



Des Technosols construits à partir de produits résiduels urbains : services écosystémiques fournis et évolution

Baptiste Grard

► To cite this version:

Baptiste Grard. Des Technosols construits à partir de produits résiduels urbains : services écosystémiques fournis et évolution. Ecologie, Environnement. Université Paris Saclay (COMUE), 2017. Français. NNT : 2017SACLA043 . tel-01779723

HAL Id: tel-01779723

<https://theses.hal.science/tel-01779723>

Submitted on 26 Apr 2018

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.

Des Technosols construits à partir de produits résiduaux urbains : services écosystémiques fournis et évolution

Thèse de doctorat de l'Université Paris-Saclay

préparée à AgroParisTech

École doctorale n°581 Agriculture, alimentation, biologie, environnement, santé (ABIES)

Spécialité de doctorat: Sciences de l'environnement

Thèse présentée et soutenue à Paris, le 21 décembre 2017, par

Baptiste Grard

Composition du Jury :

Jean Roger-Estrade

Professeur, AgroParisTech (Dpt SIAFEE)

Président

Jean-Louis Morel

Professeur, Université de Lorraine - ENSAIA Nancy (Laboratoire LSE)

Rapporteur

Laure Vidal-Beaudet

Maître de conférences, AgroCampusOuest Angers (UP EPhor)

Rapporteuse

Luc Abbadie

Professeur, UPMC - iEES Paris (iEES)

Examineur

Pascal Boivin

Professeur, HEPIA Genève (Dpt Sciences de la vie)

Examineur

Claire Chenu

Professeur, AgroParisTech – INRA (Dpt SIAFEE)

Directrice de thèse

Nathalie Frascaria-Lacoste

Professeur, AgroParisTech – CNRS –UPS (UMR 8079)

Co-Directrice de thèse

Thèse soutenue par l'attribution d'une allocation de recherche **Région Ile-de-France** au travers
du dispositif **DIM ASTREA**.

Thèse également soutenue par la **Chaire Eco-conception Vinci - ParisTech**.



Chaire
éco-conception

Remerciements

Et voilà, le moment d'écrire les remerciements est arrivé, montrant la fin d'un cycle de trois années. J'ai plaisir à écrire ces lignes qui je l'espère refléteront ma gratitude d'avoir eu la chance et le plaisir de travailler dans un environnement de travail bienveillant, constructif et chaleureux. La thèse est un travail individuel, extrêmement collectif...



Tout d'abord, merci aux nombreux présents le jour de ma soutenance. Votre présence bienveillante m'a énormément touché.

Merci à **Luc Abbadie, Pascal Boivin, Jean-Louis Morel, Jean Roger-Estrade et Laure Vidal-Beaudet**, membres de mon jury, de m'avoir fait l'honneur de venir et d'échanger avec moi autour de mes travaux de thèse. J'ai eu beaucoup de plaisir à lire les rapports et échanger durant la soutenance avec vous.

Je tiens à remercier mes deux co-directrices de thèse : **Claire Chenu** et **Nathalie Frascaria-Lacoste**. C'est une chance de travailler avec des personnes que l'on admire et qui sont bienveillantes dans leurs encadrements. Pour la confiance que vous m'avez accordée, nos échanges et le temps consacré à ces travaux, je ne pourrais vous dire assez merci. Plus spécifiquement, merci à **Claire** pour avoir fait confiance à un étudiant de master 2 que tu ne connaissais que peu et de t'être lancé dans cette belle aventure avec moi. Merci pour nos échanges et ta rigueur toujours constructive. Je réalise ma chance de pouvoir continuer encore à travailler à tes côtés et j'ai hâte de cette prochaine aventure ! Merci également à **Nathalie** pour avoir accepté de co-encadrer cette thèse, où tu n'as pas toujours été dans tes champs d'études favoris mais a toujours su, avec bienveillance et pertinence, faire progresser cette thèse. L'étudiant de master te dit également un immense merci pour ton humanité dans l'accompagnement de tes étudiants qui est si précieuse.

Cette thèse, n'aura pas été possible sans toi **Christine Aubry**, tu as toute ma reconnaissance pour cela. Merci pour la confiance que tu m'accordes, les opportunités que tu m'as offertes, la bienveillance dont tu fais preuve et ta folle énergie capable de déplacer des montagnes (ou presque 😊).

Scier, visser, porter, monter, démonter, récolter, concevoir ... toutes ces fastidieuses tâches ça rapproche... sans toi **Antoine Juvin**, cela n'aurait pas non plus été possible. Un immense merci pour ton génie du bricolage, ton aide, soutien et amitié. J'ai hâte des prochains sacs et/ou bières soulevés ensemble ! Au passage, merci également à la team Cultures en ville : **Julien Andrieux, Clément Lebellé** et **Antoine Lemoine**.

Merci aux partenaires de l'expérimentation T4P pour leurs soutiens et implications : **BioYvelinesServices, Cultures en ville, La boîte à champignons et Topager**. Plus spécifiquement, merci à Mr **André Weil** pour son intérêt pour nos travaux, son soutien et sa curiosité. Merci également à Mr **Grégoire Bleu** pour son énergie enthousiasmante. Puisque sans vous, cette aventure n'aurait pas pu démarrer, merci les Topager's men : **Nicolas Bel et Frédéric Madre** !

Merci aux membres de mon comité de pilotage : **Apoline Auclerc, Mickaël Hedde, Jean-Charles Michel et Geoffroy Séré**. Merci d'avoir accepté de me suivre dans cette belle aventure. La bonne humeur de ces comités, vos conseils et idées ont permis à ma thèse de se structurer, de progresser et d'avancer.

Merci à « mon binôme de toit », **Charlène Zahir**, dont l'arrivée m'a libéré, a fait avancer le projet et cette thèse et avec qui je suis bien content de travailler !

Parce que ton stage a fait faire un sacré bond en avant à ma thèse grâce à ton efficacité et nos échanges, merci **Alexandre Barrier-Guillot**. Content que ce stage m'ait permis de rencontrer une personne que j'ai désormais la chance de compter parmi mes amis.

Iris Amoyel, merci pour ta bonne humeur, ton esprit d'initiative et ton énergie. Grâce à toi, la page web du toit a pris forme et nous avons pu réaliser les premières visites officielles de l'expérimentation au sein de l'établissement.

Merci également à **Erica Dorr**, d'avoir mené à bien et avec une grande efficacité notre projet d'article ACV sur le toit.



Sans le personnel administratif, nos travaux et en particulier cette thèse n'aurait pas non plus été possible. Un immense merci pour cela à **Anita Barazer, Florence Barre, Catherine Bellay, Christine Collin, Sylviane Coulon, Christine Dafonte, Catherine Gaydan, Charlotte Gandon-Sachs, Morgane Lemoigno, Christine Le-Pennec, Christian Levert, Catherine Richard, Vienghkam Vannaphaphonh et Anne Volet**. Plus spécialement, pour avoir supporté mes nombreuses commandes (plus ou moins étranges), liées à des fournisseurs (plus ou moins enclins à travailler avec un institut public) et ma capacité à ne pas (toujours) anticiper les besoins, mille mercis à **Sylviane et Christian**. Des administrateurs comme vous, on en redemande !

Pour leurs accompagnements informatiques, merci à **Arnaud Goulut, Si Mohammed Laroussi et Romain Maignan**.

Merci à **Nastaran Manouchehri et Stéphane Besançon** pour leurs implications dans ma thèse et au sein du projet T4P. Sans vous pas de quantification des ETM. Merci pour votre gentillesse et soutien depuis le début.

Merci à **Véronique Ethiévant**, pour ton aide, tes conseils et accompagnements au laboratoire. Cela a été un plaisir de travailler et discuter (☺) ensemble. Merci à **Valérie Pouteau** pour ton organisation et ton aide au laboratoire, indispensables au bon déroulement des manips. Merci à **Yolaine Delaunay** pour les nombreux combats menés avec le skalar et le TOC pour mes échantillons.... Quelques peu chargés... ☺. Merci à **Sébastien Breuil** et **Isabelle Lamy** pour m'avoir ouvert les portes du TOC de Versailles quand celui de Grignon devenait trop capricieux ! Merci à **Eric Vachet** pour son attention dans et autour de la laverie.

Un milliard de mercis pour Mr **Gilles Grandeau** dont la générosité ne serait être assez soulignée. Merci d'avoir accepté de suivre et d'aider un thésard souhaitant transporter une tonne de briques et mélanger des produits étranges. Sans toi, je ne suis pas certain que nous aurions pu réaliser les mélanges et la logistique de l'installation de l'expérimentation n°3. Merci aussi à **Jean-Noël Rampon**, ta gentillesse et bienveillance qui manquent désormais à l'équipe. Merci à **Cyril Girardin** pour son aide au laboratoire, ses conseils et d'avoir accepté de se creuser la tête ensemble sur l'utilisation du CHN sur mes superbes échantillons. Le prochain coup c'est sûr, le passeur marchera de manière impeccable. Merci également pour tes dépannages compresseur permettant d'éviter la perte d'échantillons de pF.

Merci à **Eric** et **Marie-Hélène Beerli**, gardiens en or de l'Agro. Merci pour vos services, attentions, et nos discussions c'est toujours un plaisir de vous croiser. L'établissement a bien de la chance de pouvoir compter sur vous !

Merci à l'équipe COM' d'AgroParisTech pour leurs soutiens dans cette thèse et pour le projet du toit. Merci donc à **Margot Arrault**, **Marie-Pierre Quessette**, **Ludivine Faes**, **Martine Fitoussi**, **Monique Mizart** et **Jean-Hugues Berrou**. **Martine**, c'est promis, un jour le vers de terre sera la mascotte !

Merci à **Aurélié Utzéri** dont l'énergie a permis (notamment) l'organisation des fameux Rendez-vous aux jardins !

Merci à **François Nold** pour son esprit d'ouverture et pour nous avoir ouvert grand les portes de son laboratoire !



Parce que je suis content et fier d'avoir pu démarrer le sujet à tes côtés, merci **Anne-Cécile Daniel** pour ton humanité et ton amitié ! J'espère que l'émigration bretonne ne sera que l'occasion de nouveaux échanges☺. Merci à l'équipe d'EXP'AU : **Yoann**, **Mélanie**, **Théo** et **Anne** pour les discussions et café du midi !

Merci **aux collègues de Grignon**, pour les moments d'échanges. **Alexandra**, **Cyril**, **Ghislaine**, **Justine**, **Marco**, **Naoise**, **Patricia**, **Philippe**, **Raphaël**, **Sophie** et **Valérie** merci pour vos gâteaux et votre bonne humeur. C'est promis, l'un des principaux objectifs de l'après thèse sera de faire un marbré ! Un merci

spécial à ma co-bureau grignonnaise **Sophie Joimel**. Cela a été un plaisir de travailler et de lancer ensemble le projet TROLL ! J'ai hâte de notre futur travail commun au sein de SEMOIR pour toujours plus de collemboles et de prélèvements divers et variés ☺. Pour leurs aides précieuses au sein de TROLL merci à **Nolwenn** et **Pénélope**, stagiaires motivées et que j'ai eu plaisir à rencontrer et côtoyer.

Merci à l'équipe biostatistique PACES de Chatenay Malabry pour m'avoir accueilli avec bienveillance pendant ces deux années de monitorat ! Merci en particulier à **Xavier, Anouar, Valérie** et **Christine**. Bonne continuation à vous.

Pas toujours évident d'être partagé entre trois sites. Pour autant, j'adresse un grand merci aux Tessiens pour leurs accueils, les échanges et le plaisir de les voir : **Alison, Angevine, Antoine, Bruno, James, Jane, Julie, Juan, Pauline, Roxane, Samuel, Sarah** et **Timothée**, merci !



Une thèse, c'est l'occasion de nouvelles rencontres. Je suis bien content que celles-ci, m'ait permis de rencontrer des agriculteurs urbains en or : **Simon** et **Lucie**. Merci pour votre amitié et nos échanges !

Merci à Mr **Antoine Lagneau** pour son amitié et son lancement actif sur le sujet de l'AU !

Si les stat's avait un dieu, ce serait sans doute toi **Battle** ! ;) Pour cela mais surtout pour ton amitié, nos échanges et ton soutien, un grand merci !

Pour les moments passés ensemble et l'amitié qui durent un merci aux copains de la fac : **Caroline, Camille, Isabelle, Johanne, Julien, Lucile, Mathieu, Mathilde** et **Pascaline**. T'inquiète pas ma caca, un jour, nous ferons nous aussi partie du premier groupe ! Hâte des prochains moments avec vous les copains.

Merci à une championne qui s'ignore, Mme **Audrey** ! J'ai hâte que tu reviennes nous montrer ta bouille en métropole☺. Sujet lié, merci à **Joe** pour son amitié et au plaisir de te voir !

Un grand merci également aux « supers bombasses » (**Daphné, Leslie, Iry** et **Lucie**), qu'un cours sur les sols (il n'y a pas de hasard dans la vie) m'a permis de rencontrer. Merci pour votre grain de folie, j'ai hâte des prochaines randos et moments ensemble !

Merci à **Mylène** pour son soutien même lointain !

Merci aux copains d'enfance : **Florent** et **Raph**. Je suis content de vous avoir toujours à mes côtés après toutes ces années.

Un merci à mon **dada**, pour ta présence, nos rigolades, échanges et éternel esprits d'enfants. See you soon bro'.

Pour ces multiples casquettes, son soutien et son amitié, merci Mr **Thibaud**!

Cette fin de thèse a été l'occasion de se revoir, un merci à **Jean-Baptiste** pour son soutien, même de loin ! Hâte de nos prochaines discussions et un jour, c'est promis, je remettrais mes fesses dans un avion pour Stockholm !

Si Bry-sur-marne, n'est pas encore transformé, ce n'est pas faute d'avoir essayé ! Merci aux **D-Bry-D** pour les échanges que nous avons pu avoir et surtout le lien qui continue !

Il paraît que l'on ne choisit pas sa **famille**. Mais si j'en avais la possibilité, je ne vous changerais pas. Merci pour votre soutien, affection et présence. Une pensée spéciale pour les meilleurs **parents** du monde, **mes écolos préférés (Maud et Benoît)**, **docteur Soso** et bien sur **ma nièce** préférée et unique ☺. Merci également à **la famille Humbaire** pour votre accueil et le plaisir des moments passés avec vous !

Si cette thèse était à refaire juste pour te rencontrer, je n'hésiterais pas une seconde. Un immense merci et tout mon amour pour ta présence, ta complicité, ton soutien et toutes ces choses qui font que je suis si heureux de cheminer à tes côtés ma **Suzanne**.

Pour finir, une pensée à vous qui nous avez quitté bien trop vite : **Paul, Jean, Simone, Nath', Paulo...**
On pense très fort à vous et cette thèse elle est aussi pour vous.



Table des matières

Remerciements	4
Table des figures.....	17
Liste des tableaux	24
Acronymes.....	28
Introduction générale : des villes végétalisées et comestibles... ..	30
Chapitre I - Etat de l'art: Toitures végétalisées, services écosystémiques et Technosol	33
Introduction : Les agricultureS UrbaineS	33
Partie 1: Toiture végétalisée et services écosystémiques	38
Introduction : Végétaliser le bâti	38
I. Un champ d'étude pluridisciplinaire - Une toiture, des services rendus	40
II. Approvisionnement alimentaire	44
III. Services de régulation	45
III.1. Rétention des eaux de pluies	45
III.2. Qualité des eaux de drainage	48
IV. Séquestration du C et climat global.....	53
V. Valorisation de résidus urbains	54
VI. Autres services.....	54
Conclusion partielle - Chapitre I - partie 1	54
Partie 2 : Technosol : conception, propriétés et évolution	55
I. Technosol : Définition et domaine d'application	55
I.1. Définition et terminologie	55
I.2. Conception de Technosol productif en toiture : à l'intersection de trois domaines de recherches.....	57
II. Technosol : conception, mélange et matériaux utilisés	58
II.1. Choix des matériaux parentaux	59
II.1.a. Notion de fertilité d'un Technosol.....	59
II.1.b. Critères de choix des matériaux parentaux.....	61
II.2. Mélange des matériaux parentaux	61
II.3. Matériaux parentaux utilisés.....	62
III. Fonctionnement et pédogénèse d'un Technosol	66
III.1. Définition.....	66

III.2.	Processus impliqués.....	66
III.2.a.	<i>Particularité de la pédogénèse d'un Technosol</i>	66
III.2.b.	<i>Processus observé</i>	68
III.2.c.	<i>Temporalité des processus</i>	70
III.3.	Facteurs d'influence	72
III.3.a.	<i>Facteurs biotiques</i>	72
III.3.b.	<i>Facteurs abiotiques</i>	73
Conclusion partielle - Chapitre I - partie 2		74
Conclusion chapitre I		75
Problématique de thèse		76
Chapitre II - Matériel et méthodes : Dispositifs expérimentaux du projet T4P et caractérisation		79
Partie 1 : Matériel - Le projet T4P (Toit Parisien Productif, Projet Pilote)		79
I.	Objectifs	79
II.	Cahier des charges de l'étude	80
III.	Matériaux utilisés	81
IV.	Rotations et pratiques culturales	83
IV.1.	Une rotation de culture simplifiée	83
IV.2.	Une rotation de culture diversifiée	83
IV.3.	Entretien des cultures	84
IV.3.a.	<i>Lutte contre les ravageurs</i>	85
IV.3.b.	<i>Taille des cultures</i>	85
V.	Les expérimentations de thèse	86
V.1.	Caractéristique du site expérimental.....	86
V.2.	Dispositifs expérimentaux.....	87
V.3.	Dispositif expérimental n°1	91
V.3.a.	<i>Traitement expérimentaux</i>	91
V.3.b.	<i>Rotation de culture</i>	93
V.4.	Dispositif expérimental n°2.....	93
V.4.a.	Traitements expérimentaux	94
V.4.b.	<i>Rotation de culture</i>	95
V.5.	Dispositif expérimental n°3.....	96
V.5.a.	<i>Traitements expérimentaux</i>	97
V.5.b.	<i>Rotation de culture</i>	99

Partie 2 : Méthodes	101
I. Climat	101
II. Mesures réalisées au niveau de l'eau	102
II.1. In-situ :	102
II.1.a. Quantification et collecte des eaux de percolation	102
II.1.b. <i>Quantification du volume d'eau d'irrigation</i>	102
II.2. En laboratoire : Analyse des eaux	102
II.2.a. <i>Mesure de pH</i>	103
II.2.b. <i>Mesure de l'azote minéral</i>	103
II.2.c. <i>Mesure du carbone organique total (TOC)</i>	103
III. Mesures réalisées au niveau des plantes	103
III.1. Pesées des récoltes.....	103
III.2. Mesure de matière sèche	104
III.3. Mesure des éléments traces métalliques	104
IV. Mesures réalisées au niveau des Technosols	105
IV.1. « In-situ ».....	105
IV.1.a. Echantillonnage et mesures	105
IV.1.a.i <i>Prélèvement de matériaux parentaux</i>	105
IV.1.a.ii <i>Prélèvement et mesures in-situ</i>	105
IV.1.a.iii <i>Observations réalisées</i>	105
IV.1.a.iv <i>Mesure de matière sèche</i>	106
IV.1.a.v <i>Mesure de masse volumique apparente</i>	107
IV.1.a.vi <i>Développement racinaire</i>	108
IV.1.a.vii <i>Présence de vers</i>	108
IV.1.a.viii <i>Mesure d'épaisseur/effondrement</i>	108
IV.2. En laboratoire	110
IV.2.a. Caractérisation physique	110
IV.2.a.i <i>Teneur en matière sèche</i>	110
IV.2.a.ii <i>Mesures de la capacité de rétention en eau par dessiccation</i>	110
IV.2.a.iii <i>Détermination de la masse volumique réelle</i>	111
IV.2.a.iv <i>Détermination de la masse volumique apparente</i>	113
IV.2.a.v <i>Fractionnement granulométrique de particules</i>	113
IV.2.b. Caractérisation chimique	114
IV.2.b.i <i>Analyse des sols</i>	114
IV.2.b.ii <i>Détermination des potentiels de minéralisation du carbone et de l'azote des matériaux parentaux</i>	114

