétaux puisque le coût de sa mise en œuvre est deux fois plus important que celui de T et TV et qu'elle inclut une part plus importante de matériaux parents qui ne s'inscrivent pas dans le cadre de l'économie circulaire. En résumé, les principaux points forts de TB sont ses activités biologiques, sa productivité et sa fonction d'habitat et, dans une moindre mesure, son pH, sa CE, ses teneurs en MO et sa CEC. Ses principales faiblesses sont son ratio C/N trop élevé, son déséquilibre en nutriments, sa faible stabilité structurale (malgré l'incorporation de bentonite) et ses aspects sociétaux. Pour améliorer la fertilité de TB à t₃, il peut être recommandé d'effectuer un apport de matière organique telle que du compost de déchets verts (préférentiellement d'été). Cet amendement permettrait notamment d'augmenter les teneurs en Ca²⁺, Mg²⁺ et Na⁺ tout en limitant les apports de K⁺ et de P₂O₅ assimilable. Cet apport permettrait également d'augmenter les teneurs en N total et pourrait permettre de diminuer le ratio C/N. Les amendements organiques permettent aussi d'améliorer la stabilité structurale du milieu. Dans l'ensemble, le respect des pratiques du micro-maraîchage bio-intensif devrait suffire à améliorer considérablement la fertilité de TB

dans le temps puisque les principales interventions concernent des apports ponctuels en MO. Après avoir décrit les voies possibles d'amélioration de TB à t_3 , une autre piste est à explorer ; elle consiste à s'intéresser à la composition initiale à t_0 de TB. Il conviendrait de substituer un matériau dont le cortège argileux est dominé par les smectites à la place de la bentonite.

Malgré une forte similarité avec TB en termes notamment de score final (2 sur 3), TBV présente quelques différences. De nouveau, la présence des vers a amélioré le score des teneurs en MO. Les vers ont également eu un effet positif sur la stabilité structurale de cette modalité et sur la dispersion des organismes d'intérêt parmi la pédofaune (avec un meilleur score pour l'évitement de *L. terrestris*). Une influence légèrement négative de leur présence a toutefois pu être observée sur les activités biologiques et sur la productivité puisque les vers ont eu tendance à diminuer la biomasse moléculaire fongique, les activités enzymatiques et la biomasse en épinard. En dépit de ces légères nuances, les mêmes leviers d'action que ceux proposés pour TB sont envisagés pour améliorer la fertilité de TBV.

Le tableau 51 présente la synthèse des conclusions décrites jusqu'à présent pour les 4 modalités étudiées, à savoir leurs forces, leurs faiblesses et les préconisations.

Tableau 51 : Synthèse de la comparaison des modalités en termes de fertilité

Modalité	Forces	Faiblesses et risques associés	Préconisations
T	<ul style="list-style-type: none"> Bonnes teneurs en nutriments, Activités biologiques satisfaisantes, Faisabilité environnementale et économique 	<ul style="list-style-type: none"> Sol calcaire au pH élevé → Problème d'assimilation de nutriments par les cultures CE élevée → Frein à l'enracinement des cultures, limite la disponibilité en eau pour les cultures, peut générer un tassement et une instabilité structurale Déséquilibre entre les nutriments → peut provoquer des phénomènes d'antagonismes Teneurs déficitaires en CaO et excédentaires en K₂O, Faible stabilité structurale → risque d'encroûtement de surface, de ruissellement et d'érosion, Productivité moindre, Faible fonction d'habitat → milieu inhospitalier pour la biodiversité 	<p>Apport de compost de déchets verts pour :</p> <ul style="list-style-type: none"> Acidifier le milieu, Augmenter la CEC et les teneurs en Ca²⁺, Améliorer sa stabilité structurale. <p>Incorporer une part plus importante de compost de déchets verts dès l'élaboration de cette modalité pour modérer tous les inconvénients perçus à t₃ dans ce sol</p>
TV	<ul style="list-style-type: none"> Cf. T Bonnes teneurs en MO 	<ul style="list-style-type: none"> Cf. T 	<ul style="list-style-type: none"> Cf. T Poursuivre les essais pour apprécier l'action des vers à plus long terme
TB	<ul style="list-style-type: none"> Teneurs optimales en CaO, MgO, Na₂O et K₂O → bonne réserve en nutriments, Productivité, Fonction d'habitat → Milieu favorable à l'implantation de la biodiversité pH et CE favorables au développement des cultures 	<ul style="list-style-type: none"> Teneurs en MO trop faibles, Ratio C/N trop élevé, Teneurs en P₂O₅ et en K trop élevées → peuvent provoquer des phénomènes d'antagonismes et limiter l'assimilation en Fe et Zn pour P₂O₅ et en Ca, Mg, Fe et Mn pour K⁺, Faible stabilité structurale → risque d'encroûtement de surface, de ruissellement et d'érosion, Faisabilité environnementale et économique 	<p>Effectuer un apport de matière organique telle que du compost de déchets verts (préférentiellement d'été) pour :</p> <ul style="list-style-type: none"> Augmenter les teneurs en Ca²⁺, Mg²⁺ et Na⁺ tout en limitant les apports de K⁺ et de P₂O₅ assimilable, Augmenter les teneurs en N total, Diminuer le ratio C/N, Améliorer la stabilité structurale du milieu. <p>Le respect des pratiques du micro-maraîchage bio-intensif devrait suffire à améliorer considérablement la fertilité de TB dans le temps puisque les principales interventions concernent des apports ponctuels en MO.</p> <p>Une autre piste consisterait à substituer un matériau dont le cortège argileux est dominé par les smectites à la place de la bentonite dès t₀</p>
TBV	<ul style="list-style-type: none"> Teneurs en MO Cf. TB 	<ul style="list-style-type: none"> Cf. TB (hormis teneurs en MO) 	<ul style="list-style-type: none"> Cf. TB Poursuivre les essais pour apprécier l'action des vers à plus long terme

L'indice de fertilité de cette étude a été créé à partir des paramètres étudiés dans le cadre de la thèse. Il pourrait être enrichi en y incluant d'autres paramètres physico-chimiques couramment analysés pour l'évaluation de la fertilité des sols tels que la densité apparente, la porosité, la réserve facilement utilisable pour les végétaux ou encore le taux de saturation de la CEC. L'étude de ces paramètres permettrait, entre autres, de compléter l'analyse et de

déterminer le volume total accessible à la composante biotique (flore et faune) au sein duquel s'effectuent les transferts de flux de nutriments et d'eau, d'apprécier la réserve nutritive des sols, leur perméabilité, compaction et leur résistance à la pénétration des racines des cultures. L'analyse plus approfondie de la composante biotique pourrait également contribuer à consolider l'indice de fertilité. Divers indicateurs pourraient être observés tels que les diversités taxonomiques et structurelles des communautés fongiques et bactériennes, l'analyse plus spécifique des enzymes du sol (déshydrogénase, phosphatase alcaline, uréase, etc.) ou encore l'abondance des agents pathogènes. Ces analyses permettraient de mieux percevoir et comprendre la diversité biologique et génétique abritée par les sols, l'ensemble de fonctions et de services écosystémiques qui pourraient en résulter ainsi que les éventuels déséquilibres que leur présence implique. Il conviendrait également d'attribuer un poids plus important à certaines variables telles que le pH ou la conductivité électrique compte tenu de leur effet double, tant sur le sol que sur sa composante biotique. Une autre dimension pouvant enfin l'enrichir serait de prendre en compte également l'acceptabilité sociale des modalités. En effet, selon le public concerné, les croyances et les jugements peuvent différer totalement et la modalité qui semble optimale sur le plan des qualités agronomiques n'est peut-être pas la plus simple à faire adopter. Les collectivités territoriales, les entreprises d'aménagement, la population urbaine peuvent évaluer les modalités de manière très différente les uns des autres. Bien que ces paramètres et aspects complémentaires puissent enrichir l'indice de fertilité, ils n'ont pas été intégrés dans la démarche à ce stade du travail puisque l'objectif principal était de rendre le diagnostic accessible à tous, en limitant les analyses nécessitant l'intervention de spécialistes. Si l'approche développée ici a inclus chacune des variables examinées dans le cadre du travail de thèse, la méthode pourrait être davantage aboutie à travers (i) la suppression ou l'ajout de certains indicateurs dont les valeurs influencent ou non le score final attribué à la fertilité des Technosols de manière significative et (ii) l'agrégation des paramètres retenus et leur traduction en fonctions à intégrer directement à la représentation en radar.

Une limite à l'utilisation de ces modalités est leur coût incompressible. Pour le micro-maraîchage bio-intensif pratiqué par Veolia, ces coûts sont acceptables, mais ce n'est pas nécessairement le cas dans un contexte différent, notamment pour des exploitations de plus grandes surfaces (> 1 ha).

À la suite de cette étude, plusieurs perspectives s'ouvrent. La première est une simple prolongation des expérimentations en appliquant les différents leviers d'action proposés et synthétisés dans le tableau 51 ou sous le seul effet des pratiques du micro-maraîchage bio-intensif. La deuxième est une application des modalités *in situ* pour permettre de valoriser des

sites délaissés ; plusieurs questions seraient à étudier dans ce sens : où implanter les Technosols avec, simultanément, un objectif de valorisation de ces sites et une production maraîchère professionnelle ? Que comparer alors dans les résultats entre productions des différents sites (friches industrielles, des toitures urbaines et autres supports) ? Comment implanter les Technosols selon le sol support et son éventuelle contamination (application directe, épaisseur variable, isolation au moyen d'une géomembrane, mise en bacs) ? Quelle serait l'utilité de ces Technosols dans d'autres contextes tels que les jardins ouvriers ? En ce sens, l'acceptabilité sociale peut être particulièrement intéressante à étudier dans ce dernier contexte. La troisième perspective consiste à anticiper l'évolution des Technosols construits sous différents scénarii et conditions (sous les effets du dérèglement climatique, de l'apport de matières organiques, etc.) grâce à la mise en place de test de vieillissement au laboratoire. Ces expérimentations seraient l'opportunité de définir les pratiques les plus propices pour tendre vers une amélioration continue de la fertilité des Technosols en un temps très court.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Abdallah, F. B., Philippe, W., & Goffart, J.-P. (2016). Utilisation de la fluorescence chlorophyllienne pour l'évaluation du statut azoté des cultures (synthèse bibliographique). *Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement*, 20(1), pp. 83-93. doi : 10.25518/1780-4507.12627
- Ahirwal, J., Kumar, A., Pietrzykowski, M., & Maiti, S. K. (2018). Reclamation of coal mine spoil and its effect on Technosol quality and carbon sequestration: A case study from India. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(28), pp. 27992-28003. doi: 10.1007/s11356-018-2789-1
- Ahirwal, J., & Maiti, S. K. (2018). Development of Technosol properties and recovery of carbon stock after 16 years of revegetation on coal mine degraded lands, India. *Catena*, 166, pp. 114-123. doi: 10.1016/j.catena.2018.03.026
- Allen, D. E., Singh, B. P., & Dalal, R. C. (2011). Soil health indicators under climate change: A review of current knowledge. Dans B. P. Singh, A. L. Cowie, & K. Y. Chan, *Soil health and climate change* (p. 25-45). Springer. doi: 10.1007/978-3-642-20256-8_2
- Amundson, R., & Jenny, H. (1997). On a state factor model of ecosystems. *BioScience*, 47(8), pp. 536-543. doi: 10.2307/1313122
- Annabi, M., Houot, S., Francou, C., Poitrenaud, M., & Bissonnais, Y. L. (2007). Soil aggregate stability improvement with urban composts of different maturities. *Soil Science Society of America Journal*, 71(2), pp. 413-423. doi: 10.2136/sssaj2006.0161
- Anses. (2011). *Étude de l'alimentation totale française 2 (EAT 2)*
- Antoni, V. (2011). *L'artificialisation des sols s'opère aux dépens des terres agricoles*
- Araujo, J. H. R., Pando-Bahuon, A., Hartmann, C., Aroui-Boukbida, H., Desjardins, T., & Lerch, T. Z. (2022). Making green(s) with black and white: Constructing soils for urban agriculture using earthworms, organic and mineral wastes. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 10. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fevo.2022.884134>
- Asensio, V., Flórido, F. G., Ruiz, F., Perlatti, F., Otero, X. L., Oliveira, D. P., & Ferreira, T. O. (2019). The potential of a Technosol and tropical native trees for reclamation of copper-polluted soils. *Chemosphere*, 220, pp. 892-899. doi: 10.1016/j.chemosphere.2018.12.190

- Asensio, V., Vega, F. A., Andrade, M. L., & Covelo, E. F. (2013). Technosols made of wastes to improve physico-chemical characteristics of a copper mine soil. *Pedosphere*, 23(1), pp. 1-9. doi: 10.1016/S1002-0160(12)60074-5
- Auclerc, A., Nahmani, J., Huguier, P., Capowiez, Y., Aran, D., & Guérol, F. (2011). Adapting ecotoxicological tests based on earthworm behavior to assess the potential effectiveness of forest soil liming. *Pedobiologia*, 54, pp. S63-S68. doi: 10.1016/j.pedobi.2011.09.011
- Baca, M. T., Delgado, I. C., Sánchez-Raya, A. J., & Gallardo-Lara, F. (1990). Comparative use of cress seed germination and physiological parameters of *Helianthus annuus* L. to assess compost maturation. *Biological Wastes*, 33(4), pp. 251-261. doi: 10.1016/0269-7483(90)90129-G
- Badalíková, B. (2010). Influence of soil tillage on soil compaction. Dans A. P. Dedousis & T. Bartzanas, *Soil Engineering* (p. 19-30). Springer. doi: 10.1007/978-3-642-03681-1_2
- Baize, D. (2018). *Guide des analyses en pédologie*. Editions Quae
- Baize, D., Duval, O., & Richard, G. (2013). *Les sols et leurs structures : Observations à différentes échelles*. Editions Quae
- Baize, D., & Jabiol, B. (1995). *Guide pour la description des sols*. Editions Quae
- Barber, H. S. (1931). Traps for cave-inhabiting insects. *Journal of the Elisha Mitchell Scientific Society*, 46, pp. 259-266.
- Barbier, G. (1955). Essai de définition de la fertilité de la terre. *Économie rurale*, 23(1), pp. 3-6. doi : 10.3406/ecoru.1955.1359
- Barredo, O., Vilela, J., Garbisu, C., Besga, G., Alkorta, I., & Epelde, L. (2020). Technosols made from urban and industrial wastes are a good option for the reclamation of abandoned city plots. *Geoderma*, 377, pp. 114563. doi: 10.1016/j.geoderma.2020.114563
- Bastos, A. C., Verheijen, F. G. A., Amaro, A., Prodana, M., Cardoso, D. N., Morgado, R. G., Santos, M. J., Soares, A. M. V. M., Keizer, J. J., & Loureiro, S. (2022). Screening the habitat function of biochar-amended vineyard soils at field plot-scale, based on invertebrate avoidance behaviour. *Applied Soil Ecology*, 177, pp. 104526. doi: 10.1016/j.apsoil.2022.104526
- Baveye, P., Baveye, J., & Gowdy, J. (2016). Soil “ecosystem” services and natural capital: Critical appraisal of research on uncertain ground. *Frontiers in Environmental Science*, 4(41). doi: 10.3389/fenvs.2016.00041

- Béchet, B., Bissonais, Y. L., Ruas, A., & Schmitt, B. (2017). *Sols artificialisés et processus d'artificialisation des sols : Déterminants, impacts et leviers d'action*
- Beck, L. (1993). Zur Bedeutung der Bodentiere für den Stoffkreislauf in Wäldern. *Biologie in unserer Zeit*, 23(5), pp. 286-294. doi: 10.1002/biuz.19930230505
- Begue, M., Lepage, V., Dien, H., Doligez, P., & Bouchart, V. (2021, Octobre). *Recherche de résidus d'antiparasitaires dans le compost de fumier de cheval* [Poster]. 14ème congrès francophone sur les Sciences Séparatives et les Couplages de l'AFSEP 2021, Paris, France
- Bispo, A. (2009). Le programme ADEME "Bioindicateurs de qualité des sols". *Étude et Gestion des Sols*, 16(3/4), pp. 145-158
- Blanchart, A. (2018) *Vers une prise en compte des potentialités des sols dans la planification territoriale et l'urbanisme opérationnel*. [Thèse de doctorat, Université de Lorraine]
- Booth, L., Heppelthwaite, V., McGlinchy, A. (2000). The effect of environmental parameters on growth, cholinesterase activity and glutathione S-transferase activity in the earthworm (*Apporectodea caliginosa*). *Biomarkers*, 5(1), pp. 46-55. doi: 10.1080/135475000230532
- Bouchard, M.-A. (2022) *Suivi non destructif de l'indice de nutrition azotée par proxi- et télédétection en vue d'un pilotage dynamique et spatialisé de la fertilisation azoté du blé tendre*. [Thèse de doctorat, Université de Lille]
- Bouché, M. (1972). *Lombriciens de France. Ecologie et Systématique*. INRA
- Bouché, M. (1977). Stratégies lombriciennes. *Ecological Bulletins*, 25, pp. 122-132
- Bouché, M. (1994). Les vers de terre. *La recherche*, 15(156), pp. 796-804
- Bourguignon, E. (2018). *Étude agronomique de sol pour la ferme du MIN située à Lille*
- Bouvier, E., & Jammes, D. (2012). *Fertilisation en maraîchage. Chambres d'Agriculture Provence-Alpes-Côte d'Azur*
- Brami, C., Glover, A. R., Butt, K. R., & Lowe, C. N. (2017). Avoidance, biomass and survival response of soil dwelling (endogeic) earthworms to OECD artificial soil: Potential implications for earthworm ecotoxicology. *Ecotoxicology*, 26(4), pp. 576-579. doi: 10.1007/s10646-017-1788-1

- Brigić, A., Antonović, I., Alegro, A., Šegota, V., & Bujan, J. (2017). Terrestrial isopods (Isopoda: Oniscidea) as unexpected inhabitants of extreme habitats. *European Journal of Soil Biology*, 82, pp. 66-71. doi: 10.1016/j.ejsobi.2017.08.009
- Broly, P., Deville, P., & Maillet, S. (2013). The origin of terrestrial isopods (Crustacea: Isopoda: Oniscidea). *Evolutionary Ecology*, 27(3), pp. 461-476. doi: 10.1007/s10682-012-9625-8
- Buondonno, A., Grilli, E., Capra, G. F., Glorioso, C., Langella, A., Leone, A. P., Leone, N., Odierna, P., Vacca, S., & Vigliotti, R. C. (2013). Zeolitized tuffs in pedotechnique for the reclamation of abandoned quarries. A case study in the Campania region (Italy). *Journal of Environmental Management*, 122, pp. 25-30. doi: 10.1016/j.jenvman.2013.02.013
- Burrow, C. (2015). *Influence des modalités de restauration de sols dégradés sur leur colonisation par une faune du sol fonctionnelle* [Thèse de doctorat, Université de Lille].
- Burrow, C., Pernin, C., & Lepretre, A. (2018). Influence of connectivity & topsoil management practices of a constructed technosol on pedofauna colonization: A field study. *Applied Soil Ecology*, 123, pp. 416-419. doi: 10.1016/j.apsoil.2017.12.001
- Calzolari, C., Tarocco, P., Lombardo, N., Marchi, N., & Ungaro, F. (2020). Assessing soil ecosystem services in urban and peri-urban areas: From urban soils survey to providing support tool for urban planning. *Land Use Policy*, 99, pp. 105037. doi: 10.1016/j.landusepol.2020.105037
- Calvaruso, Ch., Blanchart, A., Bertin, S., Grand, C., Pierart, A., & Eglin, T. (2021). Quels paramètres du sol mesurer pour évaluer les fonctions et services écosystémiques associés ? Revue de la littérature et sélection de paramètres en ateliers participatifs. *Étude et Gestion des Sols*, 28, pp. 3-29
- Cannavo, P., Vidal-Beaudet, L., Grosbellet, C., Yilmaz, D., Séré, G., Legret, M., Damas, O., & Peyneau, P. E. (2019). Construction de sols végétalisés à partir de déchets afin de préserver la ressource naturelle «sol». *Innovations Agronomiques*, 45. doi: 10.15454/1.46226533886401E12
- Cardoso, E. J. B. N., Vasconcellos, R. L. F., Bini, D., Miyauchi, M. Y. H., dos Santos, C. A., Alves, P. R. L., de Paula, A. M., Nakatani, A. S., de Moraes Pereira, J., & Nogueira, M. A. (2013). Soil health: Looking for suitable indicators. What should be considered to assess the effects of use and management on soil health? *Scientia Agricola*, 70, pp. 274-289. doi: 10.1590/S0103-90162013000400009