IV.2.b.iii <i>Indice de stabilité de la matière organique</i>	116
Chapitre III - Service écosystémique et Technosol productif	120
Partie 1 : Services écosystémiques et Technosol productif	120
“Rooftop farming on urban waste provide many ecosystem services”	121
Abstract	121
Introduction	122
I. Material and methods	125
I.1. Pilot rooftop experiment.....	125
I.2. Meteorological data	129
I.3. Ecosystem services evaluation	130
I.3.a. Indicator for food supply (quantity and quality)	130
I.3.b. Indicator for water leaching (quantity and quality)	130
I.3.c. Urban waste regulation	131
I.3.d. Ecosystem service references and expression	131
I.4. Statistical analysis	132
II. Results and discussion	134
II.1. Food supply	136
II.1.a. Food production	136
II.1.b. Food quality.....	136
II.2. Mitigation of runoff water	137
II.3. Water quality	138
II.3.a. Mineral nitrogen loss	138
II.3.b. Carbon loss.....	138
II.4. Waste valuation and carbon storage	139
II.5. Provision of ecosystem services by productive rooftops.....	140
Conclusions	141
Partie 2 : Production alimentaire	142
Introduction	142
I. Matériels and méthodes	143
I.1. Dispositifs expérimentaux mobilisés.....	144
I.2. Technosol et traitement expérimentaux.....	144
I.3. Succession de cultures	146
I.4. Mesures réalisées.....	147
I.5. Analyses réalisées.....	147
II. Résultats	148

II.1.	Teneur en ETM des matériaux parentaux.....	148
II.2.	Quantité de biomasse alimentaire produite	149
II.2.a.	<i>Comparaison à une référence maraîchère</i>	149
II.2.b.	<i>Facteurs d'influence</i>	150
II.3.	Qualité	154
II.3.a.	<i>Comparaison à une norme</i>	154
II.3.b.	<i>Facteurs d'influence</i>	156
III.	Discussion	157
	Conclusion Chapitre III	161
	Chapitre IV : Fertilité d'un Technosol productif constitué de résidus urbains	163
	<i>“Designing fertile Technosols for rooftop agriculture: a trade-off towards biodegradation”</i> 163	
	Introduction	163
I.	Materials and methods.....	166
I.1.	Experimental site and set-up.....	166
I.2.	Technosol parent materials.....	166
I.3.	Plot design	167
I.4.	Technosol sampling.....	168
I.5.	Soil analysis.....	169
I.6.	Nitrogen mineralization.....	172
I.7.	Nutrient stock calculation.....	172
I.8.	Plant material.....	173
I.9.	Abundance of earthworms.....	174
I.10.	Statistical analysis	174
II.	Results.....	174
II.1.	Technosol characteristics.....	174
II.2.	Root profile.....	178
II.3.	Nitrogen mineralization.....	179
II.4.	Nutrients stocks	179
II.5.	Earthworms abundance	180
III.	Discussion	180
III.1.	Technosols fertility.....	180
III.2.	Constructed Technosols made of organic wastes for food production.....	183
III.3.	Conceiving fertile technosols for low input agriculture: managing the trade-off of biodegradation.....	183
	Article conclusion	185

Conclusion Chapitre IV	186
Chapitre V : Pédogénèse d'un jeune Technosol.....	188
Introduction	188
I. Matériels et méthodes	191
I.1. Site expérimental	191
I.2. Modèle de Technosol et traitements expérimentaux.....	192
I.2.a. <i>Modèle de Technosol</i>	192
I.2.b. <i>Traitements expérimentaux</i>	193
I.3. Rotation de cultures et irrigation.....	194
I.3.a. <i>Rotation de cultures</i>	194
I.3.b. <i>Entretien des cultures</i>	194
I.3.c. <i>Irrigation</i>	194
I.4. Processus et mesures réalisées	195
I.4.a. <i>Biodégradation</i>	196
I.4.a.i <i>Analyse élémentaire</i>	196
I.4.a.ii <i>Minéralisation du carbone</i>	196
I.4.a.iii <i>Indice de stabilité de la matière organique</i>	197
I.4.b. <i>Réarrangement structural</i>	198
I.4.b.i <i>Epaisseur des Technosols</i>	198
I.4.b.ii <i>Tassement</i>	199
I.4.c. <i>Lixiviation et lessivage</i>	200
I.4.c.i <i>Volume d'eau perdu</i>	200
I.4.c.ii <i>Perte en azote minéral et carbone dissous</i>	200
I.4.d. <i>Fractionnement granulométrique de particules</i>	201
I.5. Bilan massique d'éléments majeurs.....	201
I.5.a. <i>Calcul des bilans</i>	203
I.5.a.i <i>En masse</i>	203
I.5.a.ii <i>Par élément</i>	204
I.6. Analyses statistiques des données.....	204
II. Résultats.....	205
II.1. Evolution des matières organiques	205
II.1.a. <i>Biodégradabilité des matériaux</i>	205
II.1.b. <i>Evolution in-situ des matières organiques</i>	207
II.2. Evolution structurale.....	209
II.2.a. <i>Epaisseur des couches du Technosol</i>	209

II.2.b. Porosité	211
II.3. Lessivage et lixiviation	215
II.3.a. Drainage.....	215
II.3.b. Lixiviation et lessivage de l'azote minéral	215
II.3.c. Lixiviation de carbone	216
II.3.d. Autres indicateurs de lixiviation.....	217
II.4. Lessivage	218
II.5. Bilan de matière à l'échelle d'un bac.....	219
II.5.a. Bilan massique des Technosols	219
II.5.b. Bilan par élément	220
III. Discussion	222
III.1. Biodégradation des composts	222
III.2. Bilan massique et source d'incertitude.....	223
III.3. Premiers processus de pédogénèse	224
III.4. Déterminants des processus pédogénétiques.....	225
Conclusion chapitre V	227
Chapitre VI : Discussion générale.....	231
Conclusion générale	241
Bibliographie.....	244
Annexes	257
Annexe n° 1 : Description des matériaux utilisés et du matériel d'étude.....	257
Annexe n° 2 : Effondrement et apport de matière	261
Annexe n° 3 : Mesure dans l'eau - détails de la mesure de Nminéral et du carbone dissous.	263
Annexe n° 4 : Méthode de mesure des éléments traces métalliques	264
Annexe n° 5 : Critère d'observation d'un Technosol	265
Annexe n° 6 : Protocole de mesure de pF.....	266
Annexe n° 7 : Protocole de détermination de la masse volumique réelle	269
Annexe n° 8 : Détail µGC – Alexandre.....	282
Annexe n° 9 : Pluviométries et températures durant les périodes d'expérimentations.	283

Annexe n° 10 : Article “Recycling urban waste as possible use for rooftop vegetable garden”

.....	286
Abstract	286
Introduction	287
I. Material and methods	289
I.1. Rooftop experiment	289
I.2. Growing media	289
I.2.a. Initial substrates	289
I.2.b. <i>Mixes tested</i>	290
I.3. Cropping species	292
I.4. Technical processes of the experiment	293
I.5. Sampling and analyses	293
I.6. Statistical analysis	294
II. Results	294
II.1. Production levels	294
II.2. Pollutant levels	296
III. Discussion	297
Conclusion	299
Supplementary materials – Article “Recycling urban waste as possible use for rooftop vegetable garden”	301

Table des figures

Figure 1 : Affiche de la campagne publicitaire de la mairie de Paris « Parisiens pour le climat au moment de la COP21 ».	33
Figure 2 : Illustration de la diversité des formes d'agricultures urbaines. Issu de (Koegler et al. 2017)	35
Figure 3 : Photos illustrant trois projets d'agriculture urbaine. En haut, la Brooklyn grange ; en bas à gauche, le projet de Veni Verdi au collègue Pierre Mendès France et en bas à droite, la ferme Shigeharu Shimamura. Crédits photos : Brooklyn Grange, Shigeharu Shimamura farm et Veni Verdi.....	36
Figure 4 : Nombre de publications sur Web of Science associé à l'agriculture urbaine et à l'agriculture urbain et au sol. Date du graphique : 13/10/2017. AU = Agriculture Urbaine et ES = service écosystémique. Mots clés utilisés : pour agriculture urbaine « Urban agriculture* » ; sol : "growing medi*" OR "soil" or "Technosol" OR "green roof media" OR "substrate*" OR "rooting medi*" et pour services écosystémiques : « ecosystem services ».	37
Figure 5 : Représentation schématique des différentes couches d'une toiture végétalisée. Issu de (Vijayaraghavan 2016).....	38
Figure 6 : Nombre de publications sur Web of Science, associées aux toitures végétalisées et à l'association des mots toitures végétalisées et toit productif ainsi que toitures végétalisées et sol. TV= toiture végétalisée. Date de la recherche: 11/10/2017. Mots clés utilisés : pour toiture végétalisée "green roof*" OR "living roof*" OR "ecological roof*" OR "roof garden*" OR "turf roof*" OR "sod roof*" OR "Garden roof*"; pour toiture végétalisée et production alimentaire/agriculture urbaine : "green roof*" OR "living roof*" OR "ecological roof*" OR "roof garden*" OR "turf roof*" OR "sod roof*" OR "Garden roof*" AND "urban* agriculture*" OR "food*" or "vegetable" or "edible"	40
Figure 7 : Schéma représentant les sources et puits potentiels de polluants liés à une toiture végétalisée. Schéma issu de Wang et al. (2017) légèrement modifié.	49
Figure 8 : Proposition de groupe de SUITMA au regard de leurs potentiels en tant que support de végétation. Figure issue de l'article : (Morel et al. 2014). Crédit photo : Florentin, Huot, Morel, Nehls, Schwartz et Séré.	56
Figure 9 : Représentation schématique de l'ensemble des propriétés, contraintes et risques environnementaux à considérer dans le cadre de la conception d'un Technosol de toiture végétalisée. Les propriétés clés sont symbolisées en vert. Des flèches continues les reliant montrent un lien direct entre deux propriétés tandis qu'une flèche en pointillée souligne un lien indirect. L'ensemble des possibles au niveau des matériaux parentaux utilisables est symbolisé par le cercle pointillé jaune et les	

contraintes le définissant sont également en jaune. Les principaux risques environnementaux liés à l'implantation d'un Technosol constructif sont marqués en rouge.	62
Figure 10 : Aperçu des principaux composants des substrats de cultures en fonction du nombre d'occurrence du matériau dans des publications sur Web of Science en Avril 2016 (Kern et al. 2017).	65
Figure 11 : Figure issue de la thèse d'Hermine Huot (Huot 2013) représentant l'influence de l'homme sur la formation d'un Technosol.	67
Figure 12 : Figure issue de l'article d'Huot et al. (2015) représentant les spécificités potentielles de la pédogénèse d'un Technosol.	69
Figure 13 : Représentation schématique du champ d'étude des différents chapitres constitutifs des travaux de thèse.....	77
Figure 14 : Photos des différents résidus urbains utilisés dans le cadre des expérimentations. ©Baptiste Grard et Charlène Zahir.....	82
Figure 15 : Rotation de culture simplifiée.....	83
Figure 16 : Rotation de culture diversifiée.....	84
Figure 17 : A gauche : Larve de punaise sur un plant de haricot récolté en août 2016. A droite : coccinelle sur une feuille d'épinard en mars 2016 ©BaptisteGrard.....	84
Figure 18 : Plants de haricots tuteurés en juin 2014.....	85
Figure 19 : Carte de Paris localisant le centre Claude Bernard d'AgroParisTech (Source : ©google maps).	86
Figure 20 : Photo aérienne du toit Bertrand Ney avec indication de l'emplacement des différents dispositifs expérimentaux.....	86
Figure 21 : Représentation schématique de l'ensemble des traitements du dispositif expérimental n°1.	91
Figure 22 : Organisation d'un bac expérimental du dispositif n°1 (à gauche) et photo de 15 bacs du dispositif en avril 2017 (à droite) ©Baptiste Grard.....	91
Figure 23 : Traitements du dispositif expérimental n°1.	92
Figure 24 : Rotation de culture en place sur le dispositif expérimental n°1.....	93
Figure 25 : Représentation schématique de l'ensemble des traitements du dispositif expérimental n°2.	93

Figure 26 : Organisation d'un bac expérimental du dispositif n°2 (à gauche). Bacs expérimentaux du dispositif avec les bidons servant à la collecte des eaux de percolations (à droite). ©Baptiste Gard..	94
Figure 27 : Schéma des traitements expérimentaux du dispositif n°2.....	95
Figure 28 : Rotation de culture en place sur le dispositif expérimental n°2.....	95
Figure 29 : Représentation schématique de l'ensemble des traitements du dispositif expérimental n°3.	96
Figure 30 : Bacs expérimentaux du dispositif n°3 en novembre 2015. © Baptiste Gard.	97
Figure 31 : Schéma de l'organisation d'un bac expérimental du dispositif n°3 en vue explosée (à gauche) et à partir d'une photo (à droite).	97
Figure 32 : Schéma des traitements expérimentaux du dispositif n°3.....	99
Figure 33 : Rotation de culture mise en place sur le dispositif expérimental n°3 entre novembre 2015 et 2016.	99
Figure 34 : Photo de la station météorologique Campbell CR1000 en mai 2016 sur le toit « Bertrand Ney » ©Mairie de Paris.	101
Figure 35 : Photo d'une zone (35*35 cm) de prélèvement sur deux bacs différents avec un horizon inférieur en brique. A gauche, la couche supérieure a été retirée. A droite, l'intégralité du Technosol a été retiré jusqu'au bas de l'horizon drainant. Photo prise en novembre 2016 lors de prélèvement au bout d'un an sur les Technosols du dispositif n°3. ©Gard Baptiste.....	106
Figure 36 : A gauche, photographie sur un Technosol à 6 mois de deux cylindres de pF enfoncés dans l'horizon supérieur du Technosol. A gauche : photographie d'une grille (maille - 1cm) servant au profil racinaire ici pour l'horizon supérieur. Les deux photographies ont été prises sur les Technosols du dispositif n°3. ©Alexandre Barrier-Guilot et Baptiste Gard.....	107
Figure 37 : A gauche, mesure d'épaisseur dans une zone de prélèvement. A droite, des vers remis sur la surface d'un Technosol après comptage et pesé.....	109
Figure 38 : Photo d'un pycnomètre.©Alexandre Barrier-Guilot	111
Figure 39 : Eprouvette graduée utilisée pour la détermination de la masse volumique réelle du bois broyé.....	112
Figure 40 : 5 fractions obtenues après le fractionnement granulométrique d'un échantillon de bois. © Alexandre Barrier-Guilot	113

- Figure 41** : Photographie, à gauche : un tube PVC contenant un (minéralisation du carbone) ou deux (minéralisation de l'azote) échantillon(s). A droite : photographie du micro-GC et d'échantillon en cours de mesure pour leur teneur CO₂. ©Alexandre Barrier-Guillot et Baptiste Grard..... 116
- Figure 42** : Upper panel: Overview of the rooftop of AgroParisTech in March 2015. Image by David Haddad.com with permission. Lower panel left: Experimental devices in April 2013. Image by Baptiste Grard with permission. Lower panel right: Top view of an experimental plot with the drip irrigation system in April 2014. Image by Baptiste Grard, with permission. 125
- Figure 43 a & b** : (a): Schematic drawing of experimental box. Legend : [B] : Bottle storage for the overflow of water, [E] : Evacuation, [G] : Geotextile, [I] : Drip irrigation system, [R] : Reserve of water with clay balls, [S] : Wooden pieces to raise the box, [T] : Technosol, [V] : Vegetation layer and [W] : waterproof membrane. (b): Description of the three treatments of the experiment. 127
- Figure 44 a, b, c & d** : Characteristics of the organic waste used in the experiment. Mean and standard error based on three replicates..... 128
- Figure 45** : Représentation schématique des traitements expérimentaux du dispositif n°1. 144
- Figure 46** : Représentation des traitements expérimentaux du dispositif n°2. 145
- Figure 47** : Représentation des traitements expérimentaux du dispositif expérimental n°3. Mélange = compost de biodéchets (60% en volume) et résidu de champignonnière (40% en volume). 145
- Figure 48** : Rotation de culture en place sur le dispositif expérimental n°1..... 146
- Figure 49** : Rotation de culture en place sur le dispositif expérimental n°2..... 146
- Figure 50** : Rotation de culture mise en place sur le dispositif expérimental n°3 entre novembre 2015 et 2016..... 147
- Figure 51** : Comparaison des rendements obtenus sur les 3 dispositifs expérimentaux par rapport à ceux de maraîchers professionnels (indiqué par les points verts issus de l'ITAB (2017). Le rendement de carotte ne considère ici que la biomasse racinaire. Les valeurs indiquées par le boxplot correspondent au 1^{er} quartile, à la médiane et au 3^{ème} quartile, ainsi qu'à l'écart-type..... 149
- Figure 52** : Graphiques représentant en fonction du type de légume et pour l'ensemble des mesures réalisées sur les trois dispositifs expérimentaux les concentrations par type d'élément trace métallique. Sur le graphique du cadmium, les trois valeurs pour la première récolte d'épinard (autour de 0,4 mg.kg⁻¹) ont été exclues..... 157
- Figure 53 (a)** – left: Picture of the experimental trial on the rooftop AgroParisTech in 06-22-2016. © MairiedeParis. (b) – right: Soil profile from experimental plot [O - WP] in 7th of November 2016 (after one growing year). ©Baptiste Grard 167

Figure 54 (a) – right: Experimental treatments: [OP] : Organic with Plants; [MP] : Mineral with Plants; [OPE] : Organic with Plants and Earthworms; [MPE] : Mineral with Plants and Earthworms. BC: Biowaste compost and SGM: Spent coffee grounds with mycelium. (b) – left: Diagram of the structure of one experimental plots with the different layers.	170
Figure 55 : Principal component analysis of physical and chemical Technosol characteristics. n = 3, data used: bulk density, pH, CaCO ₃ , K, Fe, P ₂ O ₅ , Mn, N and organic carbon contents, CEC, electrical conductivity, porosity, water and void indexes at pF ₁	177
Figure 56: Root occurrence after one year of production.....	178
Figure 57 : Nitrogen mineralization kinetics of the Technosols parent materials.	179
Figure 58 : Modèle conceptuel du devenir des nutriments au sein d'un Technosol productif. Issu et modifié à partir de Myers et al. (1994).....	185
Figure 59 : Photographie, d'une partie des bacs expérimentaux sur le toit d'AgroParisTech « Bertrand Ney » en août 2016. ©BaptisteGrard	191
Figure 60 : Schéma d'un bac expérimental ; (a) : vue extérieure et (b) : vue intérieure éclatée des couches le constituants.	192
Figure 61 : Schéma des différents traitements expérimentaux mis en place au sein de l'expérimentation n°3.	193
Figure 62 : Calendrier de cultures de l'expérimentation n°3 entre novembre 2015 et 2016.....	194
Figure 63 : En haut à gauche, bac d'épinards en mars 2016 ; en haut à droite : choux en association avec des haricots en juillet 2016 ; en bas : laitues en association avec des haricots en septembre 2016. ©Baptiste Grard et Charlene Zahir.....	195
Figure 64 : Représentation des flux entrants et sortants à l'échelle du Technosol. L'épaisseur des flèches n'est pas corrélée avec l'importance des flux. Les éléments en gras et soulignés font l'objet soit d'une quantification directe soit d'une estimation dans le cadre de cette étude.....	202
Figure 65 : Résultats du fractionnement biochimique de la matière organique par la technique Van Soest. Les tests statistiques ont été réalisés par fraction, des lettres différentes indiquent des différences significatives.....	205
Figure 66 : % du stock initial de carbone minéralisé au sein des matériaux parentaux lors d'une incubation à 20°C en laboratoire de 239jours.	206
Figure 67 : Evolution de l'épaisseur totale des Technosols en % de l'épaisseur initiale en fonction du traitement et du temps. Les lettres ou chiffres représentent la comparaison statistique des données. Les	

lettres correspondent à la comparaison entre les mois, tandis que les chiffres portent sur la comparaison entre traitement. Lorsque les lettres ou chiffres sont différents, la différence est significative. 209

Figure 68 : Evolution de l'épaisseur par horizon pour deux traitements sans plante en fonction du temps. 210

Figure 69 : Distribution des volumes des différentes classes de taille de pores, matériaux parentaux et horizons. 212

Figure 70 : Concentrations en nitrates dans les eaux de percolation d'un bac en fonction du temps (mg.l^{-1}). 215

Figure 71 : Concentration en carbone total dissous à l'échelle d'un bac en fonction du traitement et du temps exprimés en mg.l^{-1} 216

Figure 72 : Représentation schématique pour un traitement de l'évolution des stocks de carbone (en haut) et d'azote (en bas), et des principaux processus quantifiés. 229

Figure 73 : Binette utilisée au sein de l'expérimentation. ©Zahir Charlene. 258

Figure 74 : Effondrement des Technosols, sur le dispositif n°1. 261

Figure 75 : Tables de succion. 266

Figure 76 : Schéma récapitulatif du fonctionnement d'une table pF. Réalisé par Alexandre Barrier-Guilot. 267

Figure 77 : Echantillon sur table de succion. 267

Figure 78 : Presse Richards. 268

Figure 79 : Représentation schématique d'un pycnomètre. 270

Figure 80 : Pycnomètres en agitation sur un plateau sur un agitateur orbital. ©ABG. 272

Figure 81 : Décantation incomplète dans le pycnomètre de gauche. A droite, la décantation est satisfaisante. ©ABG. 272

Figure 82 : A gauche, ajustement d'un pycnomètre avec une aiguille médicale. A droite, niveau d'éthanol incorrect car en dessous du trait de repère d'un pycnomètre. ©ABG. 273

Figure 83 : Bouchon composé d'un tube PVC et de toiles de lyoph. ©ABG. 277

Figure 84 : Pesée des échantillons secs dans les éprouvettes. ©ABG. 278

Figure 85 : Agitation des échantillons. ©ABG. 279

Figure 86 : Le bouchon retient toutes les grosses particules flottantes de l'échantillon. ©ABG. 279

Figure 87 : Eprouvettes avant insertion du bouchon à gauche, puis avec le bouchon à droite. ©ABG.	279
Figure 88 : Bulles d'air à éviter avant ajustement final du niveau d'eau. ©ABG.....	280
Figure 89 : Diagramme ombrothermique de la toiture expérimentale « Bertrand Ney » entre mars et décembre 2012.	283
Figure 90 : Diagramme ombrothermique de la toiture expérimentale « Bertrand Ney » durant l'année 2013.....	284
Figure 91 : Diagramme ombrothermique de la toiture expérimentale « Bertrand Ney » durant l'année 2014.....	284
Figure 92 : Diagramme ombrothermique de la toiture expérimentale Bertrand Ney durant l'année 2015.	284
Figure 93 : Diagramme ombrothermique de la toiture expérimentale « Bertrand Ney » durant l'année 2016.....	284
Figure 94 : Diagramme ombrothermique de la toiture expérimentale « Bertrand Ney » entre les mois de janvier et avril. 2017.....	285
Figure 95 : The rooftop of AgroParisTech in 2012. On the right side the first crop sequence (experimental device n°1) (Photo credit: Xavier Remongin).....	289
Figure 96 : Description of the five treatments used in the T4P experiment.....	292
Figure 97 : Representation of the first crop sequence (experimental device n°1) in the T4P experiment.	292
Figure 98 (i), (ii), (iii), (iv), (v) & (vi) : Biomass production (edible: tomatoes and lettuce; above ground for green manures) per box during the two-year experiment T4P. On the graph different letters means significant differences; p-value<0.05. The red dot symbolize the mean value and the red line show the standard deviation.....	295
Figure 99 : Rain and temperature for almost the entire two growing seasons. Unfortunately, the data are not complete due to a problem with the meteorological stations on the roof.....	302

Liste des tableaux

Tableau 1 : Caractéristiques de trois fermes urbaines en France, aux Etats-Unis et au Japon. (a) : (Daniel 2017) ; (b) : https://www.brooklyngrangefarm.com/ ; (c) : https://futurefood2050.com/in-the-pink-speeding-up-crop-growth/	37
Tableau 2 : Principales catégories et caractéristiques des toitures végétalisées. Source : ADIVET légèrement modifié.	39
Tableau 3 : Services écosystémiques pouvant être attendus d'une toiture végétalisée productive	41
Tableau 4 : Etude de cas existants dans des revues à comité de lecture sur des systèmes de production en toiture à base de sol. (a) : (Aloisio et al. 2016); (b) : (Eksi et al. 2015); (c) : (Elstein et al. 2008) ; (d) : (Kong et al. 2015) ; (e) : (Orsini et al. 2014) ; (f) : (Sanyé-Mengual et al. 2015) ; (g) : (Whittinghill et al. 2013) et (h) : (Whittinghill et al. 2016b) ; (i) : (Whittinghill et al. 2014) ; (j) : (Whittinghill et al. 2015) et (k) : (Whittinghill et al. 2016a). ACV = Analyse de cycle de vie.	43
Tableau 5 : Processus biologiques, physiques et chimiques influencés par la structure du sol. Tableau issu de Díaz-Zorita et al. (2002).	60
Tableau 6 : Principaux résultats de l'analyse SWOT sur l'utilisation des composts en tant que support de culture, réalisé par (Raviv 2013).	65
Tableau 7 : Les processus observés et conditions d'études de 5 articles traitant de la question de la pédogénèse de sol construit.	71
Tableau 8 : Description des trois dispositifs expérimentaux.	89
Tableau 9 : Ensemble des mesures réalisées sur les trois dispositifs expérimentaux	90
Tableau 10 : Analyses et méthodes sous accréditation réalisée par le laboratoire INRA Arras.	114
Tableau 11 : Evaluated ecosystem services and their indicators.	133
Tableau 12 (a and b) : Values for the different ecosystem services derived from the literature and the T4P experiment. Studies: (1) Technosol productive roof tops, this study and published studies (a, b, c); (2) Cropland, average worldwide values ; (3) Asphalt roof ; (4) Non productive intensive rooftop ; (5) Non productive extensive rooftop. The T4P values are expressed as averages over the two years of the study. Results for food supply (food production and food quality) are detailed by production and in total (lettuce, tomato and green manure). Cu = Copper ; Zn = Zinc, Cd = Cadmium, Pb = Lead and T. = Traitement. Sources: ^a (Samangooei et al. 2016), ^b (Whittinghill et al., 2016), ^c (Orsini et al. 2014), ^d (Czemiel Berndtsson 2010), ^e (Zhang et al. 2015), ^f (References from professional producer), ^g (ITAB 2017), ^h (Beck et al. 2011), ⁱ (Getter et al. 2009). Dry bulk density used: Green waste compost = 0.3 g.cm ⁻³	

³; Potting soil = 0.52 g.cm⁻³; Crushed wood = 0.18 g.cm⁻³. TOC = Total Organic Carbon, TIC = Total inorganic Carbon and TC = Total Carbon. 135

Tableau 13 : Teneur en élément trace métallique des matériaux parentaux en comparaison à la norme AFNOR NF U 44-551 sur les supports de cultures. 148

Tableau 14 : Comparaison des productions en fonction des traitements. Des lettres différentes indiquent un écart significatif entre deux traitements (p-value <0,05). Les tests statistiques n'ont pas été réalisés sur les valeurs projetées de rendement mais les valeurs par bac. « Dispo. exp. » = dispositif expérimental. 153

Tableau 15 : Production totale par saison de culture et par traitement pour les différents dispositifs expérimentaux. Les données indiquent la moyenne $\pm$ l'écart-type. Les saisons de cultures pour les dispositifs n°1 et 2 sont considérées entre le mois de mars à mars de deux années. Alors qu'une année de culture pour le dispositif expérimental n°3 est considérée entre les mois de novembre et novembre de deux années. 154

Tableau 16 : Concentration en éléments traces métalliques au sein de différents légumes des dispositifs expérimentaux. Moy. = moyenne ; E-T = écart-type. N. = Norme ; la norme se réfère à une norme européenne (EU 2011). A. = ANSES; se réfère à une étude EAT2 de l'ANSES en 2011 sur la contamination de l'alimentation française (ANSES 2011). Les tests statistiques ont été réalisés par dispositif expérimental avec des analyses à deux facteurs. 155

Tableau 17 (a): Physical characteristics of the parent materials (T0) and of the Technosol after one year. **(b) :** Chemical characteristics of the parent materials (T0) and of the Technosol after one year. 176

Tableau 18 : Nutrient reserves in the Technosol compared to estimated cultural annual needs of plants 179

Tableau 19 : Détails des calculs des exportations estimées par les cultures en N et K. Les chiffres de rendements sont issus des résultats expérimentaux de ce dispositif. 203

Tableau 20 : Evolution du C/N entre T0 et T+1an. Des lettres différentes indiquent des différences significatives (p-value < 0,05). 207

Tableau 21 : Evolution de la capacité d'échange cationique des Technosols durant la première année. Les lettres indiquent des différences significatives. 208

Tableau 22 : Evolution des masses volumiques apparentes en fonction des traitements, du temps et de l'horizon. Abréviation : H. inf. = horizon inférieur ; H. int. = horizon intermédiaire et H. sup. = horizon supérieur. Les tests statistiques ont été réalisés à la fois pour l'ensemble des dates et des traitements. Deux lettres différentes indiquent une différence significative. 211

Tableau 23 : Evolution par classe de pores de leurs volumes en fonction du traitement. Valeur en $\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$ de solide. Les tests statistiques ont été réalisés au sein d'une même classe de pores. Deux lettres différentes indiquent une différence significative.	214
Tableau 24 : Volume total percolé issu des bacs expérimentaux après un an. Les lettres différentes montrent des différences significatives.	215
Tableau 25 : Perte en carbone et azote en fonction du traitement après un an d'expérimentation. Des lettres non identiques indiquent une différence significative.	216
Tableau 26 : Evolution des caractéristiques chimiques des Technosols durant la première année. Les lettres indiquent des différences significatives par variable.	217
Tableau 27 : Evolution granulométrique des Technosols entre T0 et T+6mois. Des lettres différentes indiquent des différences significatives au sein d'une même classe.	218
Tableau 28 : Bilan massique (en matière sèche) d'un Technosol à l'échelle d'un bac. m.o = Matière organique.	219
Tableau 29 : Bilan par élément entre T0 et T+1an. Les valeurs sont exprimées à l'échelle d'un Technosol et par bac. $C_{\text{organique}}$ = carbone organique. Pour des raisons de simplicité et en l'absence de mesure des teneurs en C, N et P dans l'horizon intermédiaire, les teneurs de cet horizon ont été affectées à l'horizon inférieur pour les traitements O, OP et OPE.	221
Tableau 30 : Résumé d'indicateurs de certains processus de pédogénèse observés durant cette première année pour deux traitements. N.B. : la valeur de 144% pour MP, est liée à des gains de masse au niveau de l'horizon inférieur.	228
Tableau 31 : Résumé des principales différences et des principaux résultats comparables entre les dispositifs n°2 et 3.	236
Tableau 32 (a) et (b): Principales caractéristiques chimiques des matériaux parentaux utilisés au sein de l'expérimentation.	260
Tableau 33 : Apport de la couche supérieure de chaque traitement par bac, proportionnelle à l'effondrement pour le dispositif n°1.	261
Tableau 34 : Mesure d'épaisseur et apport de matière réalisés sur le dispositif n°2. Moyenne $\pm$ écart-type.	262
Tableau 35 : Fiche descriptive d'un profil de Technosol.	265
Tableau 36 : Somme des précipitations annuelles durant les périodes d'expérimentations.	283

Tableau 37 : Average physico-chemical characteristics of the source materials for growing substrate used in 2014. SD = Standard Deviation and DM = Dry matter, n=3. The analyses were performed by the soil laboratory of INRA ARRAS that is accredited by COFRAC. <http://www6.lille.inra.fr/las...> 290

Tableau 38 a and b: Cadmium and lead contents in cherry tomatoes (a) and lettuce (b) during the two-year experiment. European standard refers to the standard CE n°188-2006. FM = Fresh Matter and SD = Standard Deviation..... 296

Tableau 39 : p-values from the statistical analysis of the biomass production during the two growing seasons..... 304

Tableau 40 : Projected production for the cropping season 2012-2013 and 2013-2014. S-D: standard deviation 304

Acronymes

- ACV : Analyse de Cycle de Vie
- AU : Agriculture Urbaine
- DOC : Carbone Organique Dissous
- ETM : Élément Trace Métallique
- FLL : Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau
- IUSS : The International Union of Soil Sciences
- m.o : Matière Organique
- MS: Matière Sèche
- MVA : Masse Volumique Apparente
- MVR : Masse Volumique réelle
- NFT : Nutrient Film Technique
- SUITMA : Soils of Urban, Industrial, Traffic, Mining and Military Areas
- WRB : Word Reference Base for soil resources.



© Blu

Introduction générale : des villes végétalisées et comestibles...

Les villes, devenues lieux de vie de la majorité des êtres humains sur la planète¹, sont des milieux en expansion aboutissant à la concentration de ressources matérielles et immatérielles sur de faibles surfaces. La consommation de ressources non renouvelables qui est associée à ce milieu le rend non durable. Ces ressources sont en effet soit non renouvelables, soit non renouvelées à la vitesse de leur consommation. L'expansion des villes a ainsi participé à l'artificialisation de 60 000 ha par an de terres (au 2/3 agricoles) entre 2006 et 2014². Par ailleurs, même si les villes ne représentent que 2% de la surface du globe, elles concentrent globalement 80% de la production économique, représentant entre 60-80% de la consommation des ressources énergétiques et entre 60-80% des émissions de gaz à effet de serre (Kamal-Chaoui et Robert (2009) dans (Luo et al. 2015)). De part ces enjeux, **les villes sont au cœur des problématiques environnementales actuelles.**

- **Des villes/mines à ciel ouvert à transformer**

Des approches, comme celle du **métabolisme urbain**, visant à appréhender l'ensemble des processus par lesquels les villes mobilisent, consomment et transforment des ressources naturelles, nous permettent de mieux comprendre l'impact des villes (Barles 2008). Ce type d'analyse nous pousse à voir les villes actuelles comme ayant des cycles ouverts de matière avec d'importants flux entrant et sortant, couplés à une quasi-absence de recyclage des matières. Les villes sont ainsi devenues des « mines » de matières : pour exemple, l'ensemble des déchets organiques produits par les ménages en milieu urbain, constitue un gigantesque réservoir de nutriments voire d'énergie, pour le moment majoritairement non valorisé. C'est pourquoi, bon nombre d'auteurs mettent en avant le nécessaire recyclage des matières dans une logique d'économie circulaire (Lehmann 2011) visant à rendre les villes « en cercle fermé ». Sans être associé à un changement de mode de vie permettant une réduction de la consommation, ce recyclage s'avérera toutefois obsolète (Barles 2008).

- **Végétalisation de la ville : un important levier pour générer des services écosystémiques**

Les villes de demain sont majoritairement envisagées par les aménageurs des villes (urbanistes, architectes, écologues etc.) et par les citoyens comme durables, résilientes, auto-suffisantes, adaptables et végétalisées. Tous ces objectifs nous invitent à repenser leurs conceptions pour y intégrer le vivant et permettre de remettre des espaces de nature fonctionnelle générateurs de services écosystémiques. Le développement des infrastructures vertes (bassins de rétention, parcs, toitures végétalisées etc.) tel

¹ www.unhabitat.org

² <http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/lessentiel/ar/272/1097/lartificialisation-sols.html>.

qu'envisagé aujourd'hui est de ce point de vue un levier majeur pour développer un milieu urbain à haut niveau de services écosystémiques (Mc Phearson et al 2011 ; Gómez-Baggethun and Barton 2013).

Les services écosystémiques ont été définis par le Millenium « Ecosystem Assesment »³ comme les bénéfices que les humains tirent des écosystèmes. Quatre grands types de services sont généralement distingués : les services de support, d'approvisionnement, de régulation et culturel. Dans le cas du milieu urbain, les services écosystémiques découlent de structures écologiques naturelles préservées en leur sein ou résultant d'une construction par l'homme. Les toitures végétalisées, dont le nombre croît dans le monde, appartiennent à cette deuxième catégorie. Celles-ci sont développées principalement pour les **services écosystémiques** qu'elles engendrent dans une vision multifonctionnelle. Dans le cas du milieu urbain, il est essentiel de souligner que les services écosystémiques découlent des écosystèmes et donc de la composante vivante de ces derniers. Cela implique de comprendre leur fonctionnement pour mieux les appréhender.

Classiquement, les toitures végétalisées sont développées dans un objectif ornemental et esthétique. De ce point de vue, le développement récent de **toitures productives** (i.e. de biomasse alimentaire) représente une opportunité pour générer de nouveaux services écosystémiques, tel que la production de biomasse alimentaire. Cette nouvelle forme de toiture, représente tout autant une opportunité qu'une interrogation quant à son potentiel vis-à-vis des services écosystémiques rendus. En effet, les toitures productives, du fait de leur fonction de production de biomasse alimentaire interrogent la conception classique de la dite toiture au niveau du type de sol utilisé, de son entretien et de son aménagement. Au niveau du sol, l'utilisation de matériaux plus riches et en plus grande proportion, tels que les composts, pour subvenir au besoin des plantes a ainsi été soulevé (Eksi et al. 2015). Néanmoins, les recherches concernant les toitures productives ainsi que les services écosystémiques qui pouvaient y être associés en sont à leurs balbutiements. Il existe en l'espèce une occasion pour la recherche de faire progresser la connaissance sur un sujet et dans un même temps d'aider les acteurs à développer et améliorer cet objet au regard de sa fonctionnalité écologique. De manière concomitante la montée de ces thématiques est intrinsèquement liée à des enjeux soulevés par la nécessaire transformation du milieu urbain. La question du sol est de ce point de vue essentielle avec une opportunité générée par la réutilisation de résidus urbains en son sein.

³ <http://www.millenniumassessment.org/fr/>

- **Organisation de la thèse**

Face à ces différents constats, étudier un modèle de toiture productive conçu uniquement à partir de résidus urbains a été le point de départ de cette thèse. Elle poursuit un double objectif, d'une part, quantifier les services écosystémiques rendus par une toiture végétalisée et d'autre part étudier l'évolution du sol construit à partir de résidus urbains. Pour cela, une démarche principalement expérimentale a été utilisée, visant à étudier des systèmes existants ou conçus dans le cadre de ces travaux.

Un état de l'art sur les services écosystémiques associés aux toitures végétalisées et sur les technosols ou sols construits sera tout d'abord réalisé. Celui-ci permettra de dégager les problématiques traitées (**chapitre I**). Le **chapitre II** visera à expliciter l'ensemble des outils mobilisés pour répondre aux problématiques soulevées. Par la suite, seront étudiés les services écosystémiques rendus par les toitures végétalisées (**chapitre III**), puis, le Technosol, sa fertilité (**chapitre IV**) et son évolution (**Chapitre V**). Enfin, les résultats et conclusions tirés de l'expérimentation seront discutés (**Chapitre VI**).

Chapitre I - Etat de l'art: Toitures végétalisées, services écosystémiques et Technosol

Ce chapitre I a pour objectif de réaliser un état des connaissances sur les deux grandes thématiques abordées par cette thèse : (i) Toitures végétalisées et services écosystémiques et (ii) Technosols construits sur toiture végétalisée. Ce chapitre débutera par une introduction visant à définir l'objet d'étude qu'est l'agriculture urbaine.

Introduction : Les agricultureS UrbaineS

Parmi les infrastructures vertes, l'agriculture urbaine, dont un redéploiement récent est observé, en particulier dans les villes de l'hémisphère Nord, est vue comme une solution majeure pour les villes de demain. Ainsi, de nombreuses métropoles encouragent sa croissance : Toronto a développé depuis 2012 un plan d'action pour l'agriculture urbaine nommé GrowTO. Ce plan, qui résulte de la collaboration entre la ville et ses habitants, a abouti à l'adoption de 68 recommandations dans 6 domaines d'actions visant à développer la production alimentaire au sein du territoire (Nasr et al. 2014). A New-York, le département de l'environnement de la ville a subventionné à hauteur de 592 730\$ l'une des fermes de 0,65Ha de la Brooklyn Grange. Cette subvention a été accordée pour (i) faire vivre la communauté locale et (ii) réduire par rétention d'eau le volume d'eau de ruissellement (Harada et al. 2017).