- Cartelat, A., Cerovic, Z. G., Goulas, Y., Meyer, S., Lelarge, C., Prioul, J.-L., Barbottin, A., Jeuffroy, M.-H., Gate, P., Agati, G., & Moya, I. (2005). Optically assessed contents of leaf polyphenolics and chlorophyll as indicators of nitrogen deficiency in wheat (*Triticum aestivum* L.). *Field Crops Research*, *91*(1), pp. 35-49. doi: 10.1016/j.fcr.2004.05.002
- Çelik, H., Aşık, B., Gürel, S., & Katkat, A. (2010). Potassium as an Intensifying Factor for Iron Chlorosis. *International Journal of Agriculture and Biology*, *12*(3), pp. 359-364
- Charman, P., & Murphy, B. (2007). *Soils: Their Properties and Management* (3rd Edition). Oxford University Press
- Chaudhari, S. K., Biswas, P. P., & Kapil, H. (2020). Soil Health and Fertility. In B. B. Mishra (Éd.), *The Soils of India* (pp. 215-231). Springer International Publishing. doi: 10.1007/978-3-030-31082-0_11
- Chelinho, S., Domene, X., Campana, P., Natal-da-Luz, T., Scheffczyk, A., Römbke, J., Andrés, P., & Sousa, J. P. (2011). Improving ecological risk assessment in the Mediterranean area: Selection of reference soils and evaluating the influence of soil properties on avoidance and reproduction of two oligochaete species. *Environmental Toxicology and Chemistry*, *30*(5), pp. 1050-1058. doi: 10.1002/etc.480
- Chenu, C., Le Bissonnais, Y., & Arrouays, D. (2000). Organic matter influence on clay wettability and soil aggregate stability. *Soil Science Society of America Journal*, *64*(4), pp. 1479-1486. doi: 10.2136/sssaj2000.6441479x
- Cheverry, C., & Gascuel, C. (2009). *Sous les pavés la terre : Connaître et gérer les sols urbains*. Omniscience
- Chiffre, A., Moncond'huy, V., & Benard, M. (2019). *Les vers de terre : Une solution biologique curative pour une meilleure infiltration des eaux pluviales dans les ouvrages de gestion intégrée ?*
- Cochrane, T. T., & Cochrane, T. A. (2009). The vital role of potassium in the osmotic mechanism of stomata aperture modulation and its link with potassium deficiency. *Plant Signaling & Behavior*, *4*(3), pp. 240-243
- Coleman, E. (1995). *The new organic grower: A master's manual of tools and techniques for the home and market gardener*. Chelsea Green Publishing Company.
- Colomb, B. (2017). *Guide de la fertilisation raisonnée* (2^{ème} Édition). Éditions France agricole.
- Contreras-Ramos, S. M., Álvarez-Bernal, D., & Dendooven, L. (2009). Characteristics of earthworms (*Eisenia fetida*) in PAHs contaminated soil amended with sewage sludge

- or vermicompost. *Applied Soil Ecology*, 41(3), pp. 269-276. doi: 10.1016/j.apsoil.2008.11.008
- Cortet, J. (2010). *Biodiversité des microarthropodes du sol en agroécosystèmes* [Habilitation à diriger des recherches, Université de Lorraine]
- Cortet, J., Beguiristain, T., Charissou, A. M., Chenot, E. D., Corbel, S., Cluzeau, D., Hafeez, F., Hedde, M., Leyval, C., Martin-Laurent, F., Masfarau, J. F., Nahmani, J., Piron, D., Schwartz, C., Séré, G., Villenave, C., & Watteau, F. (2013). *Early colonisation of a constructed Technosol by soil organisms after industrial site reclamation* [Congrès]. 7th International Conference of the Working Group on Soils in Urban, Industrial, Traffic, Mining and Military Areas (SUITMA) of International Union of Soil Sciences, Torun, Poland
- Coull, M., Butler, B., Hough, R., & Beesley, L. (2021). A geochemical and agronomic evaluation of Technosols made from construction and demolition fines mixed with green waste compost. *Agronomy*, 11(4), pp. 649. doi: 10.3390/agronomy11040649
- Courtney, R., Di Carlo, E., & Schmidt, O. (2020). Soil properties and earthworm populations associated with bauxite residue rehabilitation strategies. *Environmental Science and Pollution Research International*, 27(27), pp. 33401-33409. doi: 10.1007/s11356-018-3973-z
- Cuendet, G., Stähli, R., & Suter, E. (1997). *Die Regenwurm-Fauna von Dauergrünland des Schweizer Mittellandes : Synthesebericht : Vergleichswerte als Interpretationsgrundlage für Regenwurmerhebungen*. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL).
- Dagois, R., Séré, G., Rees, F., Simonnot, M.-O., Morel, J. L., & Schwartz, C. (2016). *Dynamique du carbone organique dans des sols construits à partir de délaissés industriels* [Poster]. Les 13èmes journées d'étude des sols, Louvain-la-Neuve, Belgique
- Damas, O., & Coulon, A. (2016). *Créer des sols fertiles : Du déchet à la végétalisation urbaine*. Le Moniteur.
- David, J.-F., & Handa, I. T. (2010). The ecology of saprophagous macroarthropods (millipedes, woodlice) in the context of global change. *Biological Reviews*, 85(4), pp. 881-895. doi: 10.1111/j.1469-185X.2010.00138.x
- Dazzi, C., & Lo Papa, G. (2021). A new definition of soil to promote soil awareness, sustainability, security and governance. *International Soil and Water Conservation Research*, 10(1), pp. S2095633921000708. doi: 10.1016/j.iswcr.2021.07.001

- de Carné-Carvalet, C. (2021). *Biologie du sol et agriculture durable : Une approche organique et agroécologique* (2^{ème} Édition). Editions France Agricole
- Deeb, M., Desjardins, T., Podwojewski, P., Pando, A., Blouin, M., & Lerch, T. Z. (2017). Interactive effects of compost, plants and earthworms on the aggregations of constructed Technosols. *Geoderma*, 305, pp. 305-313. doi: 10.1016/j.geoderma.2017.06.014
- Deeb, M., Grimaldi, M., Lerch, T. Z., Pando, A., Gigon, A., & Blouin, M. (2016). Interactions between organisms and parent materials of a constructed Technosol shape its hydrostructural properties. *SOIL*, 2(2), pp. 163-174. doi: 10.5194/soil-2-163-2016
- Deeb, M., Grimaldi, M., Lerch, T. Z., Pando, A., Podwojewski, P., & Blouin, M. (2016). Influence of organic matter content on hydro-structural properties of constructed Technosols. *Pedosphere*, 26(4), pp. 486-498. doi: 10.1016/S1002-0160(15)60059-5
- Deeb, M., Groffman, P. M., Blouin, M., Egendorf, S. P., Vergnes, A., Vasenev, V., Cao, D. L., Walsh, D., Morin, T., & Séré, G. (2019). Constructed Technosols are key to the sustainable development of urban green infrastructure. doi: 10.5194/soil-2019-85
- Deeb, M., Groffman, P. M., Blouin, M., Egendorf, S. P., Vergnes, A., Vasenev, V., Cao, D. L., Walsh, D., Morin, T., & Séré, G. (2020). Using constructed soils for green infrastructure – challenges and limitations. *SOIL*, 6(2), pp. 413-434. doi: 10.5194/soil-6-413-2020
- de Groot, R. S., Wilson, M. A., & Boumans, R. M. J. (2002). A typology for the classification, description and valuation of ecosystem functions, goods and services. *Ecological Economics*, 41(3), pp. 393-408. doi: 10.1016/S0921-8009(02)00089-7
- de Paul Obade, V., & Lal, R. (2016). Towards a standard technique for soil quality assessment. *Geoderma*, 265, pp. 96-102. doi: 10.1016/j.geoderma.2015.11.023
- Devliegher, W., & Verstraete, W. (1997). The effect of *Lumbricus terrestris* on soil in relation to plant growth: Effects of nutrient-enrichment processes (NEP) and gut-associated processes (GAP). *Soil Biology and Biochemistry*, 29(3), pp. 341-346. doi: 10.1016/S0038-0717(96)00096-X
- Di Carlo, E., Boullemant, A., & Courtney, R. (2020). Plant available Al and Na in rehabilitated bauxite residue: A field study assessment. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(14), pp. 17023-17031. doi: 10.1007/s11356-020-08225-1
- Dick, R.P. and Kandeler, E. (2005). Enzymes in soils. In Daniel Hillel (Ed.) *Encyclopedia of soils in the environment* (pp. 448-455). Oxford, U.K.: Elsevier Ltd

- Domene, X., Chelinho, S., Campana, P., Alcañiz, J. M., Römbke, J., & Sousa, J. P. (2012). Applying a GLM-based approach to model the influence of soil properties on the toxicity of phenmedipham to *Folsomia candida*. *Journal of Soils and Sediments*, 12(6), pp. 888-899. doi: 10.1007/s11368-012-0502-4
- Domene, X., Chelinho, S., Campana, P., Natal-da-Luz, T., Alcañiz, J. M., Andrés, P., Römbke, J., & Sousa, P. (2011). Influence of soil properties on the performance of *Folsomia candida*: Implications for its use in soil ecotoxicology testing. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 30(7), pp. 1497-1505. doi: 10.1002/etc.533
- Doran, J. W., & Jones, A. J. (1996). *Methods for assessing soil quality*. Madison, WI (USA) Soil Science Society of America
- Doran, J. W., & Parkin, T. B. (1994). Defining and Assessing Soil Quality. In *Defining Soil Quality for a Sustainable Environment* (pp. 1-21). John Wiley & Sons, Ltd. doi: 10.2136/sssaspecpub35.c1
- Doran, J. W., & Parkin, T. B. (1997). Quantitative indicators of soil quality: A minimum data set. In *Methods for assessing soil quality* (pp. 25-37). John Wiley & Sons, Ltd. doi: 10.2136/sssaspecpub49.c2
- Doran, J. W., & Zeiss, M. R. (2000). Soil health and sustainability: Managing the biotic component of soil quality. *Applied Soil Ecology*, 15(1), pp. 3-11. doi: 10.1016/S0929-1393(00)00067-6
- Dossa, J., Togbé, C., Pernaci, M., Agbossou, E., & Ahohuendo, B. (2019). Effet des facteurs de l'environnement sur les *Fusarium* pathogènes des plantes cultivées. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 13(1), pp. 493-502. doi: 10.4314/ijbcs.v13i1.39
- Doucet, R. (2006). *Le climat et les sols agricoles*. Berger
- Drobnik, T., Greiner, L., Keller, A., & Grêt-Regamey, A. (2018). Soil quality indicators – From soil functions to ecosystem services. *Ecological Indicators*, 94, pp. 151-169. doi: 10.1016/j.ecolind.2018.06.052
- Duchaufour, P. (1950). L'humus forestier et les facteurs de sa décomposition. *Revue forestière française*, 9, pp. 479-488. doi: 10.4267/2042/27708
- Duchaufour, P., Faivre, P., Poulenard, J. (2020) *Introduction à la science du sol – Sol, végétation, environnement* (7^{ème} édition). Dunod
- Durand, J. (1983). *Les Sols irrigables : Étude pédologique*. Puf

- Duzan, B. (2010). *Fiche technique relative aux exigences maraîchères*
- Edwards, C.A. (1988) Breakdown of animal, vegetable and industrial organic wastes by earthworms. In: Edwards, C.A. and Neuhauser, E.F., *Earthworms in waste and environmental management* (pp. 21-31), SPB Academic Publishing
- Edwards, C. A., & Bohlen, P. J. (1996). *Biology and ecology of earthworms*. Springer Science & Business Media.
- Effland, W. R., & Pouyat, R. V. (1997). The genesis, classification, and mapping of soils in urban areas. *Urban Ecosystems*, 1(4), pp. 217-228. doi: 10.1023/A:1018535813797
- Eijsackers, H., Lourijsen, N., & Mentink, J. (1983). Effects of fly ash on soil fauna [Article de colloque]. 8th International Soil Zoology Colloquium, Louvain-la-Neuve, Belgique
- Epelde, L., Lanzén, A., Martín, I., Virgel, S., Mijangos, I., Besga, G., & Garbisu, C. (2019). The microbiota of technosols resembles that of a nearby forest soil three years after their establishment. *Chemosphere*, 220, pp. 600-610. doi : 10.1016/j.chemosphere.2018.12.164
- Esoma Okothomas, B. (2019). *Pratiques culturales et sensibilité des sols à l'érosion dans quelques périmètres maraichers de la banlieue de Lubumbashi*
- Estrada-Herrera, I. R., Hidalgo-Moreno, C., Guzmán-Plazola, R., Almaraz Suárez, J. J., Navarro-Garza, H., & Etchevers-Barra, J. D. (2017). Soil quality indicators to evaluate soil fertility. *Agrociencia*, 51(8), pp. 813-831
- Fabbri, D., Pizzol, R., Calza, P., Malandrino, M., Gaggero, E., Padoan, E., & Ajmone-Marsan, F. (2021). Constructed Technosols: A strategy toward a circular economy. *Applied Sciences*, 11(8), pp. 3432. doi: 10.3390/app11083432
- FAO. (2014). *World reference base for soil resources 2014: International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps*
- Félix-Faure, B., Carrière, M., & Kalt, S. (2013, novembre). *Prendre en compte tous les indicateurs de l'acidité des sols pour l'interprétation et le conseil* [Article de colloque]. 11èmes rencontres de la fertilisation raisonnée et de l'analyse COMIFER-GEMAS, Poitiers - Futuroscope
- Fernández, Á., Lacalle, R., Burgo, M. J., Azkuenaga, M., & Lozano, J. (2016). First results of Technosols constructed from municipal waste in Vitoria-Gasteiz (Spain). *Spanish Journal of Soil Science*, 6, pp. 64-81. doi: 10.3232/SJSS.2016.V6.N1.06

- Ferreira, N. G. C., Morgado, R. G., Amaro, A., Machado, A. L., Soares, A. M. V. M., & Loureiro, S. (2016). The effects of temperature, soil moisture and UV radiation on biomarkers and energy reserves of the isopod *Porcellionides pruinosus*. *Applied Soil Ecology*, *107*, pp. 224-236. doi: 10.1016/j.apsoil.2016.06.007
- Filser, J. (2002). The role of collembola in carbon and nitrogen cycling in soil: Proceedings of the Xth international colloquium on apterygota, české budějovice 2000: Apterygota at the beginning of the third millennium. *Pedobiologia*, *46*(3-4), pp. 234-245. doi: 10.1078/0031-4056-00130
- Fonte, S. J., Kong, A. Y. Y., van Kessel, C., Hendrix, P. F., & Six, J. (2007). Influence of earthworm activity on aggregate-associated carbon and nitrogen dynamics differs with agroecosystem management. *Soil Biology and Biochemistry*, *39*(5), pp. 1014-1022. doi: 10.1016/j.soilbio.2006.11.011
- Fonte, S. J., Quintero, D. C., Velásquez, E., & Lavelle, P. (2012). Interactive effects of plants and earthworms on the physical stabilization of soil organic matter in aggregates. *Plant and Soil*, *359*(1), pp. 205-214. doi: 10.1007/s11104-012-1199-2
- Forey, E., Chauvat, M., Coulibaly, S. F. M., Langlois, E., Barot, S., & Clause, J. (2018). Inoculation of an ecosystem engineer (earthworm: *Lumbricus terrestris*) during experimental grassland restoration: Consequences for above and belowground soil compartments. *Applied Soil Ecology*, *125*, pp. 148-155. doi: 10.1016/j.apsoil.2017.12.021
- Fortier, J.-M., & Waridel, L. (2016). *Le jardinier-maraicher - manuel d'agriculture biologique sur petite surface*. Ecosociété
- Fosse, J. (2019). *Objectif « Zéro artificialisation nette » quels leviers pour protéger les sols ?*
- Fourrier, H., Detriché, S., & Douay, F. (2014). *Référentiel régional pédologique de la région Nord-Pas de Calais*
- Fourrier, H., Detriché, S., & Douay, F. (2016). *Référentiel régional pédologique de la région Nord-Pas de Calais à 1/250 000 ; Carte, base de données et notice*
- Fourvel, G. J., Vidal-Beaudet, L., Le Bocq, A., They, F., Brochier, V., & Cannavo, P. (2019). Fertility of Technosols constructed with dam sediments for urban greening and land reclamation. *Journal of Soils and Sediments*, *19*(8), pp. 3178-3192. doi: 10.1007/s11368-018-2077-1

- Främbs, H. (1994). The importance of habitat structure and food supply for carabid beetles (coleoptera, carabidae) in peat bogs. *The Memoirs of the Entomological Society of Canada*, 126(S169), pp. 145-159. doi: 10.4039/entm126169145-1
- Francou, C. (2003). *Stabilisation de la matière organique au cours du compostage de déchets urbains : Influence de la nature des déchets et du procédé de compostage—Recherche d'indicateurs pertinents* [Thèse de doctorat, Institut National Agronomique Paris-Grignon]
- Gil-Sotres, F., Trasar-Cepeda, C., Leirós, M. C., & Seoane, S. (2005). Different approaches to evaluating soil quality using biochemical properties. *Soil Biology and Biochemistry*, 37(5), pp. 877-887. doi: 10.1016/j.soilbio.2004.10.003
- Girard, M.-C., Schvartz, C., & Jabiol, B. (2011). *Étude des sols*. Dunod
- Girard, M.-C., Walter, C., & Rémy, J.-C. (2011). *Sols et environnement : Cours, exercices corrigés et études de cas* (2^{ème} Édition). Dunod
- Gobat, J.-M., Aragno, M., & Matthey, W. (2013). *Le sol vivant : Bases de pédologie - biologie des sols*. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes
- Godet, J.-P. (2010). *Intérêt des isopodes terrestres dans l'évaluation de la qualité des sols : Recherche de paramètres indicateurs de la pollution par des éléments traces métalliques et contribution à la mise au point d'un outil écotoxicologique de terrain* [Thèse de doctorat, Université de Lille]
- Godet, J.-P., Sylvain, D., Waterlot, C., Lemièrre, S., Douay, F., Leprêtre, A., & Pruvot, C. (2009). *Intérêt des isopodes terrestres dans l'évaluation de la qualité des sols : Premiers résultats de travaux réalisés in situ et en laboratoire*
- Golli, S. (2015). *Effets de l'inoculation des vers de terre sur la production du maïs : Expérimentations en milieux paysans*
- Gong, P., Guan, X., & Witter, E. (2001). A rapid method to extract ergosterol from soil by physical disruption. *Applied Soil Ecology*, 17(3), pp. 285-289. doi: 10.1016/S0929-1393(01)00141-X
- González-Alcaraz, M. N., Malheiro, C., Cardoso, D. N., & Loureiro, S. (2019). Soil moisture influences the avoidance behavior of invertebrate species in anthropogenic metal(loid)-contaminated soils. *Environmental Pollution*, 248, pp. 546-554. doi : 10.1016/j.envpol.2019.01.105

- Grard, B. (2017). *Des Technosols construits à partir de produits résiduels urbains : Services écosystémiques fournis et évolution* [Thèse de doctorat, Université Paris-Saclay]
- Grard, B., Chenu, C., Manouchehri, N., Houot, S., Frascaria-Lacoste, N., & Aubry, C. (2017). Rooftop farming on urban waste provides many ecosystem services. *Agronomy for Sustainable Development*, 38(1), pp. 2. doi: 10.1007/s13593-017-0474-2
- Grard, B., Bel, N., Marchal, N., Madre, F., Castell, J.-F., Cambier, P., Houot, S., Manouchehri, N., Besancon, S., Michel, J.-C., Chenu, C., Frascaria-Lacoste, N., & Aubry, C. (2015). Recycling urban waste as possible use for rooftop vegetable garden. *Future of Food: Journal on Food, Agriculture and Society*, 3(1), pp. 21-34
- Grard, B., Manouchehri, N., Aubry, C., Frascaria-Lacoste, N., & Chenu, C. (2020). Potential of Technosols Created with Urban By-Products for Rooftop Edible Production. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(9), pp. 3210. doi: 10.3390/ijerph17093210
- Green, V. S., Stott, D. E., & Diack, M. (2006). Assay for fluorescein diacetate hydrolytic activity: Optimization for soil samples. *Soil Biology and Biochemistry*, 38(4), pp. 693-701. doi: 10.1016/j.soilbio.2005.06.020
- Greiner, L., Keller, A., Grêt-Regamey, A., & Papritz, A. (2017). Soil function assessment: Review of methods for quantifying the contributions of soils to ecosystem services. *Land Use Policy*, 69, pp. 224-237. doi: 10.1016/j.landusepol.2017.06.025
- GREN, Arrêté du 23 décembre 2015 établissant le référentiel régional de mise en œuvre de l'équilibre de la fertilisation azotée pour la région Aquitaine, Annexe 4, pp. 58-59
- Grosbellet, C. (2008). *Évolution et effets sur la structuration du sol de la matière organique apportée en grande quantité* [Thèse de doctorat, Université d'Angers]
- Hafeez, F., Spor, A., Breuil, M.-C., Schwartz, C., Martin-Laurent, F., & Philippot, L. (2012). Distribution of bacteria and nitrogen-cycling microbial communities along constructed Technosol depth-profiles. *Journal of Hazardous Materials*, 231-232, pp. 88-97. doi: 10.1016/j.jhazmat.2012.06.041
- Haines-Young, R., & Potschin, M. (2013). *Common International Classification of Ecosystem Services (CICES): Consultation on Version 4, August-December 2012*
- Hassall, M., Edwards, D. P., Carmenta, R., Derhé, M. A., & Moss, A. (2010). Predicting the effect of climate change on aggregation behaviour in four species of terrestrial isopods. *Behaviour*, 147(2), pp. 151-164

- Hassall, M., & Sutton, S. L. (1978). The role of isopods as decomposers in a dune grassland ecosystem
- Hedde, M., Nahmani, J., Séré, G., Auclerc, A., & Cortet, J. (2019). Early colonization of constructed Technosols by macro-invertebrates. *Journal of Soils and Sediments*, 19(8), pp. 3193-3203. doi: 10.1007/s11368-018-2142-9
- Heimbach, F. (1985). Comparison of laboratory methods, using *Eisenia foetida* and *Lumbricus terrestris*, for the assessment of the hazard of chemicals to earthworms / Vergleich verschiedener Testmethoden mit *Eisenia foetida* und *Lumbricus terrestris* zur Bestimmung des Gefährdungspotentials von Chemikalien für Regenwürmer. Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz / *Journal of Plant Diseases and Protection*, 92(2), pp. 186-193
- Herrmann, D. L., Shuster, W. D., & Garmestani, A. S. (2017). Vacant urban lot soils and their potential to support ecosystem services. *Plant and Soil*, 413(1), pp. 45-57. doi: 10.1007/s11104-016-2874-5
- Hervé-Gruyer, P., & Hervé-Gruyer, C. (2019). *Vivre avec la terre : Manuel des jardiniers-maraîchers*. Actes Sud
- Hinsinger, P. (2010). Les racines au coeur du fonctionnement de la rhizosphère. *Alter Agri*, 101
- Hinsinger, P., Plassard, C., Tang, C., & Jaillard, B. (2003). Origins of root-mediated pH changes in the rhizosphere and their responses to environmental constraints: A review. *Plant and Soil*, 248(1), pp. 43-59. doi: 10.1023/A:1022371130939
- Hopkin, S. P. (2007). *A key to the collembola (springtails) of Britain and Ireland* (1st Edition). Field Studies Council
- Hopkin, S. P., & Martin, M. H. (1984). Heavy metals in woodlice. In Shutton, S. L. and Holdich, D. M., *The biology of terrestrial isopod, proceedings of the symposium of the zoological society of London* (53, pp. 143-166). Clarendon Press
- Hornung, E. (2011). Evolutionary adaptation of oniscidean isopods to terrestrial life: Structure, physiology and behavior. *Terrestrial Arthropod Reviews*, 4(2), pp. 95-130
- Houghtaling, K., & Kight, S. L. (2006). Turn alternation in response to substrate vibration by terrestrial isopods, *Porcellio laevis* (Isopoda : Oniscidea) from rural and urban habitats in New Jersey, U.S.A. *Entomological News*, 117(2), pp. 149-154. doi: 10.3157/0013-872X(2006)117[149:TAIRTS]2.0.CO;2

- Huot, S., Cambier, P., Deschamps, M., Benoit, P., Bodineau, G., Nicolardot, B., Morel, C., Lineres, M., Le Bissonnais, Y., Steinberg, C., Leyval, C., Beguiristain, T., Capowiez, Y., Poitrenaud, M., Lhoutellier, C., Francou, C., Brochier, V., Annabi, M., & Lebeau, T. (2009). Compostage et valorisation par l'agriculture des déchets urbains. *Innovations Agronomiques*, 5, pp. 69-81
- Howard, J. L. (2021). Chapter One—Urban anthropogenic soils—A review. In D. L. Sparks (Éd.), *Advances in Agronomy* (Vol. 165, p. 1-57). Academic Press. doi: 10.1016/bs.agron.2020.08.001
- Hund-Rinke, K., Kördel, W., Hennecke, D., Eisenräger, A., & Heiden, S. (2002). Bioassays for the ecotoxicological and genotoxicological assessment of contaminated soils (results of a round robin test). *Journal of Soils and Sediments*, 2(1), pp. 43-50. doi: 10.1007/BF02991250
- Huot, H., Simonnot, M. O., Watteau, F., Marion, P., Yvon, J., De Donato, P., & Morel, J. L. (2014). Early transformation and transfer processes in a Technosol developing on iron industry deposits. *European Journal of Soil Science*, 65(4), pp. 470-484. doi: 10.1111/ejss.12106
- Huot, H., Simonnot, M.-O., Marion, P., Yvon, J., De Donato, P., & Morel, J.-L. (2013). Characteristics and potential pedogenetic processes of a Technosol developing on iron industry deposits. *Journal of Soils and Sediments*, 13(3), pp. 555-568. doi: 10.1007/s11368-012-0513-1
- Huot, H., Simonnot, M.-O., & Morel, J. (2015). Pedogenetic trends in soils formed in technogenic parent materials. *Soil Science*, 180(4/5), pp. 182-192. doi: 10.1097/SS.0000000000000135
- Igalavithana, A. D., Farooq, M., Kim, K.-H., Lee, Y.-H., Qayyum, M. F., Al-Wabel, M. I., Lee, S. S., & Ok, Y. S. (2017). Determining soil quality in urban agricultural regions by soil enzyme-based index. *Environmental Geochemistry and Health*, 39(6), pp. 1531-1544. doi: 10.1007/s10653-017-9998-2
- lordache, M. (2018). Survival, weight, and prolificacy of *Eisenia fetida* (Savigny 1826) in relation to food type and several soil parameters. *Polish Journal of Environmental Studies*, 27(1), pp. 109-115. doi: 10.15244/pjoes/74902
- Ivashchenko, K., Lepore, E., Ananyeva, N., Khabibulina, F., Vasenev, V., Sushko, S., & Dovletyarova, E. (2019, January). Eco-physiological indicators as an assessment of

- materials quality applied for the urban Technosols construction. In *Geophysical Research Abstracts*, 21
- Jablonska Ceglarek, R. (1976). Irrigation of celeriac and late head cabbage receiving different levels of mineral and organic fertilizers. *Biuletyn Warzywniczy*, 19, pp. 143-155
- Jangorzo, N. S., Watteau, F., Hajos, D., & Schwartz, C. (2015). Nondestructive monitoring of the effect of biological activity on the pedogenesis of a Technosol. *Journal of Soils and Sediments*, 15(8), pp. 1705-1715. doi: 10.1007/s11368-014-1008-z
- Jangorzo, N. S., Watteau, F., & Schwartz, C. (2018). Ranking of wetting–drying, plant, and fauna factors involved in the structure dynamics of a young constructed Technosol. *Journal of Soils and Sediments*, 18(9), pp. 2995-3004. doi: 10.1007/s11368-018-1968-5
- Jangorzo, N. S., Watteau, F., & Schwartz, C. (2013). Evolution of the pore structure of Technosols during early pedogenesis quantified by image analysis. *Geoderma*, 207-208, pp. 180-192. doi: 10.1016/j.geoderma.2013.05.016
- Jänsch, S., Amorim, M. J., & Römbke, J. (2005). Identification of the ecological requirements of important terrestrial ecotoxicological test species. *Environmental Reviews*, 13(2), pp. 51-83. doi : 10.1139/a05-007
- Janus, A. (2017). *Intérêt d'un amendement organo-minéral pour remédier des sols de friches industrielles multicontaminés en milieu urbain* [Thèse de doctorat, Université de Lille]
- Jensen, L. S., McQueen, D. J., Ross, D. J., & Tate, K. R. (1996). Effects of soil compaction on N-mineralization and microbial-C and -N. II. Laboratory simulation. *Soil and Tillage Research*, 38(3), pp. 189-202. doi: 10.1016/S0167-1987(96)01034-3
- Jobbé-Duval, M. (2017). *Produire des légumes biologiques*. Éditions ITAB
- Jochimsen, M. E. (1996). Accelerating vegetation development on mine spoil by means of a thermally cleaned substrate. In J. Pfadenhauer (Éd.), *Verhandlungen Der Gesellschaft Fur Okologie*, 26, pp. 387-397. Gustav Fischer Verlag
- Joimel, S., Cortet, J., Jolivet, C. C., Saby, N. P. A., Chenot, E. D., Branchu, P., Consalès, J. N., Lefort, C., Morel, J. L., & Schwartz, C. (2016). Physico-chemical characteristics of topsoil for contrasted forest, agricultural, urban and industrial land uses in France. *Science of The Total Environment*, 545–546, pp. 40-47. doi: 10.1016/j.scitotenv.2015.12.035
- Joimel, S., Grard, B., Auclerc, A., Hedde, M., Le Doaré, N., Salmon, S., & Chenu, C. (2018). Are Collembola “flying” onto green roofs? *Ecological Engineering*, 111, pp. 117-124. doi: 10.1016/j.ecoleng.2017.12.002

- Joimel, S., Grard, B., Chenu, C., Cheval, P., Mondy, S., Lelièvre, M., Auclerc, A., & Vieublé Gonod, L. (2022). One green roof type, one Technosol, one ecological community. *Ecological Engineering*, 175, pp. 106475. doi: 10.1016/j.ecoleng.2021.106475
- Joimel, S., Schwartz, C., Hedde, M., Kiyota, S., Krogh, P. H., Nahmani, J., Pérès, G., Vergnes, A., & Cortet, J. (2017). Urban and industrial land uses have a higher soil biological quality than expected from physicochemical quality. *Science of The Total Environment*, 584–585, pp. 614-621. doi: 10.1016/j.scitotenv.2017.01.086
- Joimel, S., Schwartz, C., Maurel, N., Magnus, B., Machon, N., Bel, J., & Cortet, J. (2019). Contrasting homogenization patterns of plant and collembolan communities in urban vegetable gardens. *Urban Ecosystems*, 22(3), pp. 553-566. doi : 10.1007/s11252-019-00843-z
- Jutras, G. (2011). *Guide pour l'interprétation d'une analyse de sol*
- Kaplan, D. L., Hartenstein, R., Neuhauser, E. F., & Malecki, M. R. (1980). Physicochemical requirements in the environment of the earthworm *Eisenia foetida*. *Soil Biology and Biochemistry*, 12(4), pp. 347-352. doi: 10.1016/0038-0717(80)90008-5
- Karlen, D. L., Mausbach, M. J., Doran, J. W., Cline, R. G., Harris, R. F., & Schuman, G. E. (1997). Soil quality: A concept, definition, and framework for evaluation (a guest editorial). *Soil Science Society of America Journal*, 61(1), pp. 4-10. doi: 10.2136/sssaj1997.03615995006100010001x
- Kibblewhite, M. g, Ritz, K., & Swift, M. j. (2008). Soil health in agricultural systems. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 363(1492), pp. 685-701. doi: 10.1098/rstb.2007.2178
- Kirkby, E. A., & Pilbeam, D. J. (1984). Calcium as a plant nutrient. *Plant, Cell & Environment*, 7(6), pp. 397-405. doi: 10.1111/j.1365-3040.1984.tb01429.x
- Klok, C., Faber, J., Heijmans, G., Bodt, J., & van der Hout, A. (2007). Influence of clay content and acidity of soil on development of the earthworm *Lumbricus rubellus* and its population level consequences. *Biology and Fertility of Soils*, 43(5), pp. 549-556. doi: 10.1007/s00374-006-0135-0
- Kouakou, K., Bekro, Y.-A., Sika, A., Baize, D., Dogbo, D., Bounakhla, M., zarhy, F., & Macaigne, P. (2008). Diagnostic d'une contamination par les éléments traces métalliques de l'épinard (*Spinacia Oleracea*) cultivé sur des sols maraîchers de la ville D'abidjan (Côte D'ivoire) amendés avec de la fiente de volaille. *European Journal of Scientific Research*, 21, pp. 471-487

- Koull, N. & Halilat. (2016). Effets de la matière organique sur les propriétés physiques et chimiques des sols sableux de la région d'Ouargla (Algérie). *La Revue des Sciences de Gestion*, 23, pp. 9-20
- Kumpiene, J., Lagerkvist, A., & Maurice, C. (2008). Stabilization of As, Cr, Cu, Pb and Zn in soil using amendments – A review. *Waste Management*, 28(1), pp. 215-225. doi: 10.1016/j.wasman.2006.12.012
- Lakhani, K. H., & Satchell, J. E. (1970). Production by *Lumbricus terrestris* (L.). *Journal of Animal Ecology*, 39(2), pp. 473-492. doi: 10.2307/2983
- Lambkin, D. C., Gwilliam, K. H., Layton, C., Canti, M. G., Pearce, T. G., & Hodson, M. E. (2011). Soil pH governs production rate of calcium carbonate secreted by the earthworm *Lumbricus terrestris*. *Applied Geochemistry*, 26, pp. S64-S66. doi: 10.1016/j.apgeochem.2011.03.032
- Lamy, I., Van Oort, F., Dère, C., & Baize, D. (2006). Use of major- and trace-element correlations to assess metal migration in sandy Luvisols irrigated with wastewater. *European Journal of Soil Science*, 57(5), pp. 731-740. doi: 10.1111/j.1365-2389.2005.00765.x
- Laossi, K.-R., Ginot, A., Noguera, D. C., Blouin, M., & Barot, S. (2010). Earthworm effects on plant growth do not necessarily decrease with soil fertility. *Plant and Soil*, 328(1-2), pp. 109-118. doi: 10.1007/s11104-009-0086-y
- Larney, F. J., & Angers, D. A. (2012). The role of organic amendments in soil reclamation: A review. *Canadian Journal of Soil Science*, 92(1), pp. 19-38. doi: 10.4141/cjss2010-064
- Lavelle, P. (2012). Soil as a habitat. In D. H. Wall, R. D. Bardgett, V. Behan-Pelletier, J. E. Herrick, T. H. Jones, K. Ritz, J. Six, D. R. Strong, & W. H. van der Putten (Éds.), *Soil ecology and ecosystem services*. Oxford University Press. doi: 10.1093/acprof:oso/9780199575923.003.0003
- Lehmann, A. (2006). Technosols and other proposals on urban soils for the WRB (World Reference Base for Soil Resources). *International Agrophysics*, 20(2), pp. 129-134
- Lehmann, A., & Stahr, K. (2007). Nature and significance of anthropogenic urban soils. *Journal of Soils and Sediments*, 7(4), pp. 247-260. doi: 10.1065/jss2007.06.235
- Leveau, J. M., & Doligez, P. (2007). *Le compostage de fumier de cheval en élevage*. Les Haras nationaux

- Levin, M. J., Kim, K.-H. J., Morel, J.-L., Burghardt, W., Charzyński, P., & Shaw, R. K. (2017). *Soils within cities: Global approaches to their sustainable management: composition, properties, and functions of soils of the urban environment*. Catena Soil Sciences
- Liang, J., & He, J. (2018). Protective role of anthocyanins in plants under low nitrogen stress. *Biochemical and Biophysical Research Communications*, 498(4), pp. 946-953. doi: 10.1016/j.bbrc.2018.03.087
- Libessart, G., Franck-Néel, C., Branchu, P., & Schwartz, C. (2022). The human factor of pedogenesis described by historical trajectories of land use: The case of Paris. *Landscape and Urban Planning*, 222, pp. 104393. doi: 10.1016/j.landurbplan.2022.104393
- Lindner, R. C., & Harley, C. P. (1944). Nutrient interrelations in lime-induced chlorosis. *Plant Physiology*, 19(3), pp. 420-439. doi: 10.1104/pp.19.3.420
- Liu, G., & Hanlon, E. (2012). Soil pH range for optimum commercial vegetable production. *EDIS*
- Liu, Z., He, C., Zhou, Y., & Wu, J. (2014). How much of the world's land has been urbanized, really? A hierarchical framework for avoiding confusion. *Landscape Ecology*, 29, pp. 763-771. doi: 10.1007/s10980-014-0034-y
- Loué, A. (1987). *Les oligo-éléments en agriculture*. Agri-Nathan International
- Loureiro, S., Soares, A. M. V. M., & Nogueira, A. J. A. (2005). Terrestrial avoidance behaviour tests as screening tool to assess soil contamination. *Environmental Pollution*, 138(1), pp. 121-131. doi : 10.1016/j.envpol.2005.02.013
- Luna-Ramos, L., Lázaro, R., & Solé-Benet, A. (2019, february). *Early evolution of selected Technosols in SE Spain* [Poster]. Geocology and Desertification, from physical to human factors. Proceedings of the International Symposium in memory of Prof Juan Puigdefabregas (EcoDesert), Almería, Spain
- Luo, X., Zhu, L., Xu, G., Zhang, J., Xu, J., Yu, S., & Chen, X. (2022). Effects of acid deposition on the avoidance behavior of *Folsomia candida* (Collembola, Isotomidae). *Soil Ecology Letters*, 4(2), pp. 164-170. doi: 10.1007/s42832-021-0099-x
- Machado, R. M. A., & Serralheiro, R. P. (2017). Soil salinity: effect on vegetable crop growth. Management practices to prevent and mitigate soil salinization. *Horticulturae*, 3(2), pp. 30. doi: 10.3390/horticulturae3020030
- Macia, P., Fernandez-Costas, C., Rodriguez, E., Sieiro, P., Pazos, M., & Sanroman, M. A. (2014). Technosols as a novel valorization strategy for an ecological management of dredged