Tandis qu'à Paris, l'équipe municipale s'est engagée, sur un objectif de mandature (2014 – 2020), à développer 100Ha de toitures et murs végétalisés dont 1/3 consacré à de l'agriculture urbaine⁴. La mairie



Figure 1 : Affiche de la campagne publicitaire de la mairie de Paris « Parisiens pour le climat au moment de la COP21 ».

⁴ <https://www.paris.fr/vegetalisonslaville>.

a dans ce cadre réalisé plusieurs appels à projets visant à faciliter l'installation de projets d'Agriculture urbaine : végétalisation innovante⁵, réinventons Paris⁶ et le dernier en date Paris Culteurs⁷. La mairie a par ailleurs valorisé ces initiatives, par exemple au travers de campagnes publicitaires telle qu'illustrée sur la **Figure 1** au moment de la COP21. Cette volonté forte affichée par certaines municipalités répond à plusieurs objectifs : (i) répondre à une demande citoyenne importante pour plus de nature en ville, (ii) un objectif politique et (iii) de transformer les villes pour les rendre plus durables.

- **Définition**

L'agriculture urbaine (AU), peut être définie de multiples façons (Sanyé-Mengual 2015). Nous nous reporterons ici à la définition portée par Mougeot (2000) : "Urban agriculture is an industry located within (intraurban) or on the fringe (periurban) of a town, a city or a metropolis, which grows or raises, processes and distributes a diversity of food and non-food products, (re-)using largely human and material resources, products and services found in and around that urban area, and in turn supplying human and material resources, products and services largely to that urban area...". Trois aspects essentiels de l'agriculture urbaine (AU) émergent de cette définition (i) l'importance des liens qu'elle entretient avec la ville (flux de ressources, de matières etc.), (ii) sa diversité de formes et (iii) sa diversité de fonctions. L'AU n'est pas un concept nouveau, au 19^{ème} siècle de nombreux maraîchers étaient encore présents jusqu'au centre de Paris, permettant une production alimentaire en ville. Toutefois, l'urbanisation galopante associée à une augmentation de la population et une globalisation des échanges, a engendré, à Paris comme dans beaucoup de villes de l'hémisphère Nord, la disparition de ces différentes formes d'AU productives. A contrario, ce phénomène n'a été que peu observé dans l'hémisphère Sud où l'agriculture urbaine reste très présente et productive au sein de grandes métropoles (Orsini et al. 2013). Cette dualité existante, l'étude portera uniquement sur l'hémisphère Nord.

Les différentes formes d'AU peuvent être classées selon différents critères : circuit de distribution, type de production, support de production etc. Le lieu d'implantation est ici le critère retenu afin de classer les différentes formes, comme représenté au sein de la **Figure 2**. Celle-ci distingue les formes d'AU au sol telles que les jardins partagés ou les micro-fermes urbaines et celle sur le bâti tel que des potagers ou des serres sur les toits. La **Figure 3** illustre trois projets d'AU dont les principales caractéristiques sont résumées dans le **Tableau 1**.

⁵ <http://www.acteursduparisdurable.fr/actus/appel-a-projets-vegetalisation-innovante>

⁶ <http://www.reinventer.paris/>

⁷ <http://www.parisculteurs.paris/>

• Réalité du développement et enjeux

Les formes d'agriculture urbaines liées au bâti, telle que la Brooklyn Grange, ont été regroupées sous le nom de Z-farming (pour Zero-Acreage Farming) par Specht et al. (2013). Comme illustré par la **Figure 2** et **Figure 3**, ces formes regroupent des projets de culture dans et sur le bâti. Lors d'une étude sur 73 projets de Z-farming à l'international, Thomaier et co-auteurs (2014) ont montré que 64,4% de ces projets étaient des jardins en toiture en plein air. L'utilisation d'un support de culture équivalent à un sol, a été recensé dans 69,9% des projets. Par ailleurs, la plupart de ces projets revendiquent une forte dimension environnementale. Celle-ci repose directement sur les services écosystémiques rendus par ces formes d'agriculture urbaines.

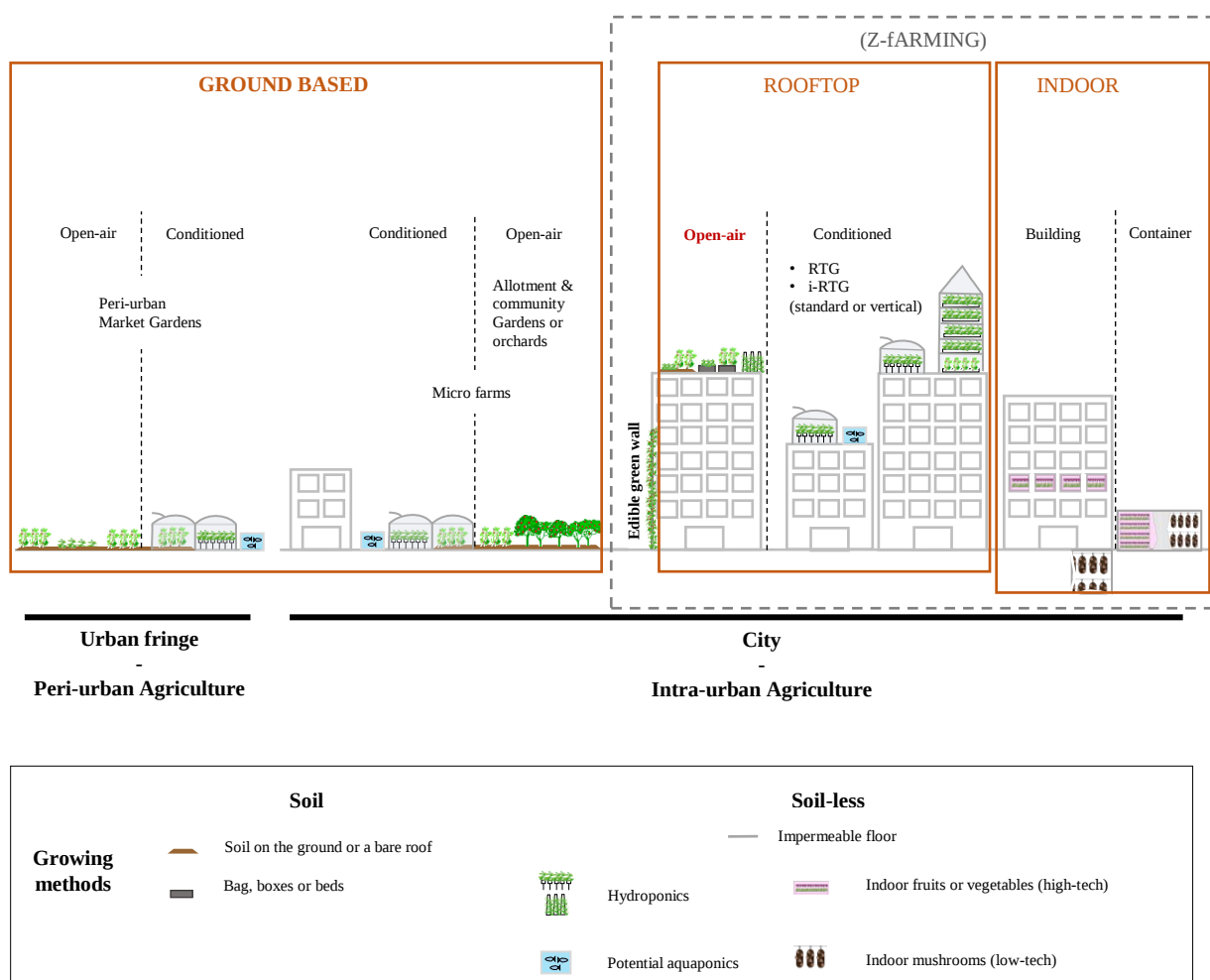


Figure 2 : Illustration de la diversité des formes d'agriculture urbaines. Issu de (Koegler et al. 2017)

- **Etude de la multifonctionnalité de l'agriculture urbaine**

L'agriculture est par essence une activité multifonctionnelle, pouvant permettre le recyclage de flux de matière, la création de ressources tout en étant associée à diverses fonctions sociales, pédagogiques etc. Le manque de connaissances actuelles concernant les services écosystémiques et l'agriculture urbaine a été soulevé par divers auteurs (Lin et al. 2015; Wilhelm and Smith 2017). L'intérêt scientifique pour le sujet de l'agriculture urbaine est récent. Ainsi 50% des articles sur le sujet ont été écrits ces trois dernières années (voir **Figure 4**). Par ailleurs, si les services écosystémiques rendus par les projets sont souvent mis en avant par les porteurs de projets, collectivités, ou aménageurs, les études sur le sujet restent rares avec seulement 25% des articles mentionnant le terme. Enfin, si les sols sont reconnus comme ayant un rôle clé au niveau des services écosystémiques rendus, notamment au niveau d'une toiture végétalisée (Morel et al. 2014; Vijayaraghavan 2016), la littérature sur le sujet reste très faible.



Figure 3 : Photos illustrant trois projets d'agriculture urbaine. En haut, la Brooklyn Grange ; en bas à gauche, le projet de Veni Verdi au collègue Pierre Mendès France et en bas à droite, la ferme Shigeharu Shimamura. Crédits photos : Brooklyn Grange, Shigeharu Shimamura farm et Veni Verdi.

Entité	Veni Verdi (Association)	Brooklyn grange (Entreprise)	Mirai society (Entreprise)
Lieu	Collège Pierre Mendès France, Paris, France	Brooklyn Navy Yard, New York	Tagajo, Japon
Objectifs et fonctions	Production, pédagogie, recyclage de résidus urbains et social	Production, récréatif et pédagogique	Production
Support de production	Sol (terre végétale et compost)	Substrat de toiture végétalisée (Rooflite®)	Hydroponie sous LED
Surface totale (ST) et cultivée (SC)	ST = 1,5Ha ; SC = 1650m ²	ST = 6000m ²	ST = 1400m ²
Année d'implantation du site	2014	2012	2014
Source	(a)	(b)	(c)

Tableau 1 : Caractéristiques de trois fermes urbaines en France, aux Etats-Unis et au Japon. (a) : (Daniel 2017) ; (b) : <https://www.brooklyngrangefarm.com/> ; (c) : <https://futurefood2050.com/in-the-pink-speeding-up-crop-growth/>.

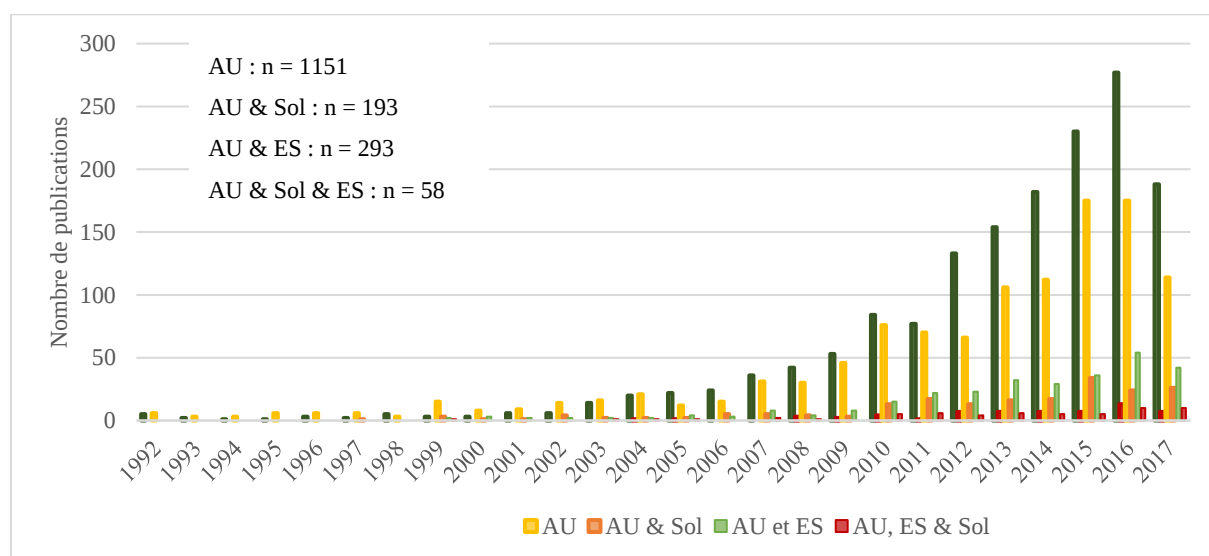


Figure 4 : Nombre de publications sur Web of Science associé à l'agriculture urbaine et à l'agriculture urbain et au sol. Date du graphique : 13/10/2017. AU = Agriculture Urbaine et ES = service écosystémique. Mots clés utilisés : pour agriculture urbaine « Urban agriculture* » ; sol : «growing medi*» OR «soil» or «Technosol» OR «green roof media» OR «substrate*» OR «rooting medi*» et pour services écosystémiques : « ecosystem services ».

Partie 1: Toiture végétalisée et services écosystémiques

Nous avons précédemment définis les Agricultures Urbaines et les enjeux de recherches liés. Nous allons désormais réaliser un état des lieux de la bibliographie sur le sujet des toitures végétalisées et des services écosystémiques. Cette première partie a un double objectif :

- Analyser l'état des connaissances sur différents services écosystémiques rendus par des toitures végétalisées
- Analyser et discuter les différents services rendus : leurs quantifications et facteurs d'influences.

Introduction : Végétaliser le bâti

- Type de toiture végétalisée

Les toitures peuvent représenter en moyenne 20-25% de la surface horizontale d'une ville. Ce fort potentiel a poussé le développement des toitures végétalisées à l'international. Une toiture végétalisée peut-être vue comme une superposition de couches techniques avec en partie supérieure le substrat de culture et la végétation (voir **Figure 5**). Les toitures peuvent être classifiées selon l'épaisseur de substrat. Trois classes sont en général distinguées, même si des débats existent quant à leurs bornes : extensif, semi-extensif/intensif et intensif. Les principales caractéristiques des différentes toitures sont présentées dans le **Tableau 2**.



Figure 5 : Représentation schématique des différentes couches d'une toiture végétalisée. Issu de (Vijayaraghavan 2016).

	Extensive	Semi-Intensive	Intensive
Epaisseur substrat (cm)	4-15	12-30	>30
Poids (kg.m ⁻²)	60-180	150-350	>600
Support admissible	Béton, acier, bois	Béton, acier, bois	Béton
Choix de végétation	Restreint	Large	Très large
Entretien	Faible	Limité	Important
Coût global toiture	Economique	Moyen	Elevé
Irrigation (pratique courante)	-	-/+	++
Fertilisation (pratique courante)	++	+	-/+

Tableau 2 : Principales catégories et caractéristiques des toitures végétalisées. Source : ADIVET légèrement modifié.

Les chiffres sur le développement des toitures végétalisées sont rares. Toutefois, d'après l'association française des toitures végétalisées, l'ADIVET⁸, en moyenne 926 857 m².an⁻¹ de toitures végétalisées extensives et semi-intensives ont été installées en France depuis 2010. Ces toitures sont en très grandes majorités des toitures extensives. Ce choix s'explique par trois raisons principales : (i) d'une part les toitures ont été en France développées grâce à des étancheurs, (ii) ce type de toitures sont moins contraignantes techniquement et économiquement (voir **Tableau 2**) et (iii) d'autre part, l'isolation thermique a été longtemps le principal moteur du développement des toitures. Dans ce contexte, il a été choisi de concevoir des toitures ayant un poids minimal pour maximiser leurs potentiels d'installation, avec une végétation de type plantes grasses adaptées à un substrat sec et drainant, permettant de limiter l'érosion de la membrane du fait du développement racinaire.

Toutefois, même si aucun chiffrage n'est encore disponible, une demande croissante pour des toitures plus diversifiées au niveau végétal est observée (Lata et al. 2017). En parallèle, la demande pour des toitures productives, inexistantes il y a 10 ans, est en forte augmentation ces cinq dernières années (communication personnelle, ADIVET). Enfin, si l'isolation thermique a été historiquement la raison du développement des toitures végétalisées, ces toitures sont aujourd'hui mises en avant surtout pour les services écosystémiques rendus. Leurs développements sont ainsi associés à un certain nombre

⁸ : <http://www.adivet.net/>

d'enjeux de transformation du milieu urbain vis-à-vis par exemple de l'imperméabilisation des sols, la réduction de consommation énergétique, la biodiversité etc.

La demande en toiture productive nous pousse à repenser les substrats classiquement utilisés en toiture et conçus pour des plantes à faible besoin en éléments nutritifs et en eau. Le domaine des toitures végétalisées est une discipline scientifique qui émerge depuis moins d'une dizaine d'années (voir **Figure 6**): 73% des articles mentionnant le terme de toit végétalisé ont été écrit depuis 2012. Si le sol d'une toiture végétalisée est vu comme l'un des éléments clés, notamment du point de vue des services écosystémiques qu'il peut rendre, leurs études restent très rares. Ainsi seulement 4% des articles publiés associent dans leurs titres, abstract ou mot clés, les sujets toitures végétalisées et sol. Ce pourcentage tombe légèrement en dessous des 4% lorsque sont associés les mots « Toitures végétalisées » et « production alimentaire ».

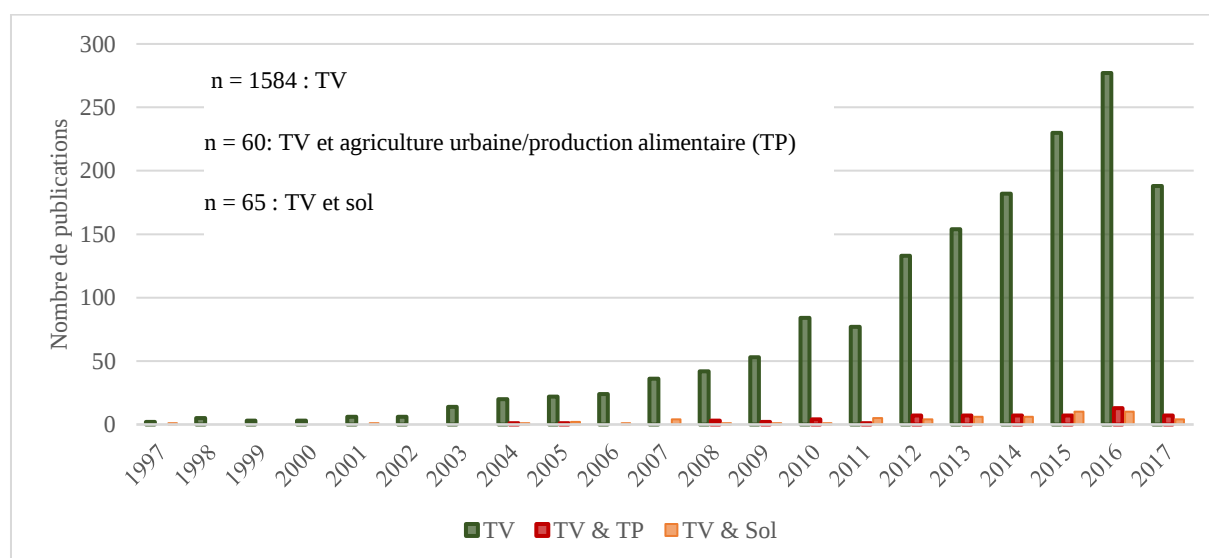


Figure 6 : Nombre de publications sur Web of Science, associées aux toitures végétalisées et à l'association des mots toitures végétalisées et toit productif ainsi que toitures végétalisées et sol. TV= toiture végétalisée. Date de la recherche: 11/10/2017. Mots clés utilisés : pour toiture végétalisée "green roof*" OR "living roof*" OR "ecological roof*" OR "roof garden*" OR "turf roof*" OR "sod roof*" OR "Garden roof*"; pour toiture végétalisée et production alimentaire/agriculture urbaine : "green roof*" OR "living roof*" OR "ecological roof*" OR "roof garden*" OR "turf roof*" OR "sod roof*" OR "Garden roof*" AND "urban* agriculture*" OR "food*" or "vegetable" or "edible"

I. Un champ d'étude pluridisciplinaire - Une toiture, des services rendus

Les services écosystémiques rendus par l'implantation d'une toiture végétalisée sont multiples et touchent à de nombreuses problématiques liées à l'eau, l'alimentation, la biodiversité, le climat etc. De ce fait, ces toitures constituent un champ étude multidisciplinaire, faisant appel pour leur conception à de nombreuses disciplines : l'ingénierie, la biologie et notamment l'écologie, l'architecture, l'urbanisme et la géographie comme ont pu le montrer Blank et co-auteurs (2013) lors d'une revue bibliométrique.