- marine sediments. *Ecological Engineering*, 67, pp. 182-189. doi: 10.1016/j.ecoleng.2014.03.020
- Magdoff, F. (2001). Concept, components, and strategies of soil health in agroecosystems. *Journal of Nematology*, 33(4), pp. 169-172
- Maharjan, B., Das, S., & Acharya, B. S. (2020). Soil health gap: A concept to establish a benchmark for soil health management. *Global Ecology and Conservation*, 23, pp. e01116. doi: 10.1016/j.gecco.2020.e01116
- Marhan, S., & Scheu, S. (2005). Effects of sand and litter availability on organic matter decomposition in soil and in casts of *Lumbricus terrestris* L. *Geoderma*, 128(1), pp. 155-166. doi: 10.1016/j.geoderma.2004.07.001
- Matos-Moreira, M., Carral, E., Rodríguez, M. T., López-Mosquera, M. E., & Cunha, M. (2012). Survival, body mass change and metal bioaccumulation in *Eisenia fetida* (Oligochaeta: Lumbricidae). *Fresenius Environmental Bulletin*, 21(2a), pp. 441-449
- Mausel, P. W. (1971). Soil quality in Illinois—An example of a soils geography resource analysis. *The Professional Geographer*, 23(2), pp. 127-136. doi: 10.1111/j.0033-0124.1971.00127.x
- Maynard, D. N., Hochmuth, G. J., & Knott, J. E. (2007). *Knott's handbook for vegetable growers* (5th ed). J. Wiley
- McBratney, A. B., Morgan, C. L. S., & Jarrett, L. E. (2017). The value of soil's contributions to ecosystem services. In D. J. Field, C. L. S. Morgan, & A. B. McBratney (Éds.), *Global soil security* (pp. 227-235). Springer International Publishing. doi: 10.1007/978-3-319-43394-3_20
- Mcdaniel, J., Barbarick, K., Stromberger, M., & Cranshaw, W. (2013). Survivability of in response to drought stress in a Colorado soil. *Canadian Journal of Soil Science*, 77, pp. 1667-1672. doi: 10.2136/sssaj2013.02.0064
- Merriam, H. G. (1971). Sensitivity of terrestrial isopod populations (*Armadillidium*) to food quality differences. *Canadian Journal of Zoology*, 49(5), pp. 667-674. doi: 10.1139/z71-105
- Monsérié, M.-F., Watteau, F., Villemin, G., Ouvrard, S., & 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*, 9(6), pp. 537-546. doi: 10.1007/s11368-009-0084-y

- Moore, K. G. (1965). Senescence in leaves of *Acer pseudoplatanus* L. and *Parthenocissus tricuspidata* planch. *Annals of Botany*, 29(3), pp. 433-444. doi: 10.1093/oxfordjournals.aob.a083964
- Morel, J. L., Chenu, C., & Lorenz, K. (2015). Ecosystem services provided by soils of urban, industrial, traffic, mining, and military areas (SUITMAs). *Journal of Soils and Sediments*, 15(8), pp. 1659-1666. doi: 10.1007/s11368-014-0926-0
- Morel, J. L., Schwartz, C., Florentin, L., & de Kimpe, C. (2005). Urban soils. In D. Hillel (Éd.), *Encyclopedia of soils in the environment* (pp. 202-208). Elsevier. doi: 10.1016/B0-12-348530-4/00305-2
- Morgado, R., Ferreira, N. G. C., Cardoso, D. N., Soares, A. M. V. M., & Loureiro, S. (2015). Abiotic factors affect the performance of the terrestrial isopod *Porcellionides pruinosus*. *Applied Soil Ecology*, 95, pp. 161-170. doi: 10.1016/j.apsoil.2015.06.012
- Muhinda, J. J. M., Nzeyimana, I., Bucagu, C., & Culot, M. (2009). Caractérisation physique, chimique et microbiologique de trois sols acides tropicaux du Rwanda sous jachères naturelles et contraintes à leur productivité. *Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement*, 13(4), pp. 545-558
- Mumme, J., Getz, J., Prasad, M., Lüder, U., Kern, J., Mašek, O., & Buss, W. (2018). Toxicity screening of biochar-mineral composites using germination tests. *Chemosphere*, 207, pp. 91-100. doi: 10.1016/j.chemosphere.2018.05.042
- Muñoz-Castelblanco, J. (2011). *Comportement hydromécanique d'un laëss naturel* [Thèse de doctorat, Université Paris-Est]
- Murata, T., & Kawai, N. (2018). Degradation of the urban ecosystem function due to soil sealing: Involvement in the heat island phenomenon and hydrologic cycle in the Tokyo metropolitan area. *Soil Science and Plant Nutrition*, 64(2), pp. 145-155. doi: 10.1080/00380768.2018.1439342
- Nagy, D. D., Magura, T., Horváth, R., Debnár, Z., & Tóthmérész, B. (2018). Arthropod assemblages and functional responses along an urbanization gradient: A trait-based multi-taxa approach. *Urban Forestry & Urban Greening*, 30, pp. 157-168. doi: 10.1016/j.ufug.2018.01.002
- Napoletano, P., Colombo, C., Di Iorio, E., Memoli, V., Panico, S. C., Ruggiero, A. G., Santorufo, L., Maisto, G., & De Marco, A. (2021). Integrated approach for quality assessment of technosols in experimental mesocosms. *Sustainability*, 13(16), pp. 9101. doi: 10.3390/su13169101

- Natal-da-Luz, T., Römbke, J., & Sousa, J. P. (2008). Avoidance tests in site-specific risk assessment—Influence of soil properties on the avoidance response of collembola and earthworms. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 27(5), pp. 1112-1117. doi: 10.1897/07-386.1
- Oldeman, L. R. (1994). *The global extent of soil degradation*
- Ondo, J. A. (2011). *Vulnérabilité des sols maraîchers du Gabon (région de Libreville) : Acidification et mobilité des éléments métalliques* [Thèse de doctorat, Université d'Aix-Marseille 1]
- O'Riordan, R., Davies, J., Stevens, C., Quinton, J. N., & Boyko, C. (2021). The ecosystem services of urban soils: A review. *Geoderma*, 395, pp. 115076. doi: 10.1016/j.geoderma.2021.115076
- Owojori, O. J., & Reinecke, A. J. (2009). Avoidance behaviour of two eco-physiologically different earthworms (*Eisenia fetida* and *Aporrectodea caliginosa*) in natural and artificial saline soils. *Chemosphere*, 75(3), pp. 279-283. doi: 10.1016/j.chemosphere.2008.12.051
- Owojori, O. J., & Reinecke, A. J. (2014). Differences in ionic properties of salts affect saline toxicity to the earthworm *Eisenia fetida*. *Applied Soil Ecology*, 83, pp. 247-252. doi: 10.1016/j.apsoil.2013.05.019
- Owojori, O. J., Reinecke, A. J., & Rozanov, A. B. (2008). Effects of salinity on partitioning, uptake and toxicity of zinc in the earthworm *Eisenia fetida*. *Soil Biology and Biochemistry*, 40(9), pp. 2385-2393. doi: 10.1016/j.soilbio.2008.05.019
- Owojori, O. J., Reinecke, A. J., Voua-Otomo, P., & Reinecke, S. A. (2009). Comparative study of the effects of salinity on life-cycle parameters of four soil-dwelling species (*Folsomia candida*, *Enchytraeus doerjesi*, *Eisenia fetida* and *Aporrectodea caliginosa*). *Pedobiologia*, 52(6), pp. 351-360. doi: 10.1016/j.pedobi.2008.12.002
- Paoletti, M. G., & Hassall, M. (1999). Woodlice (Isopoda: Oniscidea): their potential for assessing sustainability and use as bioindicators. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 74(1), pp. 157-165. doi: 10.1016/S0167-8809(99)00035-3
- Paradelo, R., & Barral, M. T. (2013). Influence of organic matter and texture on the compactability of Technosols. *Catena*, 110, pp. 95-99. doi: 10.1016/j.catena.2013.05.012

- Paré, T., Gregorich, E. G., & Dinel, H. (1997). Effects of stockpiled and composted manures on germination and initial growth of cress (*Lepidium sativum*). *Biological Agriculture & Horticulture*, 14(1), pp. 1-11. doi: 10.1080/01448765.1997.10749914
- Parisi, V. (2001). The biological soil quality, a method based on microarthropods. *Acta Naturalia de L'Ateneo Parmense*, 37, pp. 97-106
- Parisi, V., Menta, C., Gardi, C., Jacomini, C., & Mozzanica, E. (2005). Microarthropod communities as a tool to assess soil quality and biodiversity: A new approach in Italy. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 105(1), pp. 323-333. doi : 10.1016/j.agee.2004.02.002
- Peres, G., Bispo, A., Grand, C., & Galsomies, L. (2009). *Le programme de recherche ADEME "Bioindicateurs de l'état biologique des sols" Ses objectifs, sa mise en œuvre et son déroulement*
- Pescatore, T., Di Nica, V., Finizio, A., Ademollo, N., Spataro, F., Rauso, J., & Patrolecco, L. (2021). Sub-lethal effects of soil multiple contamination on the avoidance behaviour of *Eisenia fetida*. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 226, pp. 112861. doi: 10.1016/j.ecoenv.2021.112861
- Pey, B. (2010). *Contribution de la faune du sol au fonctionnement et à l'évolution des Technosols* [Thèse de doctorat, Université de Lorraine]
- Pey, B., Cortet, J., Capowiez, Y., Nahmani, J., Watteau, F., & Schwartz, C. (2014). Technosol composition affects *Lumbricus terrestris* surface cast composition and production. *Ecological Engineering*, 67, pp. 238-247. doi : 10.1016/j.ecoleng.2014.03.039
- Pey, B., Cortet, J., Watteau, F., Cheynier, K., & Schwartz, C. (2012, août). *Effects of two earthworms from two ecological groups on organic matter dynamics of a constructed Technosol* [Poster]. XVI International colloquium of soil zoology, Coimbra, Portugal
- Pey, B., Cortet, J., Watteau, F., Cheynier, K., & Schwartz, C. (2013). Structure of earthworm burrows related to organic matter of a constructed Technosol. *Geoderma*, 202–203, pp. 103-111. doi: 10.1016/j.geoderma.2013.03.010
- Piggott, J. J., Townsend, C. R., & Matthaei, C. D. (2015). Climate warming and agricultural stressors interact to determine stream macroinvertebrate community dynamics. *Global Change Biology*, 21(5), pp. 1887-1906. doi: 10.1111/gcb.12861
- Potapov, M. (2001). *Synopses on palaeartic collembola: Isotomidae*. Staatliches Museum für Naturkunde

- Pouech, P., Galibardy, C., Loustale, C., & Arribarrouy, E. (2009). *Étude de caractérisation des fumiers de cheval issus de centres équestres afin d'aider à la décision sur les possibilités de valorisation*
- Pouyat, R. V., Yesilonis, I. D., Dombos, M., Szlavecz, K., Setälä, H., Cilliers, S., Hornung, E., Kotze, D. J., & Yarwood, S. (2015). A global comparison of surface soil characteristics across five cities: A test of the urban ecosystem convergence hypothesis. *Soil Science*, *180*(4/5), pp. 136-145. doi : 10.1097/SS.0000000000000125
- Damas, O., De France, P., Grandmougin, B., Chevaleraud, Y., Brun, F., Cannavo, P., Vidal-Beaudet, L., Bataillard, P., Coftier, A., Colombano, S., Coussy, S., Legret, M., Béchet, B., Jean-Soro, L., Peyneau, P.-E., Rayssac, E., Louvet, J.-C., Subileau, J., Séchet, J., Chenon, P., Benbrahim, M., Ruby, C., Schwartz, C., Séré, G., Rokia, S., Guimont, S., Gossiaux, L., Abdelghafour, M., Machinet, G., Villemin, G. (2015). *Procédé de construction de sols à partir de matériaux innovants en substitution à la terre végétale et aux granulats de carrière*. ADEME
- Prosser, J. I. (1997). Microbial processes within the soil. In J.D. van Elsas, J.T. Trevors, and E.M.H. Wellington (eds.) *Modern soil microbiology* (pp. 183-213). Marcel Dekker
- Pruvost, C. (2018). *Potentiel de la Biodiversité dans la construction de Technosols à partir de déchets urbains* [Thèse de doctorat, Université Paris-Est]
- Pruvost, C., Mathieu, J., Nunan, N., Gigon, A., Pando, A., Lerch, T. Z., & Blouin, M. (2020). Tree growth and macrofauna colonization in Technosols constructed from recycled urban wastes. *Ecological Engineering*, *153*, pp. 105886. doi: 10.1016/j.ecoleng.2020.105886
- Pulleman, M., Creamer, R., Hamer, U., Helder, J., Pelosi, C., Pérès, G., & Rutgers, M. (2012). Soil biodiversity, biological indicators and soil ecosystem services—An overview of European approaches. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, *4*(5), pp. 529-538. doi: 10.1016/j.cosust.2012.10.009
- Qiao, Z., Wang, B., Yao, H., Li, Z., Scheu, S., Zhu, Y.-G., & Sun, X. (2022). Urbanization and greenspace type as determinants of species and functional composition of collembolan communities. *Geoderma*, *428*, pp. 116175. doi: 10.1016/j.geoderma.2022.116175
- Reich, P. B., Oleksyn, J., Modrzynski, J., Mrozinski, P., Hobbie, S. E., Eissenstat, D. M., Chorover, J., Chadwick, O. A., Hale, C. M., & Tjoelker, M. G. (2005). Linking litter calcium, earthworms and soil properties: A common garden test with 14 tree species. *Ecology Letters*, *8*(8), pp. 811-818. doi: 10.1111/j.1461-0248.2005.00779.x

- Reid, W., Mooney, H., Cropper, A., Capistrano, D., Carpenter, S., Chopra, K., Dasgupta, P., Dietz, T., Duraiappah, A., Hassan, R., Kaspersen, R., Leemans, R., May, R., Mcmichael, A., Pingali, P., Samper, C., Scholes, R., Watson, R., Zakri, A. H., & Zurek, M. (2005). *Millenium Ecosystem Assessment Synthesis Report*
- Rémy, J., & Marin-Laflèche, A. (1974). L'analyse de terre : Réalisation d'un programme d'interprétation automatique. *Annales Agronomiques*, 25, pp. 607-632
- Reynolds, J. W., Krohn, W. B., & Hordan, G. A. (1977, octobre). Earthworm populations as related to woodcock habitat usage in Central Maine (pp. 135-146) [Article de colloque]. 6th Woodcock Symposium
- Riddle, R., Siebecker, M., Shaw, R., & Scharenbroch, B. (2022). Soils in urban and built environments: Pedogenic processes, characteristics, mapping, and classification. In *Advances in Agronomy*, 173, pp. 227-255. doi: 10.1016/bs.agron.2022.02.004
- Rokia, S. (2014). *Contribution à la modélisation des processus d'agrégation et de transfert d'éléments nutritifs dans les Technosols construits à partir de déchets* [Thèse de doctorat, Université de Lorraine]
- Rokia, S., Séré, G., Schwartz, C., Deeb, M., Fournier, F., Nehls, T., Damas, O., & Vidal-Beaudet, L. (2014). Modelling agronomic properties of Technosols constructed with urban wastes. *Waste Management*, 34(11), pp. 2155-2162. doi : 10.1016/j.wasman.2013.12.016
- Rosen, C. J., & Bierman, P. M. (2005). Nutrient management for fruit & vegetable crop production: Using manure and compost as nutrient sources for vegetable crops. Retrieved from the University of Minnesota Digital Conservancy
- Rossiter, D. G. (2007). Classification of Urban and Industrial Soils in the World Reference Base for Soil Resources. *Journal of Soils and Sediments*, 7(2), pp. 96-100. doi: 10.1065/jss2007.02.208
- Roudaut, J.-P., Gaspard, M., & Boyer, G. (2011). *Les produits organiques utilisables en agriculture en Languedoc-Roussillon : Guide technique : Tome 1*. Chambre régionale d'agriculture du Languedoc-Roussillon
- Ruiz, F., Resmini Sartor, L., de Souza Júnior, V. S., Cheyson Barros dos Santos, J., & Osório Ferreira, T. (2020). Fast pedogenesis of tropical Technosols developed from dolomitic limestone mine spoils (SE-Brazil). *Geoderma*, 374, pp. 114439. doi: 10.1016/j.geoderma.2020.114439

- Rusek, J., & Marshall, V. G. (2000). Impacts of airborne pollutants on soil fauna. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 31(1), pp. 395-423. doi: 10.1146/annurev.ecolsys.31.1.395
- Saltini, A. (1989). *Storia delle scienze agrarie*. Edagricole
- Sandifer, R. D., & Hopkin, S. P. (1996). Effects of pH on the toxicity of cadmium, copper, lead and zinc to *Folsomia candida* Willem, 1902 (Collembola) in a standard laboratory test system. *Chemosphere*, 33(12), pp. 2475-2486. doi: 10.1016/S0045-6535(96)00348-7
- Santorufu, L., Cortet, J., Arena, C., Goudon, R., Rakoto, A., Morel, J.-L., & Maisto, G. (2014). An assessment of the influence of the urban environment on collembolan communities in soils using taxonomy- and trait-based approaches. *Applied Soil Ecology*, 78, pp. 48-56. doi: 10.1016/j.apsoil.2014.02.008
- Santorufu, L., Joimel, S., Auclerc, A., Deremiens, J., Grisard, G., Hedde, M., Nahmani, J., Pernin, C., & Cortet, J. (2021). Early colonization of constructed technosol by microarthropods. *Ecological Engineering*, 162, pp. 106174. doi: 10.1016/j.ecoleng.2021.106174
- Sartori, M., Philippidis, G., Ferrari, E., Borrelli, P., Lugato, E., Montanarella, L., & Panagos, P. (2019). A linkage between the biophysical and the economic: Assessing the global market impacts of soil erosion. *Land Use Policy*, 86, pp. 299-312. doi: 10.1016/j.landusepol.2019.05.014
- Savabi, M., Flanagan, D., Frankenberger, J., Hubbard, B., Bosch, D., & Potter, T. (2011, September). *Development of a WEPP-Water quality (WEPP-WQ) model* [Congrès]. International Symposium on Erosion and Landscape Evolution (ISELE), 18-21, Anchorage, Alaska
- Scalenghe, R., & Ferraris, S. (2009). The first forty years of a Technosol. *Pedosphere*, 19(1), pp. 40-52. doi: 10.1016/S1002-0160(08)60082-X
- Scharenbroch, B. C., & Johnston, D. P. (2011). A microcosm study of the common night crawler earthworm (*Lumbricus terrestris*) and physical, chemical and biological properties of a designed urban soil. *Urban Ecosystems*, 14(1), pp. 119-134. doi: 10.1007/s11252-010-0145-4
- Schlöter, M., Dilly, O., & Munch, J. C. (2003). Indicators for evaluating soil quality. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 98(1), pp. 255-262. doi: 10.1016/S0167-8809(03)00085-9
- Schröder, E., & Henkel, A. (1971). Intensification of head lettuce production by creating optimum conditions for the growth factors. *Gartenbau*, 18(11), pp. 273-275

- Schutter, M., Sandeno, J., & Dick, R. (2001). Seasonal, soil type, and alternative management influences on microbial communities of vegetable cropping systems. *Biology and Fertility of Soils*, 34(6), pp. 397-410. doi: 10.1007/s00374-001-0423-7
- Séré, G. (2007). *Fonctionnement et évolution pédogénétiques de Technosols issus d'un procédé de construction de sol* [Thèse de doctorat, Université de Lorraine]
- Séré, G. (2018). *Mieux connaître la pédogenèse et le fonctionnement des Technosols pour optimiser les services écosystémiques rendus* [Habilitation à diriger des recherches, Université de Lorraine]
- Séré, G., Schwartz, C., Ouvrard, S., Renat, J.-C., Watteau, F., Villemin, G., & Morel, J. L. (2010). Early pedogenic evolution of constructed Technosols. *Journal of Soils and Sediments*, 10(7), pp. 1246-1254. doi: 10.1007/s11368-010-0206-6
- Séré, G., Schwartz, C., Ouvrard, S., Sauvage, C., Renat, J.-C., & Morel, J. L. (2008). Soil construction: A step for ecological reclamation of derelict lands. *Journal of Soils and Sediments*, 8(2), pp. 130-136. doi: 10.1065/jss2008.03.277
- Servant, J. (1971). *Étude pédologique dans la 7ème section des Wateringues du Pas-de-Calais—Secteur de Clairmarais-Schoubrouck*
- Servant, J., & Barthès, J.-P. (1973). *Étude pédologique dans les Wateringues—7ème section du Pas-de-Calais—Secteur : Watten—Saint Omer*
- Seybold, C. A., Herrick, J. E., & Brejda, J. J. (1999). Soil resilience: A fundamental component of soil quality. *Soil Science*, 164(4), pp. 224-234. doi: 10.1097/00010694-199904000-00002
- Seybold, C. A., Mausbach, M. J., Karlen, D. J., & Rogers, H. (1998). Quantification of soil quality. In R. Lal., J. M. Kimble., R. F. Follett., & B. A. Stewart (Éd.), *Soil processes and the carbon cycle* (pp. 387-404). CRC Press
- Shi, B., & Jin, G. (2016). Variability of soil respiration at different spatial scales in temperate forests. *Biology and Fertility of Soils*, 52(4), pp. 561-571. doi: 10.1007/s00374-016-1100-1
- Singer, M. J. (2015). Basic principles of pedology. In *Reference module in earth systems and environmental sciences*. doi: 10.1016/B978-0-12-409548-9.09290-3
- Singer, M. J., & Ewing, S. (2000). Soil quality. In M. E. Sumner, *Handbook of soil science* (pp. 271-298), CRC Press

- Škarková, P., Kos, M., Drobne, D., Vávrová, M., & Jemec, A. (2016). Effects of food salinization on terrestrial crustaceans *Porcellio scaber*. *Applied Soil Ecology*, *100*, pp. 1-7. doi: 10.1016/j.apsoil.2015.11.007
- Smetak, K. M., Johnson-Maynard, J. L., & Lloyd, J. E. (2007). Earthworm population density and diversity in different-aged urban systems. *Applied Soil Ecology*, *37*(1), pp. 161-168. doi: 10.1016/j.apsoil.2007.06.004
- Soltner, D. (2017). *Les bases de la production végétale : Phytotechnie générale : Le sol, le climat, la plante* (Tome I). Sciences Techniques Agricoles
- Souty-Grosset, C., Badenhauer, I., Reynolds, J. D., & Morel, A. (2005). Investigations on the potential of woodlice as bioindicators of grassland habitat quality. *European Journal of Soil Biology*, *41*(3), pp. 109-116. doi: 10.1016/j.ejsobi.2005.09.009
- Spurgeon, D. J., & Hopkin, S. P. (1996). Effects of variations of the organic matter content and pH of soils on the availability and toxicity of zinc to the earthworm *Eisenia fetida*. *Pedobiologia*, *40*, pp. 80-96
- Spurgeon, D. J., Weeks, J. M., & Van Gestel, C. A. M. (2003). A summary of eleven years progress in earthworm ecotoxicology: The 7th international symposium on earthworm ecology · Cardiff · Wales · 2002. *Pedobiologia*, *47*(5), pp. 588-606. doi: 10.1078/0031-4056-00234
- Steckerman, T., Douay, F., Baize, D., Fourrier, H., & Proix, N. (2002). *Référentiel pédogéochimique du Nord-Pas de Calais*
- Sterzyńska, M., Nicia, P., Zadrożny, P., Fiera, C., Shrubovych, J., & Ulrich, W. (2018). Urban springtail species richness decreases with increasing air pollution. *Ecological Indicators*, *94*, pp. 328-335. doi: 10.1016/j.ecolind.2018.06.063
- Stewart, A. J., Chapman, W., Jenkins, G. I., Graham, I., Martin, T., & Crozier, A. (2001). The effect of nitrogen and phosphorus deficiency on flavonol accumulation in plant tissues. *Plant, Cell & Environment*, *24*(11), pp. 1189-1197. doi: 10.1046/j.1365-3040.2001.00768.x
- Stone, D., Ritz, K., Griffiths, B. G., Orgiazzi, A., & Creamer, R. E. (2016). Selection of biological indicators appropriate for European soil monitoring. *Applied Soil Ecology*, *97*, pp. 12-22. doi: 10.1016/j.apsoil.2015.08.005
- Styrishave, B., Hartnik, T., Christensen, P., Andersen, O., & Jensen, J. (2010). Influence of soil type and organic matter content on the bioavailability, accumulation, and toxicity of

- α -cypermethrin in the springtail *Folsomia candida*. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 29(5), pp. 1084-1090. doi: 10.1002/etc.127
- Taylor, M. D., Kim, N. D., Hill, R. B., & Chapman, R. (2010). A review of soil quality indicators and five key issues after 12 yr soil quality monitoring in the Waikato region. *Soil Use and Management*, 26(3), pp. 212-224. doi: 10.1111/j.1475-2743.2010.00276.x
- Temgoua, E., Tsafack, H. N., Pfeifer, H. R., & Njine, T. (2015). Teneurs en éléments majeurs et oligoéléments dans un sol et quelques cultures maraîchères de la ville de Dschang, Cameroun. *African Crop Science Journal*, 23(1), pp. 35-44. doi: 10.4314/acsj.v23i1
- Teurki, R. (2013). *Les effluents d'élevage : Mieux les connaître pour bien les valoriser*. Chambres d'agriculture du Nord-Pas de Calais et de la Somme
- Topp, W. (1981). *Biologie der Bodenorganismen*. Quelle & Meyer
- Turbé, A., De Toni, A., Benito, P., Lavelle, P., Lavelle, P., Ruiz Camacho, N., Van Der Putten, W. H., Labouze, E., & Mudgal, S. (2010). *Soil biodiversity: Functions, threats and tools for policy makers*
- Turkoglu, N. (2010). Analysis of urban effects on soil temperature in Ankara. *Environmental Monitoring and Assessment*, 169(1), pp. 439-450. doi: 10.1007/s10661-009-1187-z
- Ulrich, S., Willaredt, M., Nehls, T., & van Schaik, L. (2021). Do earthworms (*D. veneta*) influence plant-available water in technogenic soil-like substrate from bricks and compost? *Journal of Soils and Sediments*, 21, pp. 2013-2024. doi: 10.1007/s11368-020-02772-3
- Van Gestel, C. A. M., Loureiro, S., & Zidar, P. (2018). Terrestrial isopods as model organisms in soil ecotoxicology: A review. *ZooKeys*, 801, pp. 127-162. doi: 10.3897/zookeys.801.21970
- Vergnes, A., Blouin, M., Muratet, A., Lerch, T. Z., Mendez-Millan, M., Rouelle-Castrec, M., & Dubs, F. (2017). Initial conditions during Technosol implementation shape earthworms and ants diversity. *Landscape and Urban Planning*, 159, pp. 32-41. doi: 10.1016/j.landurbplan.2016.10.002
- Verhallen, A., & Roddy, E. (2002). *Irrigation des cultures légumières*. Ministère de l'agriculture, de l'alimentation et des affaires rurales du Canada
- Vidal-Beaudet, L. (2018). Du déchet au Technosol fertile : l'approche circulaire du programme français de recherche SITERRE. *VertigO – la revue électronique en science de l'environnement* [En ligne], Hors-série 31. doi : 10.4000/vertigo.21887

- Vidal-Beaudet, L., Rokia, S., Nehls, T., & Schwartz, C. (2018). Aggregation and availability of phosphorus in a Technosol constructed from urban wastes. *Journal of Soils and Sediments*, 18(2), pp. 456-466. doi: 10.1007/s11368-016-1469-3
- Villenave, C., Jimenez, A., Guernion, M., Pérès, G., Cluzea, D., Mateille, T., Martiny, B., Fargette, M., & Tavoillot, J. (2013). Nematodes for soil quality monitoring: Results from the RMQS BioDiv Programme. *Open Journal of Soil Science*, 3(1), pp. 30-45. doi: 10.4236/ojss.2013.31005
- Violle, C., Navas, M.-L., Vile, D., Kazakou, E., Fortunel, C., Hummel, I., & Garnier, E. (2007). Let the concept of trait be functional! *Oikos*, 116(5), pp. 882-892. doi: 10.1111/j.0030-1299.2007.15559.x
- Waalewijn-Kool, P. L., Ortiz, M. D., Lofts, S., & van Gestel, C. A. M. (2013). The effect of pH on the toxicity of zinc oxide nanoparticles to *Folsomia candida* in amended field soil. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 32(10), pp. 2349-2355. doi: 10.1002/etc.2302
- Walter, C., Bispo, A., Chenu, C., Langlais, A., & Schwartz, C. (2015). Les services écosystémiques des sols : Du concept à sa valorisation. *Cahiers Demeter*, 15, pp. 53-68
- Warman, P. R. (1999). Evaluation of seed germination and growth tests for assessing compost maturity. *Compost Science & Utilization*, 7(3), pp. 33-37. doi: 10.1080/1065657X.1999.10701972
- Watkinson, A. D., Lock, A. S., Beckett, P. J., & Spiers, G. (2017). Developing manufactured soils from industrial by-products for use as growth substrates in mine reclamation. *Restoration Ecology*, 25(4), pp. 587-594. doi: 10.1111/rec.12464
- Watteau, F., Jangorzo, N. S., & Schwartz, C. (2019). A micromorphological analysis for quantifying structure descriptors in a young constructed Technosol. *Boletín de La Sociedad Geológica Mexicana*, 71(1), pp. 11-20. doi: 10.18268/BSGM2019v71n1a2
- Watteau, F., Jangorzo, N.-S., Hajos, D., & Schwartz, C. (2014, octobre). Biological activity impact on Technosol aggregates dynamics: In situ visualization and quantification during a 14 months experimentation [Poster]. BGSi, International symposium of german priority programme SPP 1315 on biogeochemical interfaces in soil – toward a comprehensive and mechanistic understanding of soil functions
- Watteau, F., Séré, G., Huot, H., Rees, F., Schwartz, C., & Morel, J.-L. (2018). Micropedology to reveal pedogenetic processes in Technosols. *Spanish Journal of Soil Science*, 8(2), pp. 149-163. doi: 10.3232/SJSS.2018.V8.N2.02

- Weisskopf, P., Reiser, R., Rek, J., & Oberholzer, H.-R. (2010). Effect of different compaction impacts and varying subsequent management practices on soil structure, air regime and microbiological parameters. *Soil and Tillage Research*, *111*(1), pp. 65-74. doi: 10.1016/j.still.2010.08.007
- Wood, M., & Litterick, A. M. (2017). Soil health – What should the doctor order? *Soil Use and Management*, *33*(2), pp. 339-345. doi: 10.1111/sum.12344
- Wu, J., Ren, Z., Zhang, C., Motelica-Heino, M., Deng, T., Wang, H., & Dai, J. (2020). Effects of soil acid stress on the survival, growth, reproduction, antioxidant enzyme activities, and protein contents in earthworm (*Eisenia fetida*). *Environmental Science and Pollution Research*, *27*, pp. 33419-33428. doi: 10.1007/s11356-019-04643-y
- Yang, Y., Li, T., Pokharel, P., Liu, L., Qiao, J., Wang, Y., An, S., & Chang, S. X. (2022). Global effects on soil respiration and its temperature sensitivity depend on nitrogen addition rate. *Soil Biology and Biochemistry*, *174*(5), pp. 108814. doi: 10.1016/j.soilbio.2022.108814
- Yilmaz, D., Bouarafa, S., Peyneau, P., Angulo-Jaramillo, R., & Lassabatere, L. (2019). Assessment of hydraulic properties of technosols using Beerkan and multiple tension disc infiltration methods. *European Journal of Soil Science*, *70*(5), pp. 1049-1062. doi: 10.1111/ejss.12791
- Yilmaz, D., Cannavo, P., Séré, G., Vidal-Beaudet, L., Legret, M., Damas, O., & Peyneau, P.-E. (2018). Physical properties of structural soils containing waste materials to achieve urban greening. *Journal of Soils and Sediments*, *18*(2), pp. 442-455. doi: 10.1007/s11368-016-1524-0
- Zimmer, M., & 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. doi: 10.1007/s003740050269

ANNEXE 1 : BESOINS NUTRITIFS ET PH OPTIMAL DU SOL POUR LES CULTURES MARAICHÈRES (DUZAN, 2010)

Cultures	Besoins			Plages pH		
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	Mini	Optimal	Maxi
	en Unité (soit 1 kg ha ⁻¹)					
Ail	121 à 200	31 à 60	121 à 200	5,5	5,8 à 6,8	7,8
Artichaut	201 à 300	61 à 90	301 à 400	5,8	6,0 à 7,1	9
Asperge blanche	51 à 120	20 à 30	61 à 120	6,0	6,2 à 6,8	7,9
Asperge verte	51 à 120	20 à 30	61 à 120	5,9	6,2 à 7,2	8,0
Aubergine	201 à 300	31 à 60	301 à 400	5,5	5,8 à 7,5	8,1
Bette	201 à 300	61 à 90	401 à 500	5,8	5,9 à 7,0	7,5
Betterave rouge	201 à 300	61 à 90	401 à 500	5,6	5,8 à 7,0	7,7
Blette	201 à 300	61 à 90	401 à 500	5,8	5,9 à 7,0	7,5
Cardon	201 à 300	91 à 150	501 à 600	5,8	6,0 à 7,0	7,3
Carotte	30 à 50	20 à 30	121 à 200	5,8	6,0 à 7,0	7,3
Céleri branche	121 à 200	61 à 90	401 à 500	5,8	6,0 à 6,5	7,3
Céleri-rave	121 à 200	61 à 90	121 à 200	5,8	6,0 à 6,5	7,3
Cerfeuil	30 à 50	20 à 30	61 à 120	5,8	6,0 à 7,0	7,3
Chicorée	51 à 120	20 à 30	121 à 200	5,8	6,0 à 7,3	7,3
Chicorée frisée	51 à 120	20 à 30	121 à 200	5,5	6,0 à 7,2	7,6
Chou brocoli à jet	121 à 200	61 à 90	121 à 200	5,7	6,0 à 7,3	7,5
Chou de Bruxelles	121 à 200	20 à 30	121 à 200	5,7	6,0 à 7,3	7,5
Chou-fleur	121 à 200	61 à 90	301 à 400	5,9	6,2 à 7,3	7,5
Chou à choucroute	121 à 200	31 à 60	201 à 300	5,9	6,2 à 7,3	7,5
Chou Pomme	121 à 200	31 à 60	201 à 300	5,9	6,2 à 7,3	7,5
Ciboulette	51 à 120	20 à 30	61 à 120	5,8	6,0 à 7,4	7,8
Concombre	301 à 400	61 à 90	501 à 600	5,8	6,0 à 7,0	7,3
Cornichon	51 à 120	61 à 90	201 à 300	5,8	6,0 à 7,0	7,3
Courgette	121 à 200	31 à 60	121 à 200	5,8	6,0 à 7,2	7,4
Cresson	51 à 120	61 à 90	201 à 300	5,8	6,0 à 7,0	7,4
Crosne du Japon	30 à 50	31 à 60	61 à 120	5,8	6,0 à 7,0	7,4
Echalotte	51 à 120	31 à 60	201 à 300	5,9	6,0 à 6,5	7,9
Endive	51 à 120	61 à 90	301 à 400	5,8	6,0 à 7,0	7,4
Epinard	201 à 300	61 à 90	301 à 400	6,0	6,4 à 7,2	7,5
Fenouil	51 à 120	20 à 30	121 à 200	5,8	6,2 à 7,2	7,5
Fève	30 à 50	61 à 90	201 à 300	5,8	6,2 à 7,4	8,0
Fraisier américain	30 à 50	20 à 30	121 à 200	5,5	6,0 à 7,0	7,3
Fraisier	30 à 50	20 à 30	121 à 200	5,5	6,0 à 7,2	7,3
Haricot filet	30 à 50	61 à 90	121 à 200	5,8	6,1 à 7,1	7,5
Haricot sec	30 à 50	61 à 90	121 à 200	5,8	6,0 à 7,3	8,0
Igname	121 à 200	31 à 60	121 à 200	4,5	5,6 à 6,0	6,9
Laitue	51 à 120	61 à 90	201 à 300	5,8	6,2 à 7,1	7,7
Lentille	30 à 50	31 à 60	61 à 120	5,8	6,0 à 7,3	7,5
Mâche	30 à 50	20 à 30	61 à 120	5,6	6,0 à 7,3	7,9
Maïs doux	51 à 120	61 à 90	61 à 120	5,8	6,0 à 7,0	7,5
Melon	51 à 120	31 à 60	121 à 200	6,0	6,2 à 7,3	7,8
Navet	121 à 200	31 à 60	61 à 120	5,5	6,0 à 6,9	7,2
Oignon	51 à 120	31 à 60	121 à 200	5,5	5,8 à 6,5	7,2
Oseille	51 à 120	31 à 60	121 à 200	5,5	5,8 à 6,3	7,0
Panais	121 à 200	31 à 60	61 à 120	5,5	6,0 à 6,9	7,2
Patate douce	121 à 200	31 à 60	121 à 200	4,5	5,6 à 6,0	6,9
Persil	201 à 300	61 à 90	401 à 500	5,8	6,2 à 6,9	7,3
Piment	51 à 120	31 à 60	121 à 200	5,6	5,8 à 7,4	7,9

Pissenlit	30 à 50	31 à 60	121 à 200	5,5	5,8 à 6,3	7,0
Poireau	121 à 200	31 à 60	201 à 300	5,8	6,0 à 7,0	7,3
Poirée	201 à 300	61 à 90	401 à 500	5,8	5,9 à 7,0	7,5
Pois	30 à 50	61 à 90	121 à 200	5,7	6,0 à 7,5	8,0
Pois chiche	30 à 50	31 à 60	61 à 120	5,8	6,2 à 7,2	7,3
Poivron	121 à 200	31 à 60	201 à 300	5,5	5,8 à 7,4	7,9
Pomme de terre	51 à 120	61 à 90	121 à 200	5,8	6,2 à 7,0	7,3
Radis	30 à 50	20 à 30	61 à 120	5,4	5,8 à 6,9	7,3
Rhubarbe	51 à 120	61 à 90	121 à 200	5,6	5,8 à 6,5	7,2
Salsifis	51 à 120	20 à 30	61 à 120	6,0	6,2 à 7,0	7,3
Scarole	51 à 120	20 à 30	121 à 200	5,8	6,0 à 7,3	7,3
Scorsonère	51 à 120	20 à 30	61 à 120	6,0	6,2 à 7,0	7,3
Tomate	301 à 400	61 à 90	501 à 600	5,8	6,0 à 7,0	7,4
Topinambour	51 à 120	20 à 30	61 à 120	6,0	6,2 à 7,0	7,3