Le **Tableau 3** résume l'ensemble des services pouvant être attendus d'une toiture végétalisée productive, la classification étant celle du Millenium Ecosystem Assessment⁹. Ces services ont un impact à différentes échelles : local comme la réduction de température, qui peut également être vu à l'échelle d'un quartier ou d'une ville en fonction de l'importance du développement des toitures. Bien qu'important, voir essentiel dans certains projets d'agriculture urbaines sur les toits, les services culturels ne seront pas traités dans cette revue bibliographique car ils se situent hors du périmètre de cette thèse.

Type de service	Services attendus d'une toiture végétalisée productive
Service d'approvisionnement	• Production de biomasse alimentaire
Service de régulation	• Réduction du ruissellement et des crues • Atténuation de la pollution de l'air • Atténuation de la température locale • Isolation du bâti • Stockage de carbone et émission évité (transport) • Recyclage de nutriment et valorisation de résidus urbains • Réduction du bruit
Service de support	• Biodiversité
Service culturel	• Tourisme • Pédagogique/Education • Paysager

Tableau 3 : Services écosystémiques pouvant être attendus d'une toiture végétalisée productive

- **Une discipline émergente.**

Si le potentiel de l'agriculture urbaine pour engendrer des services écosystémiques a fait l'objet de récents articles dont des revues (Haase et al. 2014; Lin et al. 2015; Aerts et al. 2016; Russo et al. 2017; Wilhelm and Smith 2017), peu d'études se sont attachées à des mesures quantitatives. Ainsi, dans une revue de la littérature sur l'agriculture urbaine et péri-urbaine, Wilhelm et Smith (2017) n'ont trouvé que 15 articles (soit 4,7% des articles cités) portant sur les services écosystémiques. Parmi ces 15

⁹ <http://www.millenniumassessment.org/fr/>

articles, seulement cinq ont une approche quantitative (dont un seul sur les toits productifs). Une seule étude considère plusieurs services écosystémiques à la fois (Aloisio et al. 2016).

Seules 11 études de cas sont aujourd'hui publiées sur des toitures productives à base de sol (**Tableau 4**). Ces études portent majoritairement sur la fonction de production et la gestion des cultures (fertilisation, 7 études). Trois études traitent de la rétention d'eau par ces toitures et de la qualité des eaux de drainage. Deux études abordent la séquestration de carbone et l'analyse de cycle de vie. Ce très faible corpus bibliographique nous pousse à élargir cet état de l'art à l'ensemble des toitures végétalisées, productives ou non de biomasses alimentaires. Nous distinguerons dès lors les toitures dite productives (i.e. de biomasses alimentaires) et non productives.

Dans la bibliographie sur les toitures végétalisées, les différents services écosystémiques pouvant être attendus (**Tableau 3**) ont été très inégalement traités. Comme le montrent Harada et co-auteurs (2017) la majorité des articles se sont concentrés sur des questions liées à l'hydrologie, à la thermique du toit, aux plantes et d'autres sujets tel que les analyses de cycles de vies ou la planification urbaine. Un seul service écosystémique est étudié dans la plupart des cas (Lata et al. 2017). Comme souligné par Czemieli Berndtsson (2010), beaucoup d'auteurs se focalisent uniquement sur leur discipline ne permettant pas d'avoir une vision globale. Ainsi, la notion de multifonctionnalité des toitures végétalisées n'a été directement mise en avant qu'en 2015 par Lundholm (2015). Dans cette étude, l'auteur met en évidence une relation positive entre les services rendus par une toiture et la diversité végétale qui y est présente. De facto, il introduit la notion de « trade-off » ou compromis entre composantes biotiques et abiotiques constitutives d'un toit vert vis-à-vis des services rendus. Ces compromis, déjà évoqués (Czemieli Berndtsson 2010) n'ont été étudiés que très récemment (Aloisio et al. 2016; Dusza et al. 2017). A l'aide d'une expérimentation sous serre, Dusza et al (2017) ont fait varier deux composantes biotiques d'une toiture verte : les plantes via leurs taxons et le substrat au travers de sa nature et sa profondeur. Leurs résultats montrent l'impact de chacune des composantes mais également de leurs interactions sur les services rendus. De telles études sont rares et manquent pour permettre une vision intégrative des toitures comme écosystème à part entière.

Réf.	Objet de l'article	Type/composition substrat	Fertilisation (F) & irrigation (I)	Epaisseur du sol (cm)	Temps d'étude	Lieu d'expérimentation
(a)	Effet du substrat et du type de plante sur (i) rétention d'eau, (ii) pertes en P et N eaux de drainage et (iii) production	Mix extensif ; Substrat « GaiaSoil » ; Terreau.	I	11	45j	New-York (USA)
(b)	Impact du taux de matière organique sur la production	Billes d'argiles expansées et sable en mélange avec un compost de jardin	F & I	12,5	6 mois	Michigan University (USA)
(c)	Potentiel de production et de rétention en eau de système sur substrat et en hydroponie	Terreau	F & I	10,2	1 mois	Toiture de Virginia Technology (USA)
(d)	Fertilisation d'un toit potager	Substrat de toiture intensive	F & I	11	2 mois	Columbia University (USA)
(e)	Comparaison du potentiel de production de différents systèmes de cultures	Terre végétale et compost	F & I	20	21 mois	Bologne (Italie)
(f)	ACV de différents systèmes de cultures	Terre végétale et compost	F & I	20	21 mois	Bologne (Italie)
(g)	Evaluation du potentiel de production	Billes d'argiles expansées [50%], sable [35%] et compost de feuilles [15%]	F & I	10,5	3 ans	Michigan University (USA)
(h)	Test de différents mulch et fertilisation	Substrat « XeroFlor »	F & I	12,7	2 ans	Michigan University (USA)
(i)	Stockage de carbone par différents types de végétalisation (9 au sol et sur les toits ; dont un productif de biomasse alimentaire)	Substrat de toiture végétalisée « Renewed Earth, Kalamazoo »	F & I	10,5	3 ans	Michigan University (USA)
(j)	Comparaison de la quantité et de la qualité de l'eau entre différents types de toitures végétalisées : sedum, prairie et productif	Substrat de toiture végétalisée « Renewed Earth, Kalamazoo »	F & I	10,5	3 ans	Michigan University (USA)
(k)	Qualité de l'eau en provenance d'une ferme urbaine en toiture	Rooflite	F & I	20-25	8 mois	Brooklyn Grange, New-York (USA)

Tableau 4 : Etude de cas existants dans des revues à comité de lecture sur des systèmes de production en toiture à base de sol. (a) : (Aloisio et al. 2016); (b) : (Eksi et al. 2015); (c) : (Elstein et al. 2008) ; (d) : (Kong et al. 2015) ; (e) : (Orsini et al. 2014) ; (f) : (Sanyé-Mengual et al. 2015) ; (g) : (Whittinghill et al. 2013) et (h) : (Whittinghill et al. 2016b) ; (i) : (Whittinghill et al. 2014) ; (j) : (Whittinghill et al. 2015) et (k) : (Whittinghill et al. 2016a). ACV = Analyse de cycle de vie.

II. Approvisionnement alimentaire

- **Niveaux de production**

Quelques études portent sur la fonction de production alimentaire en toiture (Elstein et al. 2008; Whittinghill et al. 2013; Orsini et al. 2014; Eksi et al. 2015; Kong et al. 2015; Aloisio et al. 2016; Whittinghill et al. 2016b). Dans le Michigan (USA), ces études montrent la faisabilité d'une production sur une toiture extensive (10,5cm d'épaisseur de substrat) fertilisée et irriguée (Whittinghill et al. 2013 ; voir **Tableau 4**). Ils rapportent des niveaux de productions satisfaisants sauf pour les poivrons/piments et ne trouvent que peu de différences de rendement en pleine terre et sur toiture. Ce résultat est en contradiction avec ceux de Eksi et al (2015) montrant une production de concombres et poivrons ou piments plus importante sur les toits qu'en pleine terre. Orsini et al. (2014), quantifient, à Bologne (Italie) une production plus importante sur un substrat fertilisé ($18,9\text{kg.m}^{-2}$; voir **Tableau 4**), qu'en hydroponie, ce qui peut toutefois, être expliqué par une gestion simplifiée de ces derniers. Dans cette étude, les auteurs ont souhaité estimer l'importance potentielle du service de production alimentaire à l'échelle d'une ville. Pour cela, ils ont mesuré la surface de toitures plates à Bologne via des images aériennes, puis ils ont évalué les besoins alimentaires de cette ville et construit un scénario d'implantation idéal des systèmes de cultures (optimisation de l'espace notamment). Ils concluent que 77% des besoins en denrées alimentaires des habitants de Bologne (Italie) pouvaient être couverts par la production sur les toitures plates disponibles. Cette estimation est discutable, en particulier en l'absence de données sur la portance et l'accessibilité des toits qui questionne la faisabilité du scénario avancé. Par ailleurs, l'extrapolation des mesures de rendements réalisées sur un temps très court ne permet pas un recul suffisant sur les données agronomiques.

- **Qualité des aliments**

L'aspect qualitatif des productions est un élément essentiel de l'appréciation des productions en agriculture urbaine : notamment au regard de la valeur nutritionnelle et la qualité sanitaire. La question de la qualité des produits alimentaires vis-à-vis des polluants pouvant être trouvés en milieu urbain et en particulier la présence d'éléments traces métalliques, a été soulevée récemment (Säumel et al. 2012; Warming et al. 2015). Ces études montrent des risques de transfert dans les légumes, liés à la pollution historique des sols en milieu urbain, à certaines pratiques (telles que l'apport de résidus) et aux types de plantes (les légumes ayant des capacités différentes à transférer des éléments). Ces travaux concernent des systèmes de culture en pleine terre (Pennisi et al. 2016) ou des cultures hydroponiques en toiture (Liu et al. 2016), mais aucune étude ne peut aujourd'hui être trouvée sur des potagers en toiture. Un **manque de connaissances** quant à la **qualité des produits issus d'une toiture végétalisée productive sur sol en milieu urbain** peut donc être souligné. Par ailleurs, aucune étude sur la qualité nutritionnelle de légumes en provenance d'un toit potager sur substrat n'existe à l'heure actuelle.

- **Facteur d'influence**

Très peu d'études les abordent. Faisant varier la proportion de compost de déchets verts en mélange avec des billes d'argiles expansées et du sable, Eksi et al. (2015) montrent un ratio optimal du point de vue de la production alimentaire autour de 60 à 80% (en volume ou en masse – non précisé par les auteurs) de compost, mais, les différences observées sont faibles. Aloisio et al. (2016), ont comparé durant 45 j sur un toit de New-York (USA) deux mélanges commerciaux pour toiture extensive à un terreau/une terre de rempotage sur 11 cm d'épaisseur, en cultivant deux plantes comestibles (voir **Tableau 4**). Ils quantifient une production bien plus importante avec le terreau qu'avec les mélanges commerciaux.

Au niveau des toitures végétalisées non productives, l'accroissement de l'épaisseur du sol (entre 4 et 15 cm), a un effet positif sur la biomasse de sedums ou de gazon (Getter and Rowe 2009 ; Nektarios et al. 2011). Toutefois, les épaisseurs testées (au maximum de 15 cm) ainsi que la nature des matériaux utilisés dans ces études interrogent sur la généralité de tels résultats dans le cas d'une toiture productive.

III. Services de régulation

III.1. Rétention des eaux de pluies

Deux aspects peuvent être considérés :

- La végétalisation d'un toit peut se traduire par un décalage et ou un étalement dans le temps des flux d'eau s'écoulant après une précipitation du toit dans le réseau pluvial. Il s'agit d'un service rendu par la toiture végétalisée puisqu'il permet de limiter l'engorgement des réseaux d'eau pluviale en cas de fortes précipitations. Ce décalage temporel dépend de (i) l'humidité du substrat à un instant t, (ii) sa conductivité hydraulique, (iii) sa capacité de rétention en eau, (iv) son couvert végétal, (v) des éléments techniques pouvant jouer sur l'écoulement de l'eau et (vi) la fréquence et l'intensité des événements pluvieux
- Toute l'eau arrivant sur une toiture végétalisée ne s'écoule pas dans le réseau pluvial puisqu'une partie est évaporée ou évapo-transpirée après avoir été retenue par le substrat ou les végétaux. Il s'agit là encore d'un service rendu puisque cela se traduit par des volumes d'eau pluviale à évacuer et à traiter qui sont moindres. On exprime alors la proportion entre la quantité d'eau de pluie entrante sur le système et la quantité d'eau drainée.

Les trois études existantes sur ce service pour des toits potagers (Elstein et al. 2008; Aloisio et al. 2016 ; Whittinghill et al. 2015) portent principalement sur le deuxième aspect. Elstein et al. (2008) montrent qu'un terreau cultivé peut retenir jusqu'à 69,2% de certains événements de pluies, le relevé n'étant pas fait en continu. Aloisio et al. (2016), ne donnent pas de ratio d'eau retenue vis-à-vis du volume entrant,

mais mettent en avant un effet du type d'espèce planté croisé avec celui du substrat. Les végétaux, via leur feuillage, ou via leurs besoins en eau et évapotranspiration augmentent de manière plus ou moins importante la quantité d'eau retenue. L'étude montre ainsi que des plantes de type herbacée réduisent 3 fois plus la quantité d'eau retenue qu'une plante grasse en comparaison à un témoin sans plante. Whittinghill et al. (2015) étudient quant à eux l'impact de trois types de végétalisation extensive (sédum, prairie et productif ; voir **Tableau 4**). La prairie présente la proportion d'eau de pluie retenue la plus élevée (entre 98,2 et 92,4%). Cette proportion étant décroissante pour l'ensemble des traitements avec l'intensité des épisodes de pluie. Ainsi, le toit productif retient respectivement 87,7% des événements < 2mm, 85,6% des événements entre 2 et 10 mm et seulement 58,9% des événements > 10 mm aboutissant à une performance équivalente à la toiture sedum. Les différences observées peuvent, selon les auteurs être expliquées par le niveau de biomasse produite (la biomasse sur la prairie étant supérieure). Néanmoins, les auteurs ne rapportent pas l'impact de l'irrigation sur la capacité de rétention. En effet, en maintenant un niveau d'humidité plus élevé dans les substrats, l'irrigation peut réduire sa capacité de rétention en eau notamment durant l'été (Schroll et al. 2011), l'irrigation pouvant par ailleurs avoir un effet de compaction sur les substrats (Caron et al. 2015). A cet égard, il semble essentiel, dans le cas de toiture productive, de distinguer la consommation en eau (irrigation + eau de pluie) de la proportion des précipitations qui est retenue. Enfin, aucune des études ne regarde l'impact des composantes du substrat sur la fonction de rétention.

Au niveau des toitures végétalisées non productives, de nombreuses études ont été effectuées sur cette question (Getter et al. 2007; Beattie and Jarrett 2009; Czemieli Berndtsson 2010; Beck et al. 2011; Graceson et al. 2013; Beecham and Razzaghmanesh 2015; Dusza et al. 2017). Dans une revue sur le sujet comparant des toits extensifs et intensifs, Mentens et al. (2006) montrent des plages de valeurs entre 65 et 85% d'eau retenue pour des toitures intensives contre 27 à 87% dans le cas de toitures extensives. Ces larges gammes de valeurs, peuvent s'expliquer (i) par les différences de climat entre études situées à travers le globe, (ii) les définitions différentes qui peuvent être prises au niveau des épaisseurs de substrat pour une toiture extensive ou intensive et (iii) le nombre d'événements mesurés qui diffèrent entre études. Dans une autre revue sur le sujet, Czemieli Berndtsson (2010) détaille les facteurs d'influences de cette capacité de rétention et distingue, d'une part les caractéristiques du toit : technique (i.e. nombre et type de couche, position dans le canyon urbain, pente) et biotique (i.e. nature et profondeur de substrat et type et intensité de la végétation). Et d'autre part les conditions climatiques (i.e. durée des périodes sèches, température moyenne, vent, intensité et durée des événements de pluies etc.). A l'échelle d'une ville comme Bruxelles, Mentens et al. (2006) montrent qu'en développant à large échelle des toitures avec 10 cm de substrat, une réduction totale de 2,7% des écoulements peut-être obtenue.

- **Facteurs d'influence**

- **Le substrat :**

Le substrat est reconnu par de nombreux auteurs comme étant le premier facteur affectant la proportion des précipitations qui est retenue via sa profondeur et sa nature (Dunnnett et al. 2008 ; Castiglia Feitosa and Wilkinson 2016). Plusieurs études, dont la méta-analyse de Mentens et al. (2006), montrent une relation positive entre l'épaisseur de substrat et sa capacité de rétention en eau avec une généralité des résultats néanmoins limitée à des climats tempérés. Ces résultats ont par ailleurs été confirmés au sein de l'étude réalisée par Castiglia Feitosa et Wilkinson (2016), qui ont montré une relation linéaire entre l'épaisseur d'un substrat et sa capacité de rétention.

L'humidité d'un substrat va directement impacter sa capacité à retenir des volumes plus ou moins importants d'eau et à subvenir aux besoins des plantes. Cette caractéristique est directement liée à sa réserve utile qui peut être définie comme la différence des quantités d'eaux retenues entre son point de flétrissement et sa capacité au champ. Bengtsson (2005) montre ainsi, pour une toiture extensive en sedum de 3 cm, que la différence entre capacité au champ (45% v/v) et point de flétrissement (15% v/v) du substrat explique bien la réserve utile de 9 mm observée. La généralité de ces résultats portant sur des toitures avec une épaisseur faible de substrat, sans irrigation peut toutefois être questionnée au niveau des toitures productives.

La nature du substrat va également affecter sa capacité de rétention et sa conductivité hydraulique. Ainsi, la taille des particules de sol et son espace poreux, vont être des facteurs clés. L'utilisation de substrats plus organiques dans le cas de toiture productive soulève par ailleurs des questions en lien avec des phénomènes d'hystérèse et/ou d'hydrophobicité (Caron et al. 2015).

Jusqu'à récemment, l'impact du vieillissement d'une toiture sur ses performances hydrologiques n'avait quasiment pas été étudié. Bouzoudja et al. (2016) ont analysé des toitures extensives à base de pouzzolane de 7,5 à 9,5cm durant 4 ans. Ils y observent un lessivage des particules les plus fines le long du profil conduisant à une évolution temporelle de la porosité, celle-ci se faisant en parallèle d'une évolution des caractéristiques chimiques des substrats (diminution de la teneur en carbone organique et augmentation de la teneur en azote). Cette évolution impacte directement la capacité de rétention du substrat. Dans une autre étude, sur le vieillissement d'une toiture extensive à base de briques et billes d'argiles expansées (épaisseur non précisée), De-Ville et al. (2017) observent eux aussi un affinage du substrat au cours du temps ainsi qu'un effet des saisons. Celles-ci font ainsi varier la capacité de rétention du substrat de 72% contre 7% au niveau du vieillissement sur 5 ans. Les auteurs ayant pris un échantillon à 5 ans d'une toiture en place, en comparaison à un échantillon à T0 ne provenant pas de cette toiture, l'extrapolation de ces résultats est discutable.

- **La végétation :**

Bien qu'ayant un rôle moins primordial que le substrat, les végétaux vont influencer sa capacité de rétention en particulier durant la saison d'été où le manque d'eau pourra être présent (Czemiel Berndtsson 2010). Le type de plante a aussi un impact sur la capacité de rétention du substrat (Dusza et al. 2017).