ANNEXE 2 : SYNTHÈSE DES INFORMATIONS RELATIVES AU COMPAGNONNAGE ET AUX MAUVAISES ASSOCIATIONS CULTURALES

Ce légume se marie bien avec

	AIL	AUBERGINE	BETTERAVE	BETTE	CAROTTE	CÉLÉRI	CHICORÉE FRISÉE/SCAROLE	CHICORÉE SAUVAGE	CHOUX	CONCOMBRE	COURGES	COURGETTE	CRESSON	ÉCHALOTE	ÉPINARD	FENOUIL	FÈVE	HARICOT	LAITUE	MÂCHE	MAÏS	MELON	NAVET	OIGNON	PANAI	POIREAU	POIS	POIVRON ET PIMENT	POMME DE TERRE	RADIS	ROQUETTE	TOMATE	FRASE	ANETH	BASILIC	CERFEUIL	CIBOULETTE	CORIANDRE	ESTRAGON	MELISSE	MENTHE	PERSIL	ROMARIN	SAUGE	SARRIETTE	THYM										
AIL	X													X									X	X																																
AUBERGINE		X																										X	X																											
BETTERAVE			X												X																																									
BETTE			X												X																																									
CAROTTE				X												X									X																															
CÉLÉRI				X												X									X																															
CHICORÉE FRISÉE/SCAROLE					X																																																			
CHICORÉE SAUVAGE					X																																																			
CHOUX									X															X																																
CONCOMBRE										X	X												X																																	
COURGES											X	X											X																																	
COURGETTE										X	X												X																																	
CRESSON								X															X																																	
ÉCHALOTE	X																																																							
ÉPINARD		X	X																					X																																
FENOUIL				X	X																																																			
FÈVE																		X																																						
HARICOT																	X																																							
LAITUE					X	X																																																		
MÂCHE																																																								
MAÏS																																																								
MELON									X	X	X																																													
NAVET								X																																																
OIGNON	X																																																							
PANAI				X	X																																																			
POIREAU	X															X																																								
POIS																	X	X																																						
POIVRON ET PIMENT	X																																																							
POMME DE TERRE	X																																																							
RADIS									X				X										X																																	
ROQUETTE													X																																											
TOMATE	X																																																							
CIBOULETTE	X																																																							
CORIANDRE				X	X																																																			
PERSIL				X	X												X																																							

X PLANTES DE LA MÊME FAMILLE FIABILITÉ DE L'INFORMATION FAIBLE FIABILITÉ DE L'INFORMATION MOYENNE FIABILITÉ DE L'INFORMATION FORTE

ANNEXE 3 : PROTOCOLES ANALYTIQUES UTILISES SUR LES MATRICES ETUDIEES

1. Granulométrie (ISO 11277)

L'analyse de la répartition granulométrique des sols permet de les classer en fonction de la proportion des différentes fractions de particules qu'ils contiennent (i.e. argiles, limons et sables). Chacune de ces fractions a un comportement physico-chimique distinct. Un sol a dominante argileuse est par exemple moins sujet à l'érosion tandis qu'un sol majoritairement sableux dispose d'un meilleur drainage. Pour juger de la fertilité d'un sol, il convient ainsi d'observer sa granulométrie et d'évaluer la capacité de ses différentes fractions à assurer la fonction de support pour une production de biomasse alimentaire.

L'analyse a permis de caractériser 5 fractions (argile < 2 μm ; limon fin, de 2 à 20 μm ; limon grossier, de 20 à 50 μm ; sable fin, de 50 à 200 μm et sable grossier, de 200 μm à 2 mm) par tamisage et sédimentation. Pour les matériaux calcaires, l'analyse granulométrique a été réalisée sans décarbonatation.

2. pH eau (NF ISO 10390)

Le pH d'une matrice correspond à son potentiel hydrogène et renseigne son degré d'acidité ou d'alcalinité. L'analyse du pH du sol apporte une première information sur sa fertilité. En effet, le pH du sol conditionne la disponibilité des nutriments et influence donc la capacité des végétaux à les assimiler. Le pH influence par ailleurs divers procédés physiques, chimiques et biologiques (e.g. dégradation de la matière organique, activités biologiques) susceptibles de modifier la fertilité du sol à terme.

Un volume de matière (fraction < 2 mm séchée à 40°C) a été introduit dans 5 fois son volume d'eau osmosée avant d'être placé sur un agitateur magnétique (750 rpm) pendant 1 h. Après une phase de repos de 2 h, le pH de la solution en suspension a été mesuré au moyen d'un pH mètre équipé d'une électrode en verre (Knick Portamess).

3. CaCO₃ total (NF ISO 10693)

L'évaluation de la teneur en CaCO₃ total du sol permet indirectement d'en estimer sa fertilité. Le taux de CaCO₃ total est d'ailleurs étroitement lié au pH du sol. Qu'il se présente sous forme soluble ou insoluble, le calcium est présent dans tous les sols et est issu de l'altération de la roche mère ou des matériaux parentaux dans le cas des Technosols. Soumis à différents processus physico-chimiques, le CaCO₃ libère du calcium soluble, lequel joue un rôle structurant en favorisant la création d'agrégats au sein du complexe argilo-humique des sols.

La teneur en CaCO_3 total a été déterminée au moyen d'un calcimètre Bernard permettant d'estimer le dégagement de CO_2 généré suite à l'ajout de HCl aux échantillons. L'équation simplifiée de la réaction est la suivante :



Pour ce faire, 0,25 g d'échantillon (fraction < 250 μm , séchée à 40°C) a été incorporé dans un ballon à fond plat avant d'être mélangé à 20 mL d'eau (de qualité 2 selon la norme ISO 3696). 7 mL de HCl (37 %) ont été ajoutés à la solution. La teneur en CaCO_3 total a été calculée à l'aide de l'équation suivante :

$$W(\text{CaCO}_3) = \frac{1000 \times m_2 \times (V_1 - V_3)}{m_1 \times (V_2 - V_3)} \times \left(\frac{100 + w(\text{H}_2\text{O})}{100} \right)$$

Avec : $W(\text{CaCO}_3)$ la teneur en carbonates, en g kg^{-1} de matériau ; m_1 la masse de la prise d'essai en g ; m_2 la masse moyenne des étalons du CaCO_3 en g ; V_1 le volume de CO_2 produit par la réaction de la prise d'essai en mL ; V_2 le volume moyen de CO_2 produit par la réaction des étalons carbonate en mL ; V_3 la variation du volume de CO_2 produit par la réaction à blanc et $w(\text{H}_2\text{O})$ la teneur en eau exprimée sous la forme de % en masse sèche.

4. CaCO_3 actif (NF X 31-106)

L'évaluation du CaCO_3 actif complète l'analyse du CaCO_3 total en renseignant la part active du CaCO_3 total quantifié. Cette part active est susceptible de libérer plus rapidement du calcium soluble pouvant favoriser la structuration du complexe argilo-humique.

Le protocole a pour principe la mise en contact d'une prise d'essai (fraction < 2 mm et séchée à 40°C) avec un volume connu et en excès d'une solution d'oxalate d'ammonium puis la détermination de la part du réactif n'ayant pas réagi.

Une masse d'échantillon connue a été introduite dans un tube à centrifuger. Puis, 100 mL d'une solution d'oxalate d'ammonium (0,1 mol L^{-1}) ont été ajoutés. La solution a été placée sur un agitateur rotatif (tube rotator SB3, Stuart, Cole-Parmer) durant 2 h à une température de 20°C ($\pm 2^\circ\text{C}$). À l'issue de l'extraction, le surnageant a été filtré à travers des seringues munies de filtres de porosité 0,45 μm (Minisart NML, Sartorius). 10 mL du filtrat ont été prélevés et transvasés dans une fiole conique avant d'y ajouter 80 mL de H_2SO_4 dilué. Le tout a été porté à 60°C sur une plaque chauffante puis titré à l'aide d'une burette graduée par une solution de KMnO_4 jusqu'à l'obtention d'une coloration rose persistant au moins 1 mn. Le volume de solution de KMnO_4 utilisé lors du titrage a été noté (V_B). L'expression des résultats a été établie à l'aide de la formule suivante :

$$50 \times \left(\frac{V_0}{10} - \frac{V_A}{10} \right) \times \frac{200}{10} \times \frac{100}{2000} \times \frac{c}{0,02} = 250c(V_0 - V_B)$$

Où : 50 est la masse, en mg CaCO₃ ; V₀ est le volume, en mL de solution de KMnO₄ utilisé dans l'essai à blanc ; V_B est le volume, en mL de solution de KMnO₄ utilisé lors du dosage et c est la concentration réelle, exprimée en mol L⁻¹ de la solution titrée de KMnO₄.

5. Conductivité électrique (NF ISO 11265)

La conductivité électrique du sol illustre sa conductance et est inversement proportionnelle à sa résistance électrique. Elle dépend de quatre facteurs : la teneur en eau du sol, sa concentration ionique, la nature de ses matériaux parents et leur agencement ainsi que la température du sol. La conductivité électrique représente également un indicateur de la salinité des sols. Associé à l'échelle établie par Durand (1983), les résultats du degré de salinité d'un sol traduisent sa capacité à supporter des biomasses alimentaires. Selon les classes de sol proposées par ce dernier, il convient de bénéficier d'un sol dont la conductivité électrique ne dépasse pas 2000 μS cm⁻¹ pour palier tout risque de diminution des rendements.

La conductivité électrique (CE) a été mesurée à l'aide d'un conductimètre (914 pH/conductometer, Metrohm). Un échantillon (fraction < 2mm séchée à 40°C) de masse connue a été incorporé dans un tube à centrifuger avant d'être mélangé à 20 mL d'eau bidistillée. Le tube a ensuite été disposé sur un agitateur rotatif à 18 rpm (tube rotator SB3, Stuart, Cole-Parmer) durant 2 h. Le tube a ensuite été mis à centrifuger à 1000 g pendant 10 mn (Rotanta 460 Hettich, Tuttlingen, Allemagne). Le conductimètre a été calibré et la conductivité électrique (μS cm⁻¹) du surnageant a été déterminée en plongeant l'électrode de mesure dans la solution en veillant à ne pas brasser le culot et le surnageant.

6. Humidité résiduelle (NF ISO 11465)

L'humidité résiduelle des différents échantillons a été mesurée afin d'exprimer les résultats d'une partie des déterminations analytiques (i.e. carbonates totaux, calcaire actif, carbone organique, azote total, CEC, bases échangeables, phosphore assimilable, fer, aluminium et manganèse totaux et libres) en fonction de la matière sèche. La mesure de l'humidité résiduelle a reposé sur la différence de masse d'un échantillon (fraction < 250 μm séchée à 40°C).

Pour cette mesure, des récipients en verre (boîtes de Pétri) ont été placés dans une étuve à 105°C pendant 1 h avant d'être disposés dans un dessiccateur pour refroidir. A l'issue de cette étape, la masse (m₀) de chaque récipient a été mesurée puis y a été introduite une quantité connue d'échantillon. La masse de l'ensemble (récipient et échantillon) a été notée (m₁) et le tout a été placé dans une étuve à 105°C jusqu'à ce que la masse se stabilise (≈24 h).

Les contenants ont été à nouveau placés dans un dessiccateur pour procéder à un refroidissement avant de prendre note de la masse finale de l'ensemble (m_2). L'humidité résiduelle (exprimée en g kg^{-1}) a été calculée selon la formule suivante :

$$\text{Humidité résiduelle} = \frac{m_1 - m_2}{m_2 - m_0} \times 1000$$

7. Matière organique

La matière organique (MO) joue un rôle fondamental dans le fonctionnement du sol puisqu'elle fournit l'énergie nécessaire aux micro-organismes, contient les nutriments indispensables à la croissance des végétaux et peut, par le biais de sa dégradation, modifier différents paramètres agronomiques du sol tels que son pH, sa structure ou encore sa porosité. La matière organique est d'ailleurs l'un des constituants essentiels du complexe argilo-humique. Outre l'évaluation de la quantité de matière organique présente dans les sols, il s'avère indispensable de caractériser la nature et les proportions de ses différentes fractions (i.e. lignine, cellulose, hémicellulose, fraction soluble et matière minérale), ceci dans le but d'optimiser les apports organiques en jouant sur la complémentarité des propriétés apportées par chaque fraction.

La matière organique a été évaluée par deux méthodes. La première a consisté à déterminer la proportion de matière organique par oxydation sulfochromique. Cette méthode a été utilisée pour déterminer la teneur en carbone organique et à déduire la quantité de MO par le calcul (facteur de conversion : 1,72). La seconde a été réalisée par perte au feu et visait à déterminer la quantité de matière organique, ceci afin d'exprimer les résultats issus du traitement des échantillons au moyen du protocole de fractionnement biochimique de la matière organique.

a) Par oxydation sulfochromique (ISO 14235)

L'évaluation de la quantité de matière organique par oxydation sulfochromique a été réalisée par le laboratoire SADEF. Le mode opératoire a consisté à placer un échantillon (fraction < 2 mm, séché à 40°C et prétraité conformément à la norme ISO 11464) de masse connue dans un tube de verre jaugé (75 mL, adapté au bloc chauffant) puis à y ajouter successivement 5 mL de $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ ($0,27 \text{ mol L}^{-1}$) et 7,5 mL d' H_2SO_4 (96 %). L'ensemble a été homogénéisé manuellement puis le tube a été placé dans un bloc chauffant à une température de 135°C pendant 30 mn. Il a ensuite été immédiatement refroidi à température ambiante au moyen d'un bain d'eau. 50 mL d'eau bidistillée ont été ajoutés dans le tube et la solution a été de nouveau refroidie dans le bain d'eau avant d'être transvidée dans une fiole jaugée de 100 mL. La solution a été complétée au trait de jauge avec de l'eau et a été mélangée

manuellement. L'ensemble a été laissé au repos pendant 1 h. Une partie du surnageant a été transvasée dans un tube et centrifugée à 2000 g pendant 10 mn. L'absorbance des échantillons a été mesurée à l'aide d'un spectrophotomètre à 585 nm. La teneur en carbone organique (C organique) a été calculée à l'aide de la formule suivante :

$$W_{oc} = \frac{a}{m} \times \frac{(100 + w)}{100}$$

Où : w_{oc} la teneur en C organique du sol (g kg^{-1}) ; a la masse de C organique dans la prise d'essai (mg) ; m la masse de l'échantillon (g) et w la teneur en eau (% fraction massique conformément à l'ISO 11465).

La teneur en matière organique a été exprimée selon le calcul suivant :

$$W_{om} = f \cdot W_{oc}$$

Où : w_{om} la teneur en matière organique (g kg^{-1}) ; w_{oc} la teneur en C organique (g kg^{-1}) et f le facteur de conversion (dont l'importance dépend du type de matière organique présente et peut varier de 1,7 à 2,5 pour les sols agricoles).

b) Par perte au feu (NF EN 15169-2007)

Pour réaliser cette analyse, 1 g de prise d'essai (m_2) séché à 105°C et tamisé à $250 \mu\text{m}$ a été placé dans un creuset de masse connue (m_1) préalablement séché à 105°C . Le creuset a ensuite été disposé dans un four à moufle programmé pour atteindre une température de 650°C durant 3 h. À l'issue de la calcination, le creuset a été placé dans un dessiccateur et pesé après refroidissement (m_3).

Le taux de MO, exprimé en pourcentage de la masse initiale de la prise d'essai a été formulé à l'aide du calcul suivant :

$$\text{Taux de MO} = \frac{[m_2 - (m_3 - m_1)] \times 100}{m_2}$$

Avec : m_1 la masse du creuset vide préalablement séché à 105°C , exprimée en g ; m_2 la masse de la prise d'essai avant calcination, exprimée en g et m_3 la masse de l'ensemble (creuset + prise d'essai après calcination), exprimée en g.

8. N total (Dumas – ISO 13878) et C/N

L'analyse du N total couplée à celle du carbone organique total permet d'établir le rapport C/N lequel est un indicateur utilisé pour estimer la vitesse de minéralisation de l'humus. Il est communément admis qu'un rapport C/N compris entre 8 et 12 illustre une bonne capacité de dégradation de la MO. Lorsque la valeur de ce rapport est inférieure à 8, le

sol présente une dégradation plus rapide de sa matière organique tandis qu'un rapport supérieur à 12 révèle une activité biologique moindre corrélée à un plus faible taux de décomposition de la MO.

Le principe de cette analyse est de chauffer une prise d'essai de masse connue m_1 (fraction < 2 mm, séchée à 40°C) à 900°C en présence d'un gaz de combustion (oxygène gazeux) au sein d'un appareil muni d'un détecteur capable de mesurer l'azote gazeux formé lors de la calcination. La combustion oxyde et/ou volatilise les composés minéraux ou organiques de l'azote de l'échantillon analysé. Les produits issus de ce procédé sont des oxydes d'azote (NO_x) et de l'azote moléculaire N_2 . Toutes les formes d'azote se transforment successivement en N_2 .

La teneur en Ntotal de l'échantillon est déterminée par conductibilité thermique suite à l'étalonnage de l'appareil de combustion, à partir d'un échantillon témoin de composition connue ou de teneur en azote certifiée, et au moyen de la formule suivante :

$$w_N = X_1/m_1 \times (100 + w)/100$$

Où : w_N est la teneur en Ntotal, en mg g^{-1} ; X_1 le résultat brut, en mg de N ; m_1 la masse, en g, de l'échantillon et w le pourcentage de la teneur en eau (fraction massique), déterminé conformément à la norme ISO 11465.

Le rapport C/N a été calculé à partir des valeurs de Corganique et de N totaux.

9. Fractionnement biochimique de la matière organique (FD U 44-162)

En complément de la teneur en matière organique d'un sol, la caractérisation de ses fractions organiques renseigne plus précisément sur le potentiel humique des produits organiques en mélange.

Le principe de cette méthode, initié par Van Soest *et al.* (1985), repose sur l'utilisation successive de détergents : un détergent neutre (Neutral Detergent Fiber - NDF) pour extraire les composés solubles et quantifier les composés pariétaux (fibres totales insolubles) ; un détergent acide (Acid Detergent Fiber - ADF) qui permet de doser la lignine, la cellulose et les résidus de cendres (complexe ligno-cellulosique) par élimination de l'hémicellulose ; un acide fort (Acid Detergent Ligninic – ADL - H_2SO_4 72%) pour le dosage de la lignine et du résidu de cendres par hydrolyse acide de la cellulose. La dernière étape consiste en une calcination du résidu organique qui permet par déduction de doser la lignine et les cendres minérales.

1 g de prise d'essai (fraction <2 mm, séché à 40°C) a été pesé (E) et placé dans un sachet poreux de masse connue (m_1). L'échantillon a été réparti uniformément dans le sachet

avant de le souder à 5 mm du bord à l'aide d'une thermocolleuse. Dans un premier temps, 1800 mL de solution NDF ainsi que 4 mL d' α -amylase thermostable ont été introduits et mis à chauffer à 100°C dans le vase réactionnel d'un Fiber Analyzer. Lorsque la température a été atteinte, le sachet poreux a été placé dans le vase de digestion pendant 1 h puis a été rincé à l'eau osmosée bouillante (100°C). L'opération a été répétée deux fois (sans ajout d' α -amylase pour la dernière répétition). L'échantillon a ensuite été rincé deux fois durant 5 mn dans de l'acétone puis mis à sécher (105°C) pendant une nuit. La masse du sachet a été mesurée (P_1). Dans un second temps, le vase de digestion a été complété avec 1800 mL d'ADF porté à 100°C puis le sachet y a été plongé pour une durée de 1 h. Le sachet a été rincé à l'eau osmosée bouillante trois fois puis à l'acétone à deux reprises avant d'être mis à sécher à 105°C pendant une nuit. Une fois secs, la masse a été déterminée (P_2). Dans un troisième temps, le sachet poreux a été immergé dans de l'acide sulfurique (72 %) durant 3 h et a été agité toutes les 30 mn. La réaction a ensuite été stoppée en procédant au rinçage du sachet à l'eau osmosée bouillante jusqu'à neutralisation de l'acide (vérification au papier pH). Il a été rincé à l'acétone puis placé à l'étuve (105°C) pendant une nuit. Après séchage, la masse (P_3) a été déterminée. Dans la dernière étape du protocole, le sachet a été incinéré, dans un creuset préalablement séché (105°C) et pesé, à une température de 525°C durant 1 h. Le creuset a été récupéré une fois la température du four redescendue à 150°C et a été placé dans un dessiccateur avant d'en caractériser la masse finale (P_4).

L'expression des résultats a été effectuée grâce aux formules suivantes :

$$\begin{aligned}
 - \text{NDF}(\%) &= (P_1 - P_4 - (m_1 * F)) * \frac{100}{E} \\
 - \text{ADF}(\%) &= (P_2 - P_4 - (m_1 * F)) * \frac{100}{E} \\
 - \text{ADL}(\%) &= (P_3 - P_4 - (m_1 * F)) * \frac{100}{E}
 \end{aligned}$$

$$\text{Où : } F = \frac{P_{\text{sac vide}} - P_{\text{cendres sac}}}{P_{\text{sac vide}}}$$

Avec : P_1 la masse de l'échantillon sec et de son sachet après hydrolyse NDF, exprimée en g ; P_2 la masse de l'échantillon sec et de son sachet après hydrolyse ADF, exprimée en g ; P_3 la masse de l'échantillon sec et de son sachet après hydrolyse ADL, exprimée en g ; P_4 la masse du résidu (échantillon et sachet) et de son creuset après incinération, exprimée en g ; m_1 la masse du sachet vide, exprimée en g ; E La masse de la prise d'essai de l'échantillon, exprimée en g et F le facteur de correction dû aux cendres du sachet.

10. P₂O₅ assimilable (Joret-Hébert, NF X 31-161)

Le phosphore est un élément indispensable au développement des végétaux. Il contribue au métabolisme de ces derniers en participant plus particulièrement au stockage et

au transfert d'énergie ou encore à la croissance racinaire. La caractérisation de la teneur en phosphore d'un sol contribue de ce fait à en évaluer la fertilité.

Un échantillon de masse connue ($1 \text{ g} \pm 0,01 \text{ g}$, fraction $< 2 \text{ mm}$ séchée à 40°C) a été introduit dans un tube à centrifuger (50 mL). 25 mL de la solution d'extraction d'oxalate d'ammonium ($0,1 \text{ mol L}^{-1}$) ont été ajoutés et l'ensemble a été immédiatement mis en agitation (tube rotator SB3, Stuart, Cole-Parmer) pour une durée de 2 h à 30 rpm. Le tube a ensuite été mis à centrifuger à 1200 rpm pendant 15 mn (Rotanta 460 Hettich, Tuttlingen, Allemagne). La solution obtenue a été filtrée (Minisart NML, Sartorius). Pour doser les orthophosphates, 1 mL du filtrat collecté a été prélevé et déposé dans un tube en verre (10 mL) avant d'être mis en contact avec 9 mL d'un réactif de coloration (composé d'acide ascorbique, de thiosulfate de sodium, d'acide sulfurique et de réactif sulfomolybdique). Le protocole a inclus des solutions d'étalonnage (solution d'orthophosphates à 450 mg L^{-1}) ainsi que des essais à blanc. Le tube a été mis dans un bain marie (75°C) pour une durée de 30 mn pour permettre l'action du thiosulfate de sodium et développer une coloration bleue. Le dosage des orthophosphates a été effectué à l'aide d'un spectrophotomètre (Thermo scientifique multiskan tmGO) configuré à une longueur d'onde de 825 nm après avoir incorporé 200 μL de chaque solution au sein d'une microplaque de 96 puits.

La teneur en phosphore assimilable C , exprimée en grammes de P_2O_5 par kg d'échantillon, a été calculée à partir de la formule suivante :

$$C = SC \times \frac{(SEA - BA) \times 25 \times D \times 2,29}{(SA - OA) \times 1000} \times \frac{H + 100}{H}$$

Où : SC la concentration de la solution étalon utilisée la plus élevée, exprimée en mg P L^{-1} ; SEA la densité optique correspondant à l'extrait analysé ; BA la moyenne des densités optiques correspondant au blanc ; D le facteur éventuel de dilution de l'extrait analysé ; SA la densité optique correspondant à l'étalon $SC \text{ mg P L}^{-1}$; OA la densité optique correspondant à l'étalon à 0 mg P L^{-1} et H la teneur en eau exprimée sous la forme de % en masse sèche.

11. CEC et cations échangeables (ISO 11260)

La capacité d'échange cationique et les cations échangeables d'un sol représentent sa réserve en éléments nutritifs. Il s'agit de sa capacité à stocker et à restituer les cations au moyen de son complexe adsorbant. L'analyse de ces éléments renseigne donc la capacité du sol à assurer la nutrition végétale.

La détermination de la capacité d'échange cationique (CEC) consiste en la saturation des échantillons à l'aide de chlorure de baryum puis à un apport en excès connu de sulfate de magnésium pour en mesurer la teneur par spectrométrie d'absorption atomique dans la

flamme (FAAS). La norme utilisée stipule qu'il est possible de procéder de la même manière pour déterminer les teneurs en cations en solution.

Une masse connue ($\approx 1,25$ g) d'échantillon (fraction $< 250 \mu\text{m}$ séchée à 40°C) a été placée dans un tube à centrifuger de volume 50 mL et de masse préalablement définie. L'ensemble (échantillon et tube) a été pesé (m_1). Un volume de 30 mL de BaCl_2 ($0,1 \text{ mol L}^{-1}$) a été ajouté à l'échantillon et le tout a été mis en agitation (tube rotator SB3, Stuart, Cole-Parmer) pendant 1 h. Le tube a ensuite été centrifugé à 3000 g pendant 10 mn (Rotanta 460 Hettich, Tuttlingen, Allemagne). Le surnageant a été transféré dans une fiole jaugée de 100 mL et l'opération (ajout de BaCl_2 et centrifugation) a été répétée deux fois. Le volume de la fiole contenant le surnageant a été complété au trait de jauge à l'aide de la solution de BaCl_2 . L'extrait obtenu a été filtré (Minisart NML, Sartorius) avant dosage de Ca^{2+} , K^+ , Na^+ et Mg^{2+} par spectrométrie d'absorption atomique à la flamme (FAAS) (SAA, AA-6800, Shimadzu). Les calculs pour obtenir les résultats sont décrits ci-après :

$$b(\text{Na échangeable}) = 2,1749 (P_3 - P_{b2})/m$$

$$b(\text{K échangeable}) = 1,2788 (P_3 - P_{b2})/m$$

$$b(\text{Mg échangeable}) = 8,2288 (P_4 - P_{b3})/m$$

$$b(\text{Ca échangeable}) = 4,9903 (P_4 - P_{b3})/m$$

Où : $b(\text{Na échangeable})$ la teneur en sodium échangeable dans le sol, en cmol+ kg^{-1} ; $b(\text{K échangeable})$ la teneur en potassium échangeable dans le sol, en cmol+ kg^{-1} ; $b(\text{Mg échangeable})$ la teneur en magnésium échangeable dans le sol, en cmol+ kg^{-1} ; $b(\text{Ca échangeable})$ la teneur en calcium échangeable dans le sol, en cmol+ kg^{-1} ; P_3 la concentration en Na ou K dans les extraits dilués en mg L^{-1} ; P_{b2} la concentration en Na ou K dans la solution à blanc diluée, en mg L^{-1} ; P_4 la concentration en Mg ou Ca dans les extraits dilués, en mg L^{-1} ; P_{b3} la concentration en magnésium ou calcium dans la solution à blanc diluée, en mg L^{-1} et m la masse de l'échantillon de sol séché à l'air, en g.

Le culot de centrifugation obtenu à l'issue de cette première étape a été mélangé à 30 mL d'une solution de BaCl_2 ($0,0025 \text{ mol L}^{-1}$) et l'ensemble a été mis en agitation (tube rotator SB3, Stuart, Cole-Parmer) pendant une nuit. Le lendemain, le tube a été centrifugé à 3000 g pendant 10 mn (Rotanta 460 Hettich, Tuttlingen, Allemagne) et le surnageant a été jeté. La masse du tubes et de son contenu ont été déterminées (m_2). Enfin, 30 mL d'une solution de sulfate de magnésium ($0,0020 \text{ mol L}^{-1}$) ont été ajoutés au culot et le tube a été mis en agitation (tube rotator SB3, Stuart, Cole-Parmer) pour une nuit. Par la suite, le tube a été centrifugé (3000 g pendant 10 mn) et le surnageant a été récupéré et filtré au moyen d'une seringue munie d'un filtre à $0,45 \mu\text{m}$ (Minisart NML, Sartorius). La solution obtenue permet

de déterminer la teneur de Mg en excès par SAA flamme (FAAS) (AA-6800, Shimadzu) et d'en déduire la CEC à l'aide des formules suivantes :

La formule de correction de la teneur en Mg dans les solutions est :

$$C_2 = \frac{C_1 (30 + m_2 - m_1)}{30}$$

Avec : C_2 la teneur corrigée en Mg dans l'échantillon, en mmol L⁻¹ ; C_1 la teneur en Mg dans l'échantillon, en mmol L⁻¹ ; m_1 la masse du tube à centrifuger contenant l'échantillon séché à l'air, en g et m_2 la masse du tube à centrifuger contenant l'échantillon humide, en g.

Formule pour déterminer la CEC du sol :

$$CEC = (C_{b1} - C_2) \times 3000/m$$

Avec : la CEC de l'échantillon, en cmol+ kg⁻¹ ; C_2 la teneur en Mg corrigée dans l'échantillon, en mmol L⁻¹ ; C_{b1} La teneur en Mg dans la solution à blanc, en mmol L⁻¹ et m la masse de l'échantillon, séché à l'air en g.

Pour les matériaux d'origine organique, les caractérisations ont intégré la collecte de données analytiques auprès des fournisseurs et de la Chambre d'Agriculture des Hauts-de-France lesquelles concernaient le pH, les teneurs en matières sèche et organique, en C organique et N total, en phosphore total, ainsi qu'en K₂O, MgO et CaO.

12. Fe, Al et Mn libres et totaux

Fe, Al et Mn appartiennent aux éléments mineurs des sols et jouent un rôle déterminant dans le développement des végétaux. Ces éléments sont souvent décrits comme des catalyseurs puisqu'ils sont à l'origine de modifications ou de réactions physiologiques chez les cultures. À titre d'exemple, le fer participe à la synthèse de la chlorophylle et de certaines protéines, le manganèse à la production d'oxygène moléculaire au cours de la photosynthèse ou encore à la croissance des végétaux, plus spécifiquement à l'élongation de leurs racines ainsi qu'à la synthèse de leurs membranes et de leur mécanisme de défense. Parmi les éléments mineurs, certains sont des métaux, autrement qualifiés d'éléments traces métalliques. C'est le cas du fer, de l'aluminium et du manganèse. Ainsi, si leur présence en faible quantité est indispensable au développement des végétaux, une teneur excédentaire en un ou plusieurs de ces éléments peut à l'inverse être à l'origine d'une phytotoxicité mais aussi augmenter le risque de contamination de l'environnement. Pour ces raisons, l'étude de leurs teneurs est une information très importante pour juger de la fertilité et de la qualité du sol.

La détermination des teneurs en Fe, Al et Mn totaux repose sur une minéralisation tandis que la caractérisation des teneurs libres s'appuie sur le protocole développé par Mehra et Jackson (1960) et révisé par le Laboratoire d'Analyse des sols de l'INRAE d'Arras.

Pour la détermination des teneurs totales, une prise d'essai de 0,3 g (\pm 0,01 g) d'échantillon (fraction < 250 μ m) a été introduite dans un tube en polypropylène d'une capacité de 50 mL. En raison du caractère fortement carbonaté des échantillons, 3 mL de HNO₃ (70 %) ont été ajoutés à la prise d'essai pour une durée de 2 h avant d'ajouter 3 mL de H₂O₂ pour la nuit. Le lendemain, l'ensemble a été chauffé à 95°C pendant 2 h dans un bloc chauffant (hot block system-assisted digestion, Environmental Express SC100, Charleston, SC, USA). Ont été ajoutés 4,5 mL d'HCl (37 %) et 1,5 mL d'HNO₃ (70 %) dans la prise d'essai avant d'agiter manuellement le contenu du tube. L'ensemble a été chauffé pendant 1,5 h à 95°C. La solution obtenue a été complétée au trait de jauge (25 mL) avec de l'eau bidistillée avant d'être filtrée (Digifiltre SCP Science, 0,45 μ m). Le produit de la filtration a été dosé au SAA (AA-6800, Shimadzu).

Pour la détermination des teneurs en Fe, Al et Mn libres, 0,5 g (\pm 0,01 g) d'un échantillon (fraction < 250 μ m, séchée à 40°C) ont été introduits dans un tube à centrifuger puis 25 mL d'une solution d'extraction ont été ajoutés. La solution d'extraction a été préparée à partir de citrate de sodium (0,267 mol L⁻¹), agent complexant, et de bicarbonate de sodium (0,111 mol L⁻¹), permettant de tamponner le pH. La solution a ensuite été chauffée à 80°C à l'aide d'un bain marie avant d'y incorporer 1,5 mL de dithionite de sodium (solution réductrice à 200 g L⁻¹). Le tube a été réservé durant 30 mn (temps d'action de la solution réductrice) et a été remué manuellement par intervalles de temps réguliers. Après refroidissement, l'échantillon a été centrifugé à 12 000 rpm pendant 25 mn (Rotanta 460 Hettich, Tuttlingen, Allemagne). Le surnageant a été filtré au travers d'une seringue munie d'un filtre à 0,45 μ L (Minisart NML, Sartorius) avant dosage au SAA (AA-6800, Shimadzu).

13. Respirométrie (ISO 16072)

La respiration basale microbienne a été caractérisée en utilisant un système automatisé Oxitop® (WTW, Weilheim, Allemagne). Il consiste en une jarre hermétique équipée d'une tête de mesure relevant les variations de pression interne grâce à un récepteur piezosensible. Les données ont été collectées (Oxitop® Control - OC 110) puis analysées.

En respectant la méthode proposée par Platen et Wirtz (1999), 50 g d'échantillon (fraction <2 mm séchée à 40°C), préalablement réhumectés avec de l'eau osmosée à 80 % de sa capacité de rétention en eau ainsi qu'un pilulier contenant 40 mL de NaOH (1 M) ont été introduits dans la jarre. L'ensemble du dispositif a été placé dans une enceinte thermostatée

(20°C). Pendant 5 jours, le CO₂ gazeux produit par les micro-organismes a été piégé par la solution de NaOH dont le volume est resté fixe. L'appauvrissement progressif de la pression en CO₂ au sein du de la jarre a été enregistré toutes les 20 mn par le récepteur piezosensible. Dans le cadre de la respiration basale, une mole de dioxygène est transformée en une mole de dioxyde de carbone. Ainsi, la variation de pression a été traduite en masse de dioxygène consommé par kilogramme de sol selon la formule :

$$BA = \frac{M_r(O_2)}{R \cdot T} \cdot \frac{V_{fr}}{m_{Bt}} \cdot \Delta p$$

Où : *BA* correspond à la respiration du sol exprimée en mg O₂ kg⁻¹ sol sec j⁻¹ ; *M_r(O₂)* est la masse molaire de O₂ (32000 mg mol⁻¹) ; *V_{fr}* le volume libre (0,8 L) ; *Δp* la différence de pression (mbar) ; *R* la constante des gaz parfaits (83,14 L mbar mol⁻¹ K⁻¹) ; *T* la température (Kelvin) ; *M_{Bt}* la masse de sol sec (kg).

14. Activités enzymatiques par la libération de la fluorescéine

Le test repose sur l'analyse de la capacité des micro-organismes à hydrolyser la Fluorescéine Di Acétate (FDA) et dont la méthode a été développée par Green *et al.* (2006).

Pour ce faire, 2,5 g d'échantillon (fraction < 2 mm, séchée à 40°C) ont été introduits dans un tube à centrifuger de 50 mL. 45 mL d'une solution tampon de phosphate de sodium (60 mM – pH 7,6) et 0,50 mL de solution de substrat de lipase FDA 4,9 mM, préparée en mélangeant 20 mg de substrat lipase FDA dans 10 mL d'acétone ont été ajoutés. L'ensemble a été fermé hermétiquement et agité puis, placé dans un incubateur pendant 2 h à 20°C. À l'issue de cette phase, 2 mL d'acétone ont été ajoutés à la solution et le tout a été remué afin de stopper la réaction d'hydrolyse. Le tube a ensuite été centrifugé pendant 5 mn à 3000 g. Le surnageant a été filtré au moyen d'un filtre (Whatman No.2 ; 0,45 μm) et le filtrat (200 μL) a été incorporé dans le puits d'une microplaque. L'absorbance a été mesurée en UV-VIS à 490 nm (spectrophotometer, Multiskan® GO). La concentration de fluorescéine libérée a été déterminée par référence à une courbe standard établie à partir d'une solution mère de fluorescéine.