Enfin, d'autres facteurs tels que la pente, l'intensité des pluies et les saisons ont été étudiés. L'augmentation de la pente d'un toit semble ainsi diminuer sa capacité de rétention (Getter et al. 2007), tandis qu'une corrélation inverse entre l'intensité de la pluie et la rétention en eau est observée dans de nombreuses études (Czemiel Berndtsson 2010).

III.2. Qualité des eaux de drainage

Comme le rappellent Wang et al. (2017) l'un des enjeux majeurs du développement des villes concerne la pollution des eaux de surfaces et des nappes phréatiques. Sur ce point, les toitures végétalisées peuvent aider à baisser les niveaux de pollution au sein des villes, en dégradant, filtrant ou retenant les polluants au travers des plantes ou du substrat, mais elles peuvent aussi se comporter comme des sources de polluants. Les facteurs affectant la qualité de l'eau percolant au travers de toitures végétalisées sont nombreux : notamment les apports locaux de polluants (atmosphère, matériaux utilisés), les espèces de plantes cultivées, les compositions et profondeurs du substrat, la qualité de l'eau d'irrigation, les fertilisants, l'âge de la toiture etc. Wang et al. (2017) listent 9 sources ou puits potentiels de polluants, résumé sur la **Figure 7**.

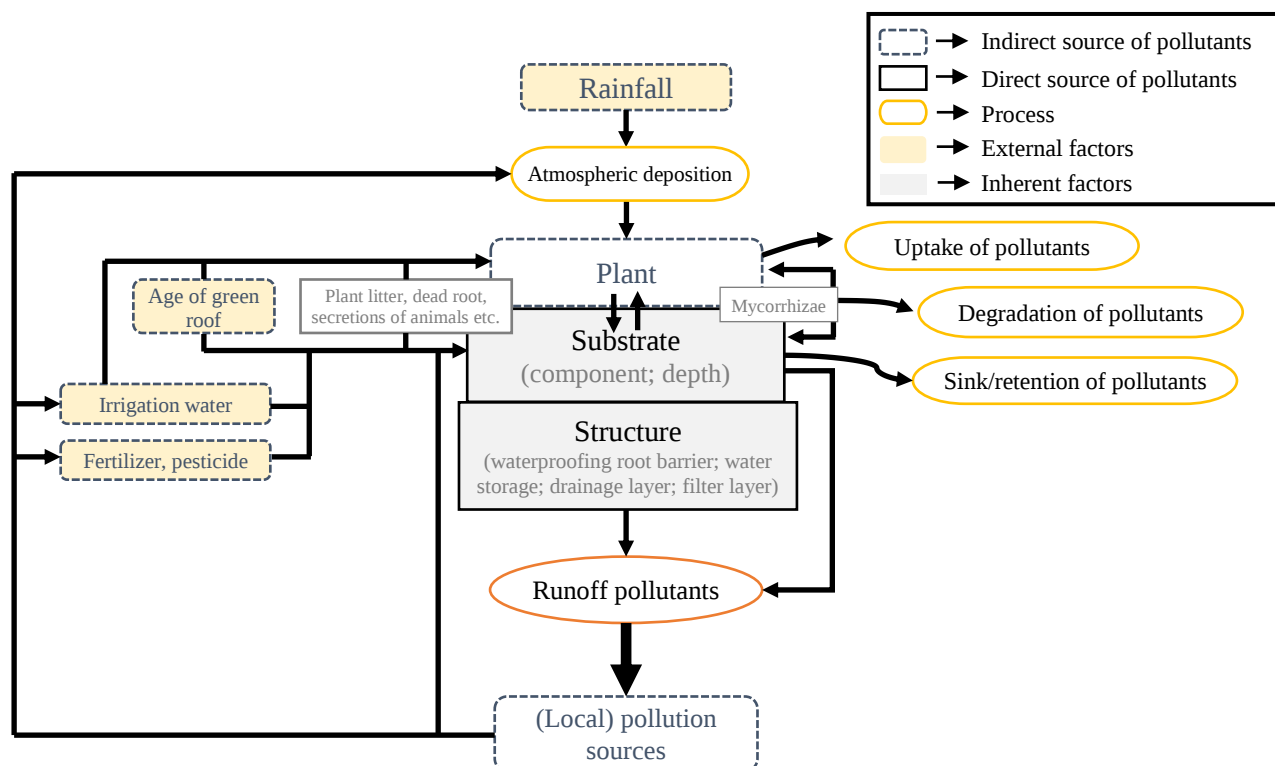


Figure 7 : Schéma représentant les sources et puits potentiels de polluants liés à une toiture végétalisée. Schéma issu de Wang et al. (2017) légèrement modifié.

Eléments concernés et facteurs d'influence

• Eléments traces métalliques

Chang et al. (2004) testant, expérimentalement, différents revêtements de toitures nus en extérieur, observent un rejet de l'ensemble des matériaux concernant le cuivre (Cu) et le zinc (Zn). Berndtsson et al. (2009) comparant des toitures extensives et intensives au Japon et en Suède, montrent un relargage relativement faible de certains éléments notamment Zn et Cu. A l'inverse, certaines toitures intensives peuvent agir en tant que puits d'éléments tel que le Fe, le Pb et le Zn. Les auteurs montrent que la qualité de l'eau de drainage issue des toitures expérimentales est soit équivalente soit meilleure que celle du milieu urbain. Certaines plantes telles que les plantes grasses peuvent absorber et fixer les métaux lourds dans leurs tissus. Par ailleurs, l'alternance de cycles de dessiccation et de ré-humectation, particulièrement présents sur des toitures extensives peut entraîner des phénomènes de chélation des matériaux organiques aboutissant à la stabilisation des métaux lourds au sein des substrats (Han et al. 2001 dans (Gregoire and Clausen 2011)).

Comme le résume Schwager (2014), les toitures ne peuvent être directement classées en tant que source ou puits d'éléments de type trace métallique, leurs comportements dépendant des matériaux utilisés et du temps. Il faut également garder à l'esprit que le comportement comme source ou puits de la toiture

résulte d'une addition de comportement source ou puit des différents matériaux le constituant. Les toitures végétalisées étant un système vivant amené à évoluer, le temps impactera également leurs comportements. Ainsi, étudiant la capacité d'absorption de différents matériaux constitutifs d'une toiture, Schwager et al. (2015) observent que si les matières organiques ont une forte capacité d'absorption du Cu, leur dégradation au cours du temps peut entraîner un relargage de ce dernier, tandis que les billes d'argiles ont un comportement net d'absorption de Zn et Cu. Selon les conditions climatiques et hydriques, une même toiture pourra ainsi passer d'un comportement de sources à celui de puits. Aucune étude n'a à ce jour porté, à notre connaissance, sur l'émission d'éléments traces métalliques par une toiture végétalisée productive.

- **Perte en éléments nutritifs (N, P, K etc.)**

Si les éléments nutritifs sont indispensables au bon développement des plantes, ils engendrent un risque d'eutrophisation des milieux s'ils sont présents en trop grande quantité dans les eaux de drainage des toitures. C'est pourquoi cette question a été rapidement soulevée au niveau des toitures végétalisées non productives (Rowe et al. 2006). Néanmoins, le risque de lixiviation est limité en toitures extensives basées sur des plantes grasses car celles-ci ont des besoins relativement faibles en nutriments et peuvent se développer sur des substrats très poreux avec de faibles teneurs en matière organique. A l'inverse, les besoins en nutriments des plantes potagères sont élevés et soulèvent directement la question de la fertilité et du risque de lixiviation des toitures productives. Deux solutions peuvent être prises pour subvenir aux besoins des plantes : augmenter le taux de matière organique (cf Eksi et al. 2015) ou apporter des fertilisants.

Dans la seule étude actuelle réalisée sur une ferme urbaine sur substrat et en toiture, al. (2016a), se sont intéressés à la qualité des eaux de drainage provenant de la Brooklyn Grange à New-York (voir **Tableau 4**). La ferme utilise un substrat de toiture végétalisée (Rooflite®) sur 20-25cm, amendé annuellement en compost et fertilisant organique. Les résultats de cette étude montrent que, durant un an, la toiture impacte la qualité de l'eau, aboutissant, en comparaison à de l'eau de pluie à un pH, une conductivité, une turbidité, une couleur apparente et des taux de macro et micronutriments plus élevés. Ces valeurs sont pour certaines supérieures à celles trouvées au niveau de toitures végétalisées non productives concernant notamment la conductivité électrique et la teneur en macronutriments. Néanmoins, les teneurs en micronutriments, restent dans les valeurs faibles habituellement observées dans la littérature pour des toitures végétalisées et pour des cultures en plein champ. Même si cette étude ne porte que sur une toiture, elle soulève de nombreuses questions quant aux compromis que les besoins en éléments nutritifs impliquent au niveau de la composition du substrat, de sa potentielle fertilisation et des pratiques culturales à adopter. Les deux autres études telle que celle d'Aloisio et al. (2016), présentent des résultats

plus contrastés où les systèmes installés sont sources d'azotes mais pas de phosphore. Les auteurs mettent également en avant l'impact de l'espèce cultivée sur les pertes, résultats qui diffèrent de ceux de Whittinghill et al. (2015), qui en comparant trois types de végétations (prairie, sédum et comestibles) vis-à-vis de la qualité de l'eau, ne trouvent pas d'effet de la végétation sur l'azote mais uniquement sur le phosphore, décroissant alors au cours du temps.

Au niveau des toitures végétalisées non productives, la littérature reste contrastée voire contradictoire vis à vis de leurs comportements en tant que source ou puit. Les différentes revues existantes sur le sujet (Czemieli Berndtsson 2010; Berardi et al. 2014 ; Li and Babcock 2014), mettent bien en évidence les deux facteurs principaux liés à ces pertes : la nature du substrat d'une part et la fertilisation d'autre part. L'utilisation de fertilisants est un des premiers facteurs explicatifs de pertes de nutriments au niveau des toitures, même aux doses recommandées de 5 gN.m⁻² (Emilsson et al. 2007; Whittinghill et al. 2016a). Par ailleurs, la diversité des comportements des toitures en tant que source ou puits, souligne le caractère multifactoriel de ces flux.

- **Phénomène de first flush**

Après l'implantation d'une toiture végétalisée ou de fortes périodes de sécheresse, des auteurs ont observé un phénomène dit de « first flush » (Czemieli Berndtsson 2010). Ce phénomène résulte, soit de la lixiviation d'éléments présents en solution du sol et qui ne peuvent être absorbés par des plantes tout juste installées ; soit de dépôts atmosphériques en période de sécheresse qui sont ensuite lessivés. Néanmoins, cet effet ne concerne pas tous les éléments. Ainsi, aucun effet first flush n'est rapporté pour le potassium et le carbone organique dissous (Berndtsson et al. 2008; Bliss et al. 2009).

- **Perte en carbone organique dissous (DOC)**

Les pertes en carbone et donc en matière organique sont l'un des principaux risques associés aux toitures végétalisées. Le carbone organique dissous est susceptible d'impacter la demande biologique en oxygène de l'eau et donc de conduire à une asphyxie des milieux aqueux. Les sources de matière organique dissoute sont de deux ordres (i) celle présente au sein du substrat et (ii) les végétaux en décomposition. Aucune étude sur ces flux ne concerne des toits productifs, même si, comme évoqué précédemment, les taux de matière organique plus élevés qui peuvent y être observés représentent une source directe de DOC. Dans une étude comparant des toitures extensives (3 cm - sedum) et intensives (40 cm – végétation arbustive), Berndtsson et al. (2009) observent des concentrations 20 fois supérieures aux précipitations pour les premières. Sur un site d'infiltration composé de 3 toitures dont une végétalisée Mason et al. (1999), notent que 90% du carbone dissous est sous forme organique et

qu'aucune dégradation n'est observée durant l'écoulement au sein du milieu d'infiltration, avec néanmoins une diminution des concentrations rejetées au cours du temps. al. (2011) quantifie sur des systèmes végétalisées avec un substrat commercial Rooflite® de 7,1 cm d'épaisseur, des pertes allant jusqu'à 42.1 mg C.l⁻¹ de DOC. Pour comparaison, la valeur de DOC fixée par l'Union européenne dans les cours d'eaux est de 7 mg C.l⁻¹ (Dusza 2017).

- **Facteurs d'influence**

- **Substrat**

La composition chimique du substrat impacte directement la perte d'éléments et notamment de nutriments. La teneur en matière organique est déterminante. Ainsi Beecham et Razzaghmanesh (2015) comparent trois types de substrat (à base de scories, de briques ou et un mélange de scories et de compost), et observent que plus la teneur en matière organique est élevée, plus les pertes en nutriments sont fortes. C'est pourquoi certains auteurs ont proposé des teneurs optimales de matière organique à cet égard (Nagase and Dunnett 2011).

Des matériaux chargés positivement retiendront plus facilement des anions tels que les nitrates et les nitrites. Par ailleurs le mélange de différents substrats comme l'argile expansée avec de l'écorce de pin peut aboutir à un relargage d'éléments traces métalliques comme montré par Alsup et al. (2009). L'incorporation de biochar pour réduire les pertes par lixiviation de carbone et de macronutriment a ainsi été proposé (Beck et al. 2011).

L'épaisseur d'un substrat peut affecter positivement ou négativement la qualité des eaux de drainage au travers de deux phénomènes (i) l'augmentation de la quantité d'éléments proportionnelle à celle de la quantité de substrat et lié à sa teneur, et (ii) l'augmentation du temps d'infiltration de l'eau au sein du substrat favorisant l'interaction entre la solution du sol et ce dernier, avec une augmentation possible des phénomènes d'absorption et désorption. Dans l'étude citée ci-dessus, Beecham et Razzaghmanesh (2015) montrent que l'épaisseur des substrats, entre 10 et 30 cm, n'impacte pas la teneur en nitrate et potassium dans les eaux. A l'inverse Seidl et al (2013), étudiant des substrats de toiture extensive de 6 à 16 cm d'épaisseur, notent une augmentation des concentrations de carbone dissous, phosphore et azote minéral avec l'épaisseur, en accord avec les résultats de Dusza (2017) pour le carbone organique dissous.

- **La végétation**

Beecham et Razzaghmanesh (2015) montrent que la présence de plantes, en comparaison à un témoin sans plante, participe à réduire la perte de micro et macro nutriments dans les eaux de drainage. Cette diminution est due aux prélèvements effectués par les plantes pour leurs développements. Par ailleurs,

un effet du type de plante est observé. Ainsi, Dusza et al. (2017) dans une étude croisant les facteurs profondeurs de sol et type de plantes, montrent que les Fabaceae sont associés à des rejets plus faibles en DOC mais plus importants en nitrate que les Crassulaceae.

IV. Séquestration du C et climat global

L'impact des toitures végétalisées au niveau du cycle du carbone peut-être direct ou indirect. L'effet direct correspond à la séquestration de carbone dans les végétaux de la toiture et au sein du substrat. Les toitures végétalisées, peuvent améliorer l'isolation du bâtiment et permettre une réduction de son chauffage, et/ou au travers de l'utilisation de déchets organiques pour la conception du substrat éviter leurs enfouissements ou incinérations, peuvent également avoir un effet indirect sur le cycle du carbone.

Les études sur le sujet restent relativement rares. Getter et al. (2009) se sont intéressés à la séquestration du carbone sur une douzaine de toitures extensives, comprenant entre 2,5 et 12,7 cm de substrat âgé de 1 à 6 ans. Ils ont mesuré la teneur en carbone au sein du substrat et de la biomasse épigée et racinaire. Lors d'une première campagne de prélèvement, les auteurs montrent une séquestration moyenne de carbone au sein de la biomasse épigée de $0,162 \text{ kgC.m}^{-2}$. Dans une deuxième campagne de prélèvement, ils montrent après deux ans, une séquestration de $0,168 \text{ kgC.m}^{-2}$ dans la biomasse épigée, $0,107 \text{ kgC.m}^{-2}$ dans les racines et $0,1 \text{ kgC.m}^{-2}$ dans le substrat. Néanmoins, les auteurs n'étudient pas l'évolution de la masse volumique apparente au sein de la toiture. Ils commentent par contre l'impact potentiel des facteurs âge, substrat, fertilisant et irrigation sur cette fonction. En étudiant sur un an l'utilisation de boues déshydratées en mélange avec du sol et sur une épaisseur variant de 20 à 30 cm, Luo et al. (2015), concluent à un potentiel de séquestration de C dix fois plus important que celui reporté par al. (2009). Par ailleurs, ils montrent que le potentiel de séquestration est impacté par le type de végétation. Toutefois, le faible temps d'étude, associé au manque de certaines mesures interroge sur la fiabilité de ces résultats. Enfin, Whittinghill et al (2014) ont comparé sur 3 ans 9 types d'occupation du sol (dont la production de légumes) au même système en toiture. Au sein du substrat (voir **Tableau 4**), l'auteur aboutit à des valeurs de séquestration (plante [épigée et racinaire] + sol) en trois ans de : 4.67, 5.64, 1.21 et 65.25 kgC.m^{-2} respectivement pour les couverts végétaux en sédum, prairie, productif et ornemental (plantes herbacées). Les auteurs expliquent les différences observées par le type de végétation et leur bon développement. Par ailleurs, ils émettent l'hypothèse que les fortes différences avec les résultats Getter et al. (2009), peuvent être dues à l'absence d'irrigation dans cette étude qui n'aurait pas permis un bon développement de la biomasse. Quoiqu'il en soit, la stabilité des différents compartiments de C concernés (plante partie épigée et racinaire et sol) n'ayant pas été étudiée, il apparaît difficile de conclure sur le service rendu.

V. Valorisation de résidus urbains

La nécessité de recycler nos déchets, allant jusqu'à une approche zéro déchet au niveau des villes, est de plus en plus mise en avant (Lehmann 2011). La possibilité d'utiliser uniquement des produits recyclés en tant que substrat de toitures végétalisées n'a pas été étudiée. Au niveau des toitures végétalisées non productives, l'utilisation de produits résiduaux organiques tels que des composts dans des substrats de toitures végétalisées commerciales ou en amendement est relativement courante. Toutefois, les études scientifiques sur le sujet sont rares (Molineux et al. 2009; Bates et al. 2015) et aucune étude n'existe sur la conception de substrat de toiture végétalisée 100% recyclé.

VI. Autres services

Comme détaillé dans le **Tableau 3**, d'autres services tel que celui d'isolation du bâti, de diminution de l'effet d'îlot de chaleur urbain, de support de biodiversité, d'isolation phonique ou encore de qualité de l'air ont fait l'objet d'études (Berardi et al. 2014). Parmi ces services, l'impact des toitures végétalisées sur la biodiversité n'a fait l'objet que d'une attention relativement faible (Blank et al. 2013). Néanmoins, ces services n'étant pas l'objet de cette thèse, ils ne seront pas plus détaillés ici.

Conclusion partielle - Chapitre I - partie 1

Les toitures végétalisées productives sont bien une opportunité pour engendrer des services écosystémiques au-delà de ceux effectués par une toiture végétalisée non productive. Les contraintes associées à ce type de toiture (besoin en eau, air et nutriments) invitent à **repenser leurs conceptions** au regard de l'opportunité de recycler des résidus urbains au sein des substrats et de la demande croissante dont celles-ci font l'objet. Néanmoins, nous avons vu que si des études existent sur les services fournis par des toitures végétalisées non productives, le peu d'études existantes sur les toitures végétalisées productives ne permet pas d'appréhender les services qui peuvent en être attendus. Les travaux sur des substrats à base de déchets sont rares voire inexistantes. Enfin, le manque d'étude simultanée de plusieurs services ne permet pas de discuter des synergies ou compromis entre eux.

Le sol des toitures végétalisées est un élément clé de ces dernières car à l'origine directe ou indirecte de la plupart des services fournis comme nous l'avons vu précédemment. Nous allons désormais nous intéresser à ce compartiment essentiel dans la partie 2.

Partie 2 : Technosol : conception, propriétés et évolution

Cette partie 2 du chapitre I, vise à faire un état des lieux des connaissances actuelles sur les Technosols. Après avoir défini cet objet d'étude, nous verrons ensemble comment les matériaux parentaux qui le constituent peuvent être sélectionnés et quelles sont leurs natures. Enfin, nous détaillerons leur évolution et les multiples facteurs pouvant l'influencer.