15. Biomasse moléculaire fongique par quantification de l'ergostérol

La détermination de la biomasse moléculaire fongique a été réalisée par le dosage de l'ergostérol libre, selon la méthode de Gong *et al.* (2001). Cette dernière a consisté en l'introduction de 4 g de sol frais (fraction < 2 mm) dans un tube à centrifuger, avant d'y ajouter 2 billes de verre et 6 mL de méthanol. Le tube a été agité par vortex (10 s) puis par retournement (1 h). L'échantillon a ensuite été centrifugé durant 5 mn à 3000 g. Une partie du surnageant a été collectée et filtrée (0,2 μm). L'ergostérol a été séparé sur une colonne

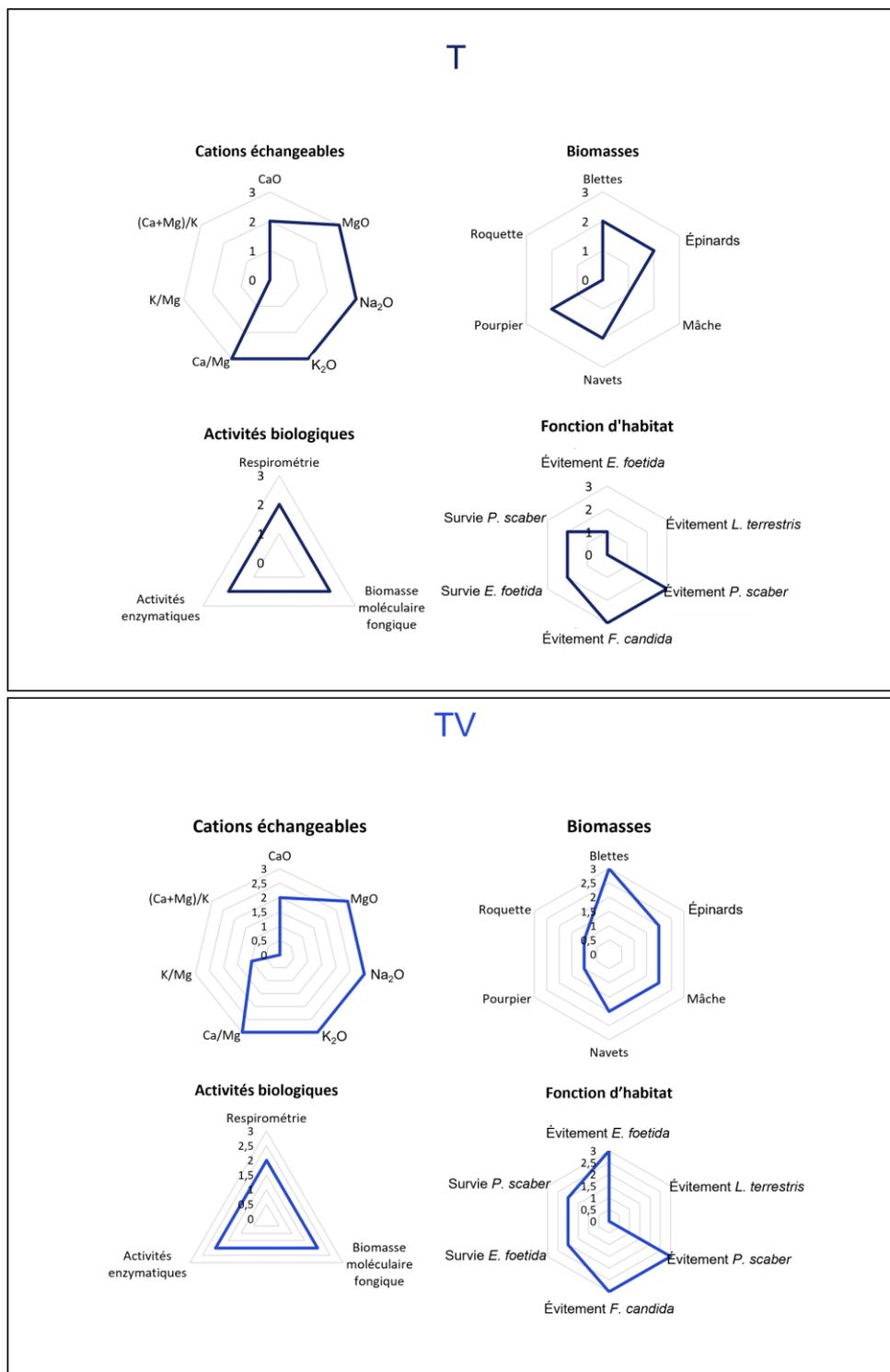
HyPURITY Aquastar (5 μm 150 x 4.6 mm ; Thermo-Fischer) par chromatographie en phase liquide (UFLC : Ultra-Fast Liquid Chromatography ; Prominence, Shimadzu, Tokyo, Japan). L'ergostérol a été détecté en UV (longueur d'onde $\lambda = 282$) par un détecteur à barrette de diodes (SPD-M20A, Shimadzu). La teneur en ergostérols a été déterminée par référence à une courbe standard établie à partir d'une solution d'ergostérol commercial (Sigma-Aldrich). La teneur en ergostérols est exprimée en μg d'ergostérols par g de sol sec.

ANNEXE 4 : VALEURS DES PARAMETRES PHYSIQUES, CHIMIQUES ET BIOLOGIQUES DES COUCHES DE SURFACE DES MODALITES A T₀, T₁, T₂ ET T₃

Valeurs des paramètres physiques, chimiques et biologiques associés à la fertilité des couches organo-minérales des quatre Technosols à leur mise en place (t₀), après 3 mois (t₁), après 6 mois (t₂) et après 1 an (t₃). t₀, mise en place des Technosols, t₁, après 3 mois, t₂, après 6 mois, t₃, après 1 an, T, sans bentonite, TV, sans bentonite avec vers (*L. terrestris*), TB, avec bentonite et TBV, avec bentonite et vers (*L. terrestris*) (moyenne ± ET). Les lettres minuscules indiquent une différence significative pour un même Technosol aux différents pas de temps analytiques. Les lettres majuscules montrent une différence significative entre les 4 Technosols pour un même pas de temps.

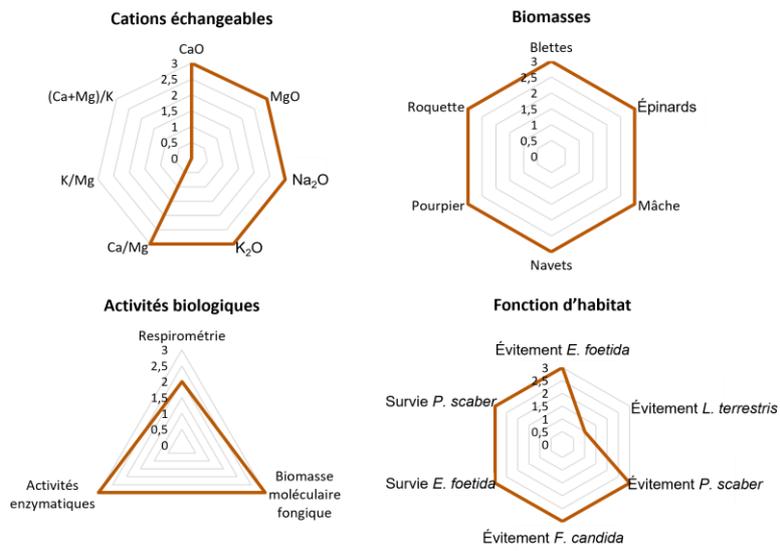
	t ₀				t ₁				t ₂				t ₃			
	T	TV	TB	TBV	T	TV	TB	TBV	T	TV	TB	TBV	T	TV	TB	TBV
pH	8,53 ± 0,11 (a)	8,50 ± 0,07 (a)	8,20 ± 0,09 (a)	8,48 ± 0,25 (a)	7,94 ± 0,18 (b)	7,92 ± 0,19 (b)	7,59 ± 0,03 (b)	7,58 ± 0,09 (b)	7,89 ± 0,17 (b)	7,89 ± 0,23 (b)	7,70 ± 0,05(b)	7,74 ± 0,07 (b)	7,63 ± 0,15 (b)	7,58 ± 0,04 (b)	7,60 ± 0,07(b)	7,53 ± 0,10 (b)
CE (µS cm ⁻¹)	1379 ± 304 (ab)	1442 ± 282	1192 ± 95	1313 ± 402	1116 ± 316 (b)	1376 ± 166	1265 ± 61	1439 ± 98	1913 ± 108 (a)	1745 ± 483	1236 ± 180	1532 ± 507	1512 ± 165 (ab) (A)	1111 ± 269 (AB)	904 ± 291 (B)	939 ± 87 (AB)
CaCO ₃ total (g kg ⁻¹)	731 ± 13 (a) (A)	705 ± 79 (AB)	578 ± 29 (a) (C)	608 ± 41 (BC)	649 ± 10 (b) (A)	592 ± 85 (AB)	521 ± 17 (ab)(B)	513 ± 38 (B)	555 ± 13 (c)	454 ± 178	437 ± 7 (bc)	473 ± 21	544 ± 27 (c)	480 ± 70	404 ± 60 (c)	534 ± 267
CaCO ₃ actif (g kg ⁻¹)	70 ± 34 (A)	97 ± 10 (b) (AB)	68 ± 23 (AB)	33 ± 19 (b) (B)	88 ± 2 (A)	90 ± 7 (b) (A)	55 ± 3 (B)	47 ± 13 (ab) (B)	113 ± 11 (A)	107 ± 2 (ab)(A)	85 ± 6 (B)	78 ± 6 (a) (B)	103 ± 24	116 ± 7 (a)	106 ± 42	76 ± 24 (ab)
C organique total (g kg ⁻¹)	25 ± 4	24 ± 2	24 ± 5 (a)	23 ± 7	23 ± 2	22 ± 2	25 ± 3 (ab)	22 ± 1	22 ± 2	22 ± 2	20 ± 1 (b)	21 ± 5	26 ± 3	24 ± 1	23 ± 4 (b)	22 ± 3
N total (g kg ⁻¹)	1,82 ± 0,12	1,84 ± 0,32	2,25 ± 0,29	2,10 ± 0,58	1,41 ± 0,09	1,60 ± 0,09	1,68 ± 0,34	1,65 ± 0,13	1,39 ± 0,18	1,40 ± 0,21	1,37 ± 0,02	1,39 ± 0,24	1,44 ± 0,60	1,45 ± 0,06	1,55 ± 0,17	1,57 ± 0,27
C/N	13,5 ± 1,3 (A)	13,2 ± 1,1 (A)	10,5 ± 0,9 (b) (B)	11,1 ± 0,6 (b) (AB)	16,4 ± 1,6	13,6 ± 2,1	14,9 ± 2,3 (a)	13,7 ± 1,8 (ab)	16,0 ± 1,1	16,1 ± 1,3	14,5 ± 1,2 (a)	15,1 ± 1,5 (a)	22,6 ± 15,3	16,2 ± 0,6	14,8 ± 1,2 (a)	14,1 ± 0,7 (ab)
CEC (cmol+ kg ⁻¹)	0,22 ± 0,37	3,57 ± 6,43	7,68 ± 3,78	7,70 ± 4,74	2,50 ± 3,45	7,32 ± 2,95	11,63 ± 5,74	9,65 ± 3,72	4,09 ± 3,81	3,58 ± 2,43	11,61 ± 0,44	7,37 ± 4,46	8,89 ± 8,58	7,56 ± 3,05	11,54 ± 4,56	13,05 ± 6,72
P ₂ O ₅ (g kg ⁻¹)	0,34 ± 0,06 (b)	0,48 ± 0,13	0,51 ± 0,10	0,50 ± 0,29	0,49 ± 0,03 (ab)	0,38 ± 0,10	0,63 ± 0,15	0,56 ± 0,04	0,52 ± 0,13 (ab)	0,56 ± 0,13	0,48 ± 0,10	0,50 ± 0,12	0,77 ± 0,19 (a)	0,62 ± 0,10	0,58 ± 0,19	0,52 ± 0,13
K ₂ O (g kg ⁻¹)	1,55 ± 0,33	1,51 ± 0,54	1,76 ± 0,25	1,65 ± 0,27	1,62 ± 0,03	1,52 ± 0,43	1,75 ± 0,53	1,49 ± 0,32	1,91 ± 0,71	1,48 ± 0,38	1,95 ± 0,35	1,48 ± 0,51	1,62 ± 0,10	1,05 ± 0,37	1,49 ± 0,13	1,34 ± 0,08
MgO (g kg ⁻¹)	0,31 ± 0,05 (b) (C)	0,31 ± 0,07 (b) (C)	0,94 ± 0,02 (b) (A)	0,67 ± 0,13 (b) (B)	0,96 ± 0,19 (a)	1,01 ± 0,28 (a)	1,05 ± 0,25 (ab)	0,85 ± 0,16 (ab)	1,14 ± 0,17 (a)	1,20 ± 0,35 (a)	1,32 ± 0,07 (a)	1,24 ± 0,27 (a)	1,14 ± 0,28 (a)	0,85 ± 0,07 (a)	1,12 ± 0,03 (ab)	0,99 ± 0,07 (ab)
Na ₂ O (g kg ⁻¹)	0,27 ± 0,05 (a) (B)	0,29 ± 0,03 (a) (AB)	0,41 ± 0,07 (a) (A)	0,35 ± 0,04 (a) (AB)	0,02 ± 0,00 (b)	0,02 ± 0,01 (b)	0,02 ± 0,00 (b)	0,02 ± 0,01 (b)	0,02 ± 0,00 (b)	0,02 ± 0,01 (b)	0,01 ± 0,01 (b)	0,01 ± 0,01 (b)	0,43 ± 0,08 (a)	0,23 ± 0,08 (a)	0,29 ± 0,05 (a)	0,24 ± 0,02 (a)
CaO (g kg ⁻¹)	1,73 ± 0,10 (B)	1,62 ± 0,25 (B)	2,84 ± 0,21 (A)	2,21 ± 0,50 (b) (AB)	2,86 ± 1,18	3,45 ± 1,24	3,36 ± 1,22	2,56 ± 1,35 (ab)	2,34 ± 0,19 (B)	2,67 ± 0,05 (B)	4,64 ± 0,26 (A)	4,86 ± 1,21 (a) (A)	2,71 ± 0,17	2,26 ± 0,29	3,75 ± 0,50	4,01 ± 0,59 (ab)
Respirométrie (mg kg ⁻¹ O ₂ j ⁻¹)	303 ± 66 (a)	425 ± 94 (a)	345 ± 75 (a)	388 ± 172 (a)	82 ± 7 (b) (B)	97 ± 27 (bc) (B)	157 ± 25 (b) (A)	126 ± 8 (b) (AB)	73 ± 7 (b)	76 ± 7(c)	95 ± 10 (c)	81 ± 16 (b)	125 ± 23 (b)	130 ± 10 (b)	151 ± 12 (b)	156 ± 14 (b)
Activités enzymatiques (nmol g ⁻¹ min ⁻¹)	1,25 ± 0,72	2,25 ± 1,14 (a)	2,44 ± 1,38	1,88 ± 0,71	0,37 ± 0,11 (AB)	0,27 ± 0,08 (c) (B)	0,45 ± 0,25 (A)	0,54 ± 0,32 (AB)	2,16 ± 0,60 (B)	2,33 ± 0,46 (bc) (B)	3,08 ± 0,14 (A)	3,46 ± 0,56 (A)	2,41 ± 1,00 (B)	2,56 ± 0,64 (b) (B)	3,40 ± 0,63 (A)	2,86 ± 0,45 (AB)
Biomasse moléculaire fongique (µg ergostérols g ⁻¹)	1,74 ± 0,57 (ab)	1,22 ± 0,34 (a)	2,84 ± 0,73 (ab)	1,69 ± 0,83 (bc)	0,84 ± 0,62 (b)	0,37 ± 0,03 (b)	1,84 ± 0,58 (b)	1,25 ± 0,44 (c)	0,83 ± 0,10 (ab) (B)	0,82 ± 0,14 (a) (AB)	1,99 ± 0,30 (a) (AB)	1,82 ± 0,49 (a) (A)	0,95 ± 0,24 (a)	0,84 ± 0,11 (a)	1,83 ± 0,39 (a)	1,47 ± 0,15 (ab)

ANNEXE 5 : DETAILS DES NOTES DES INDICATEURS « CATIONS ECHANGEABLES », « PRODUCTIVITE (BIOMASSES) », « ACTIVITES BIOLOGIQUES » ET « FONCTION D'HABITAT » DES SOLS D'ESSAI²³



²³ Le score attribué aux cations échangeables correspond à la moyenne des notes données aux teneurs en CaO, MgO, Na₂O, K₂O, ratios Ca/Mg, K/Mg et (Ca+Mg)/K ; celui attribué aux activités biologiques à la moyenne des notes de respirométrie, biomasse moléculaire fongique et activités enzymatiques ; celui de productivité à la moyenne des notes de biomasses (des cultures maraîchères à t₃) et celui de la fonction d'habitat à la moyenne des notes attribuées pour les résultats d'évitement et de survie des bioindicateurs.

TB



TBV

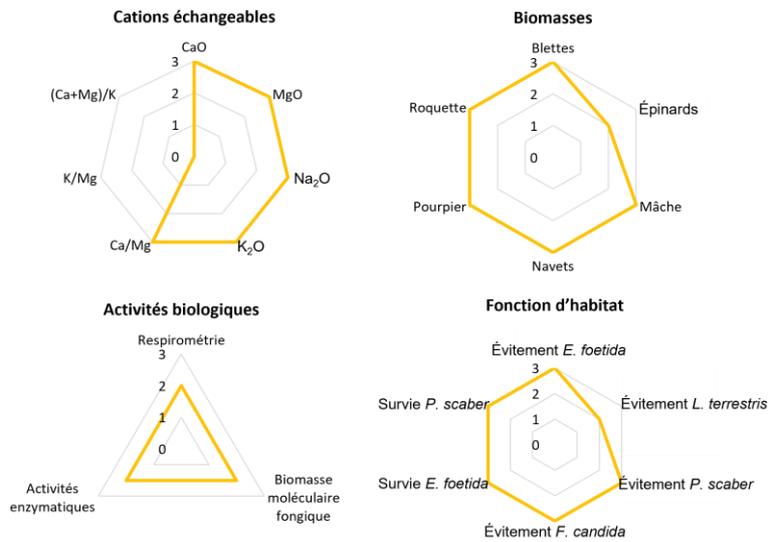


Figure 51 : Détails des notes attribuées aux indicateurs "cations échangeables", "productivité (biomasses)", "activités biologiques" et fonction d'habitat des sols d'essai

Résumé

La construction de Technosols permet de créer des sols à partir de matériaux non valorisés (déchets ou produits résiduels) pour remplir une ou plusieurs fonctions ou fournir différents services écosystémiques. Dans le cadre de la thèse, deux Technosols ont été construits en s'inspirant de sols maraîchers réputés pour leurs bonnes potentialités agronomiques. L'objectif de la recherche consiste à étudier la fertilité de ces deux Technosols en testant l'hypothèse selon laquelle la présence ou l'absence de bentonite induirait des potentialités agronomiques différentes. Sont examinés : (i) leurs paramètres physiques, chimiques et biologiques, (ii) leur capacité à assurer la production de cultures maraîchères de printemps et d'hiver, et (iii) leur aptitude à assurer la fonction d'habitat de bio-indicateurs de la faune. Les résultats mettent en évidence (i) l'initiation de premiers processus pédogénétiques, (ii) la capacité des Technosols construits à produire des denrées maraîchères de qualité et en quantité comparables à celles d'un sol maraîcher professionnel au cours de deux saisons culturales ainsi que l'amélioration de leur fertilité. Tendanciellement, la présence de la bentonite dans les modalités conduit à des cultures de meilleure qualité. L'analyse de la composante biotique montre que les Technosols sont susceptibles d'être rapidement colonisés par des organismes pionniers. Ils ont également la capacité à assurer la fonction d'habitat d'organismes ingénieurs de l'écosystème avec une propension globale des organismes à privilégier les modalités incluant une part de bentonite. Ces travaux représentent une alternative aux prélèvements de terres rurales fertiles pour assurer les aménagements urbains, mais aussi d'accroître l'implantation de systèmes à l'origine de nombreux services écosystémiques. Ils représentent également la possibilité de reconnecter production alimentaire et zone urbaine, deux termes encore antinomiques jusqu'à récemment.

Mots clés : Technosols construits, génie pédologique, agriculture urbaine, qualité des sols

Abstract

The construction of Technosols enables to create soils from non-recovered materials (waste or residual products) to fulfil one or more functions or provide different ecosystem services. Within the framework of the thesis, two Technosols were constructed based on market garden soils known for their high agronomic potential. The objective of the research is to study the fertility of these two Technosols by testing the hypothesis that the presence or absence of bentonite induces different agronomic potentialities. The study examines: (i) their physical, chemical, and biological parameters, (ii) their ability to produce spring and winter vegetable crops, and (iii) their suitability as habitat for several faunal bioindicators. The results show (i) the initiation of first pedogenetic processes, (ii) the ability of the constructed Technosols to produce vegetable crops of comparable quality and quantity to those of a professional market garden soil during two cropping seasons, as well as the improvement of their fertility. Tendentially, the presence of bentonite in the modalities leads to crops of better quality. The analysis of the biotic component showed that Technosols are likely to be rapidly colonized by pioneer organisms. They also have the ability to provide a habitat for several soil fauna engineers, with a propensity for organisms to favor the modalities including a proportion of bentonite. This work represents an alternative to the removal of fertile rural land for urban development, but also increases the establishment of systems that provide many ecosystem services. They also represent a possibility to reconnect food production and urban areas, two concepts that were antinomic until recently.

Key words: Constructed Technosols, pedological engineering, urban farming, soil quality