Au vu de l'objectif des travaux de thèse, l'étude bibliographique ci-dessous se concentrera principalement sur les Technosols construits, c'est à dire provenant d'un processus volontaire de construction de sol tel que des sols de pieds d'arbres, de toitures végétalisées ou de sols restaurés. Toutefois, les études bibliographiques sur ce sujet restant rares, d'autres corpus seront utilisés sur des points spécifiques. Par ailleurs, la thèse présentée ici portant sur une problématique de construction de sol à partir de produits résiduaux, nous regardons principalement les études utilisant ce type de matériaux.

I. Technosol : Définition et domaine d'application

I.1. Définition et terminologie

Le sol, terme couramment utilisé, a été défini de manière variée en science du sol. Cette variété reflète les évolutions et avancées dans la compréhension de ce milieu complexe ainsi que les volontés scientifiques d'intégration de nouvelles problématiques tel que l'impact de l'homme. Pour ces travaux, nous définirons un sol « naturel » comme l'interface entre la lithosphère, l'atmosphère, l'hydrosphère et la biosphère. Celui-ci est le résultat de l'interaction entre des composantes biotiques et abiotiques aboutissant à son organisation en horizon suite à la pédogénèse du matériel de surface terrestre (IUSS Working Group WRB 2014). Il vise à assurer des fonctions primordiales de support de végétation, de biodiversité et de filtre (Séré 2007). De manière à définir, comparer et regrouper les différents types de sols existants, de nombreux référentiels de classification des sols, poursuivant différents objectifs, existent tel que l'USDA Soil Taxonomy ou le référentiel WRB (Word Reference Base for soil resources). Parmi ces classifications, le WRB est la seule à être reconnue comme la classification officielle de standard taxonomique des types de sols par l'Union Internationale de la science du Sol (IUSS).

Initialement peu étudiés, les sols anthropisés, tel que les sols urbains, ont été reconnu comme une catégorie de sol à part entière à partir de 2005 au sein du WRB. Cette reconnaissance fait suite à la création d'un groupe de travail dédié au sein de l'IUSS sur les SUTMA : « Soils in Urban, Industrial, Traffic, Mining and military Areas ». Les SUTMA se différencient de sol « naturel » par (i) leurs compositions hétérogènes, (ii) la présence de matériaux grossiers et anthropiques (brique, béton,

asphalte) et (iii) la présence potentielle de contaminants (Morel et al. 2014). Ils sont le fruit de processus anthropiques tel que : le mélange de matériaux, la compaction, l'excavation ou l'apport (volontaire ou non) de matériaux anthropiques. Dans une étude portant sur les SUITMA et leurs fonctionnalités au regard des services écosystémiques rendus, Morel et al. (2014) proposent de distinguer 4 catégories de sols anthropisés (voir **Figure 8**) :

- Sols pseudos naturels
- Sols construits
- Sols de dépôts
- Sols imperméabilisés

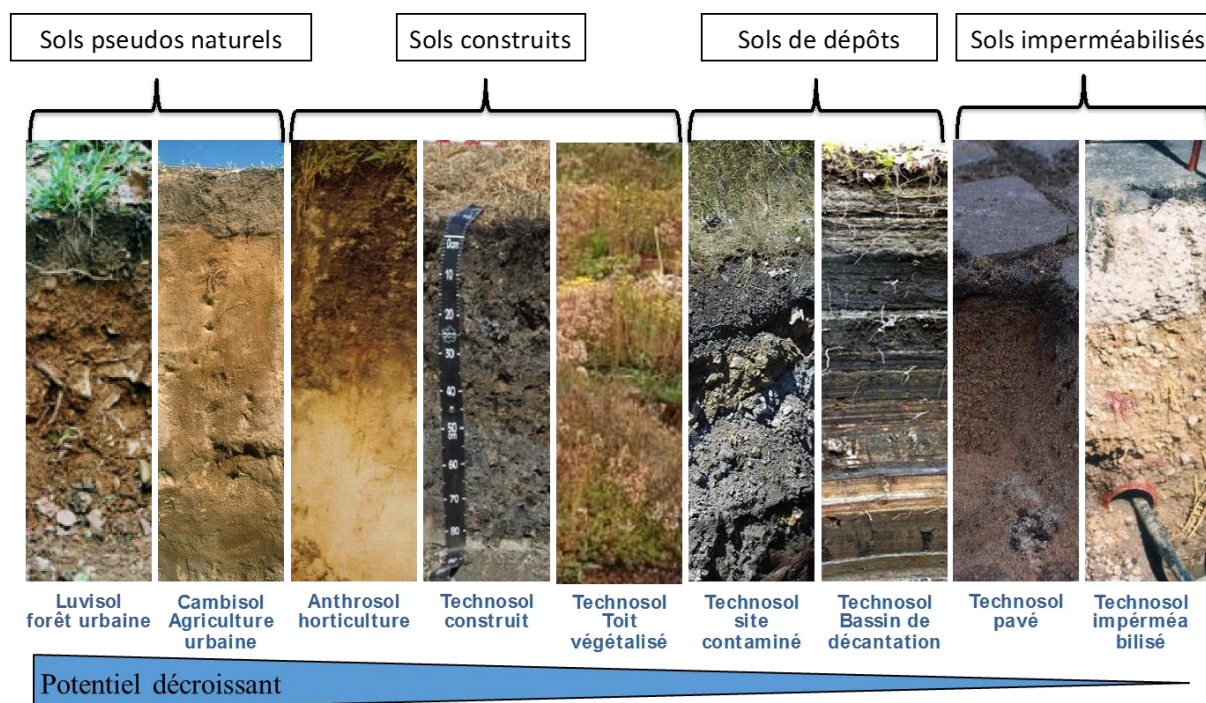


Figure 8 : Proposition de groupe de SUITMA au regard de leurs potentiels en tant que support de végétation. Figure issue de l'article : (Morel et al. 2014). Crédit photo : Florentin, Huot, Morel, Nehls, Schwartz et Séré.

En parallèle de la reconnaissance des sols anthropisés, en 2006, la notion de Technosol a été introduite au sein du WRB. Contrairement au SUITMA, cette catégorie fait référence à des caractéristiques pédologiques tandis que les SUITMA se raccrochent au fonctionnement d'un écosystème donné (Morel et al. 2014). Le terme Technosol regroupe l'ensemble des sols dont les propriétés sont dominées et issues pour tout ou partie de l'activité humaine et dont les matériaux sont d'origine technogéniques (i.e : processus ou substances créées par la technologie humaine) (Rossiter 2007; IUSS Working Group WRB 2014). Un Technosol est défini au travers soit (i) de la présence de plus de 20% (en volume ou poids

moyen) d'artefacts (i.e. : matériel construit ou substantiellement modifié par l'homme lors d'activité industrielle ou artisanale) dans les 100 premiers centimètres du sol, soit (2) par la présence d'une membrane presque continue de type géo-membrane ; soit (3) par la présence de matériaux techniques durs. Différents qualificatifs sont utilisés (Ekranic, Linic, Urbic etc.). Dans le cas de Technosol présents sur une toiture végétalisée, ceux-ci peuvent être qualifiés d'Isolatic Technosol (IUSS Working Group WRB 2014) comme cela a pu être utilisé par d'autres auteurs (Bouzouidja et al. 2016) bien que le qualificatif de Technosol soit pour le moment peu employé dans le domaine des toitures végétalisées.

I.2. Conception de Technosol productif en toiture : à l'intersection de trois domaines de recherches

La construction de sol dans le cadre d'une toiture productive fait appel aux connaissances et concepts de différents domaines de recherches. Trois domaines de recherches sont concernés : (i) l'horticulture, (ii) les toitures végétalisées et (iii) le génie pédologique. Ces domaines sont liés car ils abordent des problématiques communes autour du choix des matériaux parentaux, du mélange et de l'évolution de ces derniers dans un objectif de végétalisation, mais, ils se différencient nettement par le type de système végétalisé concerné, l'échelle d'étude, ses contraintes, les méthodes d'implantations et les concepts mobilisés.

Dans le cas d'une toiture productive, des connaissances en provenance de trois domaines peuvent être mobilisées. En **horticulture**, de nombreux articles traitent depuis les années 1950 de production végétale sur support de culture (Baker, 1957 dans Harada et al. 2017; Abad et al. 2001; Clark and Cavigelli 2005; Carlile et al. 2015). Toutefois, ces connaissances ne peuvent pas être retranscrites et réutilisées directement pour plusieurs raisons. Par exemple, les besoins nutritifs en horticulture sont dans la majorité des cas pensés à l'échelle d'un cycle de culture et via une fertilisation externe. Par ailleurs, alors que de multiples services écosystémiques sont attendus d'une toiture végétalisée, il est principalement attendu d'un substrat de culture de maximiser la production de biomasse. Dans le domaine des **toitures végétalisées**, l'immense majorité des articles porte sur des toitures extensives et une faible partie concerne les sols comme nous l'avons montré en introduction (voir **Figure 6**). Dans ces articles, les substrats sont conçus comme légers et drainants pour limiter la charge en toiture ainsi que peu riche en nutriments car adaptés à des plantes grasses de types sédum. Au niveau de la construction de sol, la prise en compte de contraintes telles que le passage de véhicule (pour des pieds d'arbres), les besoins en éléments nutritifs ou la possibilité de mettre en place une épaisseur de sol importante (>50/100cm) ne rendent pas directement utilisables les résultats de certaines recherches.

L'étude des toitures végétalisées mobilise en général des concepts en provenance du domaine de l'horticulture et plus rarement de science du sol. Dans leurs articles, Caron et al. (2015), plaident ainsi,

dans le cas de support de culture organique, pour l'adaptation de concepts de science du sol. Ils mettent en avant les différences existantes entre un sol (majoritairement minéral) et un support de culture (majoritairement organique) au niveau (i) de leurs propriétés : teneur en carbone organique, composition biochimique, masse volumique apparente, impédance, porosité etc. et (ii) de l'impact de leurs manipulations (mélanges de matériaux parentaux par exemple) et/ou de leurs conditionnements (en pot ou non). Le type de contenant utilisé dans le cas d'un support de culture va par exemple, influencer sa teneur en eau et sa conductivité hydraulique. Le potentiel de rétention en eau sur le haut d'un substrat dans un contenant est ainsi corrélé négativement à son épaisseur. Ces différences et adaptations de concept montrent que l'étude d'un Technosol productif nécessite l'adaptation de concept de différents domaines (principalement de science du sol et horticulture) au vu notamment de la multifonctionnalité attendue de ces toitures.

Cette diversité des domaines de recherche traitant de la question des sols construits se retranscrit par les différents termes utilisés pour désigner le substrat de culture (i.e. le matériel qui permet à la plante de grandir, qui est le lieu de développement de son système racinaire et lui fournit l'ensemble des nutriments, de l'air et de l'eau dont elle a besoin). En horticulture, les termes "substrate" (Ingelmo et al. 1998), "rooting medium" (Raviv et al. 1998) ou "growing medium" (Olle et al. 2012) sont utilisés. Au niveau des toitures végétalisées, les qualificatifs "substrate" (Nagase and Dunnett 2011), "growing medium" (Graceson et al. 2014b) ou "green roof media" (Olszewski and Young 2011) ou plus rarement "Technosol" (Ondoño et al. 2014) sont employés. Tandis qu'en science du sol ou dans le domaine du génie pédologique, les termes "Technosol" ou "constructed Technosol" (Séré et al. 2010) sont couramment utilisés. Dans le cadre de cette thèse, le terme Technosol sera le plus couramment employé mais l'ensemble des autres termes seront considérés comme synonyme de celui-ci.

II. Technosol : conception, mélange et matériaux utilisés

Les Technosols construits sont aujourd'hui vus comme un des leviers pour recycler différents résidus urbains et leurs nutriments. L'assemblage de matériaux recyclés pour reconstituer un sol fonctionnel (au regard de son usage) est ainsi exploré dans des domaines variés allant de la plantation d'arbres en ville (Grosbellet et al. 2011), à la restauration de sol ou site pollué (Camps Arbestain et al. 2008; Séré et al. 2010) jusqu'à l'utilisation de sédiments dragués (Macía et al. 2014). La conception d'un Technosol construit repose sur trois éléments clés (i) : le choix des matériaux, (ii) l'agencement des matériaux et (iii) l'évolution dans le temps de ces derniers au regard des fonctions attendues. Des problèmes environnementaux liés à la création de sol peuvent être évités si le type de matériaux et leurs mélanges sont adaptés au contexte et à l'objectif du sol recréé. Ces objectifs sont intimement liés à la notion de fertilité.

II.1. Choix des matériaux parentaux

II.1.a. Notion de fertilité d'un Technosol

Les contraintes et/ou critères de choix concernant les matériaux parentaux d'un Technosol construit, sont intimement liés à la notion de qualité d'un sol. Celles-ci peuvent être définies de différentes façons et faire l'objet de débat. Nous nous baserons ici sur la définition apportée par Karlen et al. (1997) reliant la qualité d'un sol aux fonctions attendues et défini selon trois axes (i) la productivité biologique, (ii) la qualité environnementale et (iii) la santé des plantes et des animaux. Dans le cas d'un Technosol construit, la fertilité attendue dépendra de l'usage de ce dernier et repose sur trois composantes : physique, chimique et biologique.

- Fertilité physique

La fertilité physique d'un Technosol est directement liée à sa structure. Celle-ci correspond à l'arrangement des particules solides (organiques ou minérales) en son sein, qui vont créer une porosité accessible à l'air ou à l'eau. Cette structure influence directement certaines propriétés biologiques, physiques et chimiques (Díaz-Zorita et al. 2002) résumés au sein du

Tableau 5. La porosité totale, créée par l'arrangement des particules du Technosol, peut-être subdivisée en classes fonctionnelles de pores. Ces classes font l'objet de discussion quant à leurs bornes précises, mais l'on distingue généralement (Jangorzo 2013) :

- la microporosité correspond aux pores compris entre 0,3 et 50µm de diamètre, qui servent au stockage de l'eau retenue par capillarité
- la macroporosité, allant de 50 à 500µm de diamètre, servant à la transmission d'eau et d'air. L'eau ne pouvant y être retenue par capillarité
- les pores < 0,3µm, qui retiennent de l'eau, trop fortement pour les racines des plantes
- les pores > 500µm, qui contiennent essentiellement de l'air.

La distribution de la porosité va de ce fait directement impacter la circulation de l'eau, de l'air ainsi que leur stockage et agir sur le développement des plantes et des organismes du sol.

- Fertilité chimique

La fertilité chimique dépend principalement de la solution du sol, résultante de la circulation de l'eau en son sein et du transfert d'éléments de la fraction solide. De fait, l'approvisionnement des plantes en éléments nutritifs est directement influencé par la solution du sol. L'altération chimique (processus de pédogénèse abordé ci-dessous) va réguler cette fertilité. L'altération est définie et influencée par 3 paramètres majeurs (Robert, 1970 et Pedro, 1964 dans Rokia (2014)): (i) la nature des matériaux parentaux (proportion nature des composés organiques et minéraux), (ii) la nature des réactifs d'attaque (leur composition, état de dissociations ioniques, pH et concentration) et (iii) la valeur des paramètres

réglant l'équilibre thermodynamique du sol tels que la température, l'humidité, la pression ou la vitesse de circulation des solutions. Ce processus d'altération va de fait réguler directement le transfert d'éléments nutritifs et une partie de leurs cycles géochimiques au sein du sol.

Processus		
Biologiques	Chimiques	Physiques
Protection de la faune et des populations microbiennes	Sorption et désorption de composé organique et inorganique	Erosion liée à l'eau et au vent
Stockage et cycle des nutriments (dénitrification, stockage de C, etc.)	Transport de solutés	Infiltration, mouvement d'eau et aération
Développement des plantes		Circulation des gaz

Tableau 5 : Processus biologiques, physiques et chimiques influencés par la structure du sol. Tableau issu de Díaz-Zorita et al. (2002).

- Fertilité biologique

La fertilité biologique d'un sol, plus rarement étudiée, dérive de l'effet de composantes biotiques du sol. Les principaux indicateurs portent sur la biomasse microbienne et l'activité enzymatique au sein du sol (Francaviglia et al. 2017). Les enzymes du sol vont par exemple influencer la dégradation de molécules utilisées ensuite par les micro-organismes du sol, et impacteront directement ou indirectement le développement des plantes. Des indicateurs ont été proposés tel que l'indicateur microbien des sols (Kang et al. 2005) et des études commencent à voir le jour au niveau des toitures végétalisées (Ondoño et al. 2014).

- Matière organique et fertilité

La matière organique, qui correspond à l'ensemble des composés carbonés issus d'organismes vivants et déposés ou incorporés à la surface terrestre, est intimement liée à la fertilité des sols. En effet, deux grandes voies d'évolution la caractérisent (Grosbellet 2008) : la minéralisation et la stabilisation. La minéralisation est liée à son rôle de réservoir de nutriments directs pour les microorganismes du sol et indirects pour les plantes du fait de sa biodégradation. La matière organique va de ce fait jouer un rôle clé dans le transfert de solutés en solution du sol, mais également sur ses capacités de rétention en eau (Speak et al. 2013) et air, ainsi que sur la stabilité physique du Technosol.

II.1.b. Critères de choix des matériaux parentaux

Le Technosol construit et le choix de ces matériaux parentaux résultent d'un équilibre à un instant T et $T+x$ entre les propriétés du ou des matériaux, les objectifs et contraintes de la végétalisation mise en place comme nous l'avons détaillé ci-dessus et d'autres facteurs de pédogénèse détaillés ci-dessous. Vijayaraghavan (2016) distingue ainsi 8 propriétés clés dans le choix d'un substrat approprié pour une toiture végétalisée extensive : faible densité apparente, forte capacité de rétention en eau, teneur minimum en matière organique, importante porosité, forte conductivité hydraulique, faible lixiviation couplée à une forte capacité d'absorption, importante stabilité et un bon ancrage pour la végétation. Certaines propriétés telles que la porosité et l'ancrage de la végétation étant directement liées. Dans le cas d'un Technosol construit à partir de résidus de combustion, Camps Arbestain et al. (2008) soulignent l'importance que celui-ci remplisse les principales fonctions définies pour un sol. Faisant un état de l'art sur les connaissances et l'impact des pratiques de l'utilisation des produits organiques en reconstitution de sol, Bacholle et al. (2006), distinguent 4 grands points de vigilance : l'érosion hydrique, la lixiviation (notamment de l'azote et d'ETM), des émissions atmosphériques potentielles ainsi qu'un risque de transfert de contaminants vers les végétaux.

La **Figure 9** résume les propriétés clés à considérer pour la conception d'un Technosol productif (en vert), ainsi que les contraintes régissant l'ensemble des possibles (en jaune) au niveau du choix des matériaux parentaux et des risques environnementaux à considérer (en rouge).

II.2. Mélange des matériaux parentaux

Devant le choix pléthorique de matériaux résiduaux pouvant servir à constituer un Technosol, il est important de préciser que dans le cas des matériaux résiduaux aucun ne constitue à lui seul un matériau assimilable à un sol naturel ou un substrat horticole tel que de la tourbe (Rokia et al. 2014). Dès lors, la question de l'association, avec ou sans mélange, des matériaux se pose. Bien que la pratique de mélanger les matériaux au sein d'un substrat soit courante, très peu d'études traitent de la question de l'agencement et de la proportion de ces matériaux au niveau des toitures végétalisées. Des études, telles que celles de Nagase et Dunnett (2011) ou Eksi et al. (2015), s'intéressent à l'impact de l'incorporation de ratio de matière organique dans un substrat de toiture végétalisée, sans traiter toutefois des règles régissant ce mélange. Néanmoins, cette question a été pour partie traitée au sein du projet SITERRE et des travaux de Sarah Rokia (Rokia 2014) qui ont permis de définir certaines règles régissant les mélanges. Celles-ci ayant été également étudiées dans le domaine horticole comme évoqué par Caron et al. (2015), mentionnant le caractère proportionnel ou interactif de certaines propriétés des matériaux mélangés. La question des mélanges n'étant pas au cœur des travaux de cette thèse, nous ne détaillerons pas plus ce sujet qui n'en reste pas moins crucial dans la conception d'un Technosol. Il est intéressant de noter que

si des études ont porté sur le mélange direct de matériaux, aucune ne portent à notre connaissance sur l'agencement (horizontal) des matériaux du Technosol. En effet, l'organisation verticale de certains matériaux est une pratique courante observée notamment en construction de sol sans être pour autant étayée par des connaissances scientifiques autre que celles portant sur l'organisation de sol naturel.

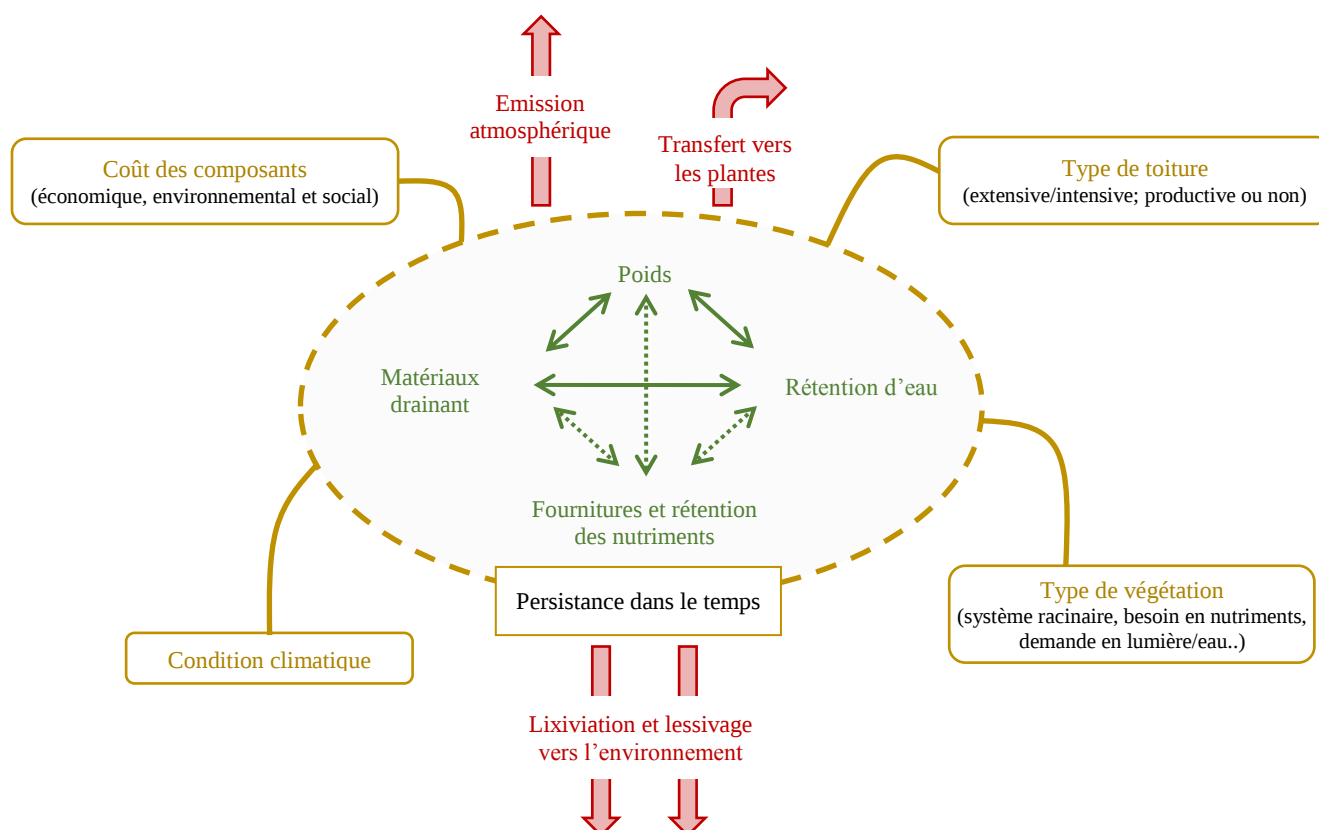


Figure 9 : Représentation schématique de l'ensemble des propriétés, contraintes et risques environnementaux à considérer dans le cadre de la conception d'un Technosol de toiture végétalisée. Les propriétés clés sont symbolisées en vert. Des flèches continues les reliant montrent un lien direct entre deux propriétés tandis qu'une flèche en pointillée souligne un lien indirect. L'ensemble des possibles au niveau des matériaux parentaux utilisables est symbolisé par le cercle pointillé jaune et les contraintes le définissant sont également en jaune. Les principaux risques environnementaux liés à l'implantation d'un Technosol constructif sont marqués en rouge.

II.3. Matériaux parentaux utilisés

Les règles professionnelles existantes au niveau national¹⁰ et international (tel que les FLL Guidelines ; (FLL 2008)) pour substrats de toitures végétalisées, ont établi des recommandations concernant leurs compositions. Ces règles visent à minimiser le poids des substrats mis en place et s'assurer qu'ils n'engendrent pas d'impact négatif sur l'environnement (risques de lessivage ou lixiviation évoqués dans la partie 1 de ce chapitre). Par exemple, les valeurs conseillées par les FLL Guidelines (FLL 2008) en

¹⁰ <http://www.adivet.net/realisation/regles-professionnelles.html>

teneur en matière organique sont de moins de 65g.l⁻¹ de matière organique pour une toiture de type extensive contre moins de 90g.l⁻¹ dans le cas d'une toiture intensive. Ces règles aboutissent à des substrats très majoritairement minéraux (autour de 90% en volume) qui sont peu adaptés à des toitures productives comme nous l'avons évoqué ci-dessus. On peut d'ailleurs noter qu'aucune mention du mot « food » ou « vegetables » ne peut être trouvée au sein des FLL Guidelines.

Si la question du support de cultures dans le cadre de toiture potagère a bien été soulevée (voir **Tableau 4**), pour le moment, le défi du choix des matériaux et de leur disposition reste posé dans un objectif de recyclage de résidus urbains. Sur les 8 études reportées au sein du **Tableau 4**, seulement deux s'intéressent à la question du type de substrat à utiliser (Aloisio et al. 2016 ; Eksi et al. 2015). Aloisio et al. (2016) comparent ainsi l'impact de 4 plantes associées par 2 et croisées à celui de trois substrats (un terreau comparé à deux mélanges pour toiture extensive). Leur étude montre l'effet du type de plante et du type de substrat sur (i) la biomasse produite, (ii) la quantité d'eau retenue et (iii) la qualité de cette dernière. Les substrats extensifs sont systématiquement les moins productifs en comparaison au terreau, l'effet étant modulé par le type de plante. S'intéressant à l'intérêt d'incorporer des doses croissantes de matière organique dans un substrat de culture via un apport de compost de déchets verts, al. (2015), concluent qu'un apport de 60 à 80% [les auteurs ne précisent pas si l'apport est réalisé en volume ou en masse] de compost de déchets verts est optimal vis-à-vis de la production de biomasse. L'apport étant réalisé en mélange avec des billes d'argiles expansées et du sable.

Ampim et al. (2010), dans une revue sur les substrats de culture de toiture végétalisée, distinguent parmi les substrats « classiques », deux grands types : les commerciaux et non commerciaux. Les premiers sont en général des substrats prêts à l'usage mais dont la composition n'est que partiellement dévoilée. Dans le second cas, il s'agit de mélange spécifique ou réalisé dans le cadre de recherche. Comme ils le relatent, plusieurs types de substrats peuvent être utilisés¹¹ :

- matériaux minéraux ou organiques naturels : sable, argile, gravier, tourbe, fibre de coco et pierre volcanique (i.e. pouzzolane) ou ponce ;
- minéraux artificiels : schiste, argile ou ardoise expansée, perlite, vermiculite ou de la laine de roche ;
- matériaux recyclés : compost, sciure, écorce, brique ou tuile concassée, béton et terre végétale ;
- des plastiques synthétiques : polystyrène.

Parmi les articles sur les substrats de toitures végétalisées, de nombreuses études peuvent être trouvées quant aux matériaux potentiellement utilisables dans le cadre d'une toiture végétalisée (Friedrich 2008;

¹¹ Certains matériaux pourraient en réalité être dans une ou plusieurs catégories. La terre végétale est à la fois un matériau naturel non renouvelable et un matériau recyclé.

Young et al. 2014; Berretta et al. 2014; Stovin et al. 2015; Ondono et al. 2016; Krawczyk et al. 2017), peu d'études portent sur l'utilisation de déchets du bâtiment en tant que matériaux recyclés pour la partie minérale des substrats (Molineux et al. 2009; Bates et al. 2015 ; Carson et al. 2012).

En horticulture, depuis plus d'une trentaine d'années, de nombreuses études ont été menées sur l'utilisation de matériaux alternatifs à la tourbe, classiquement et majoritairement employé en tant que substrat de culture pour ses propriétés physico-chimiques (Michel 2010). Cet effort de recherche, répond à un certain nombre d'enjeux notamment :

- *Environnementaux*, du fait de l'impact écologique de l'exploitation de la tourbe (Cleary et al. 2005) et du rôle clef de ces écosystèmes (Kern et al. 2017) ;
- *Economique*, du fait des contraintes environnementales évoquées et de la rareté potentielle d'un matériau de bonne qualité.

Face à cela, des inventaires de déchets potentiellement réutilisables ont été menés (Abad et al. 2001) et de nombreux matériaux ont été testés ou étudiés, le plus souvent en mélange avec d'autres plus classiques telle que la tourbe (Benito et al. 2006 ; Carlile 2005; Farrell and Jones 2010). Ces inventaires et études répondent à des usages divers : production de fleur ornementale, production de transplant, production de jeunes arbres etc. Toutefois, elles ont en commun la recherche de caractéristiques physiques, chimiques et biologiques des substrats de cultures, pour assurer une production significative. Parmi les principaux substituts de la tourbe, les composts sont les plus utilisés comme le montrent Kern et al. (2017), (**Figure 10**). Réalisant une analyse SWOT (Strengths, Weaknesses, Opportunities, Threats) de l'utilisation du compost, Raviv (2013), met en avant les éléments résumés dans le **Tableau 6**.

Parmi les composts étudiés, le compost de déchets verts a été couramment utilisé. Celui-ci provient de bois d'égale, de feuilles, de tontes de gazon ou autres produits des espaces verts. Il s'agit généralement de compost avec un pH relativement élevé (aux alentours de 8) et des teneurs en azote total, phosphore et potassium pouvant être relativement faibles en fonction de la composition des déchets parentaux (richesse en tonte de gazon et feuille notamment) (Expertise MAFOR, 2015¹²; Benito et al. 2006).

En science du sol et plus particulièrement en génie pédologique, discipline émergente, un certain nombre de matériaux technogéniques ont été testés dans l'objectif de recréer un sol fertile. Par exemple, le projet de recherche SITERRE (Coulon and Damas 2016) a eu pour objectif de répertorier, classer et tester des produits résiduaux urbains dans l'objectif de recréer un sol fertile pour des pieds d'arbres et des parcs. Pour cela, 11 matériaux dont des composts, des boues, des sous-produits papetiers, des déchets de balayage, de la terre excavée, de la brique, du béton, des déchets de bâtiments et du ballast ont été

¹² <http://institut.inra.fr/Missions/Eclairer-les-decisions/Expertises/Toutes-les-actualites/Expertise-Mafor-effluents-boues-et-dechets-organiques>

testés. Ces travaux aboutissent à démontrer les potentiels intéressants et contrastés des différents matériaux disponibles illustrés par une classification de ces derniers.

Force	Faiblesse
- Faible prix - Contribution à la nutrition des plantes (diminution voire non utilisation de fertilisant) - Réduction de maladies venant du sol par les plantes	- Hétérogénéité - Excès de salinité ou pH inadapté - Faible propriétés physiques - Manque de maturité potentielle pouvant avoir des effets phytotoxiques
Opportunité	Menace
Recyclage de déchets	- Présences de pathogènes, notamment liés au compost avec des déchets d'animaux. - Maladies pouvant être transmises à des plantes liées à l'utilisation de déchets de plante et/ou un mauvais compostage

Tableau 6 : Principaux résultats de l'analyse SWOT sur l'utilisation des composts en tant que support de culture, réalisé par (Raviv 2013).

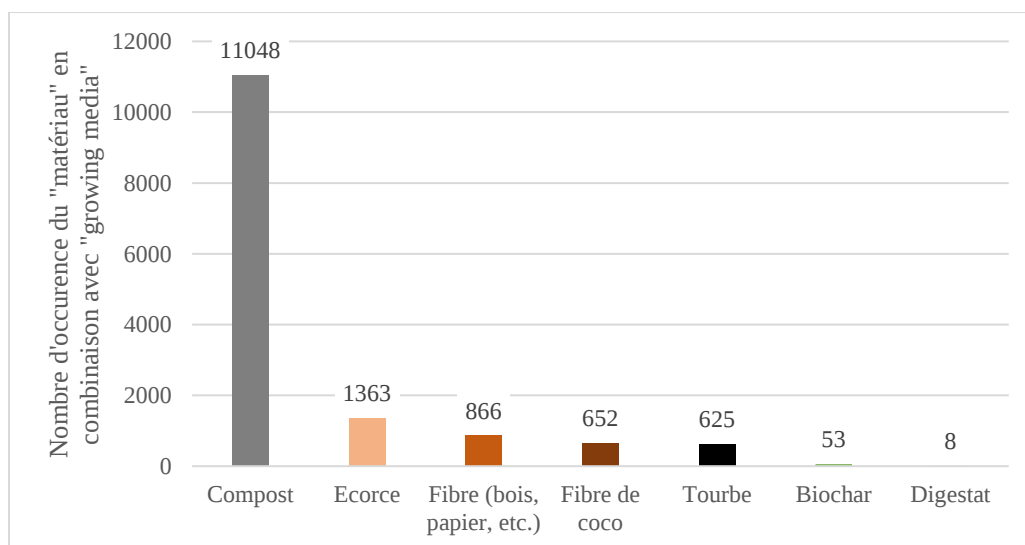


Figure 10 : Aperçu des principaux composants des substrats de cultures en fonction du nombre d'occurrence du matériau dans des publications sur Web of Science en Avril 2016 (Kern et al. 2017).

III. Fonctionnement et pédogénèse d'un Technosol

Le sol est un compartiment dynamique, en perpétuelle évolution, cela implique que les études pour le caractériser et évaluer ses fonctions doivent être dynamiques pour intégrer son évolution dans le temps. Les études à ce sujet dans les différents domaines sont rares comme le soulignent Ampim et al. (2010).

III.1. Définition

Naturellement, la formation d'un sol, ou pédogénèse, résulte de l'altération d'une roche mère par différents phénomènes et processus. Le matériau parental de celui-ci (par exemple, la roche mère) va, du fait d'un déséquilibre entre son état et les conditions de son milieu (température, pression, pluviométrie etc.), évoluer pour donner naissance au sol. Trois grands groupes de phénomènes sont impliqués dans les processus de pédogénèse (Calvet, 2003 dans Gobat et al.) :

- des transformations chimiques, biochimiques et physico-chimiques (altération minérale, biodégradation, humification, etc.) ;
- des transports et accumulation de substances dissoutes et/ou particulaires (lixiviation, lessivage, etc.) ;
- des fragmentations et brassages mécaniques (bioturbation, cryoturbation, etc.).

L'ensemble de ces processus, qui peuvent être progressifs, simultanés ou successifs (Huot 2013), découlent de la combinaison de cinq facteurs écologiques : le climat, le matériel parental, les êtres vivants et leurs matières organiques, le relief et le temps (Gobat et al. 2011). Ces facteurs agissent à différentes échelles (globe, régional ou local). Leurs combinaisons aboutissent à un ensemble de processus pédogénétiques engendrant la construction d'un profil de sol, la différenciation d'horizon et l'évolution de sa structure. La pédogénèse peut de ce fait être vue comme une succession d'état d'équilibre résultant de différentes pressions environnementales. Il est important de souligner que les différents processus pouvant subvenir au sein d'un sol se déroulent à des échelles de temps différentes (seconde, jours, mois, années voir siècle).

III.2. Processus impliqués

III.2.a. Particularité de la pédogénèse d'un Technosol

Les Technosols n'ont en général pas d'équivalents naturels en termes de compositions. Les sols « naturels » sont le résultat en moyenne de plusieurs centaines d'années à plusieurs milliers d'années d'évolution, contre plusieurs dizaines d'années au maximum pour les Technosols. Dans un sol « naturel », 12 processus évolutifs majeurs régissent la pédogénèse des sols : l'andosolisation, la

brunification, la carbonatation, la fersiallisation, la ferrugination, la ferrallitisation, l'hydromorphie, le lessivage, la mélanisation, la podzolisation, la salinisation et la vertisolisation (Duchaufour, 1991 dans (Huot 2013)).

Depuis une dizaine d'années, différentes études se sont intéressées à la pédogénèse de Technosol dans des contextes variés : substrats de toitures végétalisées (Bouzouidja et al. 2016; De-Ville et al. 2017), sols de pieds d'arbres (Grosbellet et al. 2011), sols de friches industrielles (Néel et al. 2003; Bini and Gaballo 2006; Huot et al. 2011) ou réhabilitation de sols pollués (Séré et al. 2010 ; Jangorzo et al. 2013). Lors d'un article discutant de la spécificité de la pédogénèse de Technosols, Huot et al. (2015b), soulignent que les processus observables sont de natures comparables à ceux d'un sol « naturel », mais différents par leurs intensités et/ou leurs coexistences. En effet, tout comme pour les sols « naturels », les Technosols sont soumis aux facteurs environnementaux. Néanmoins la pression anthropique qu'ils subissent par la production et/ou l'apport à différents intervalles de temps de matériaux parentaux technogéniques ou d'opérations anthropiques diverses (compaction, excavation, etc.), influencent directement leurs pédogénèses ainsi que les facteurs environnementaux (modification de la topographie, inoculation d'espèce etc.). Cette pression, exercée par l'homme sur la pédogénèse, est représentée sur la **Figure 11**.

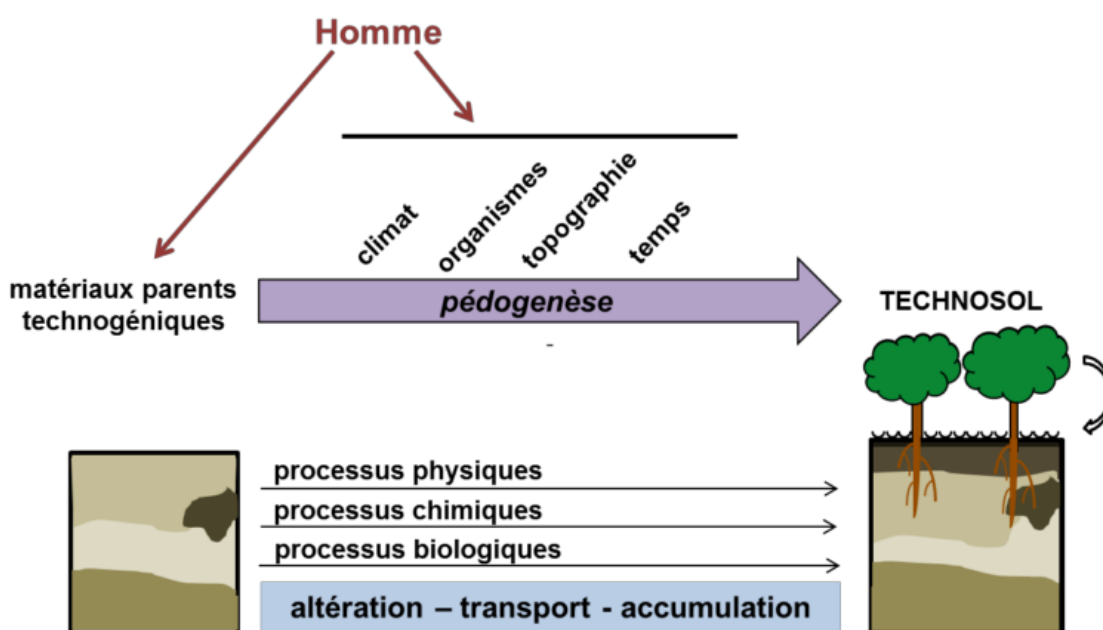


Figure 11 : Figure issue de la thèse d'Hermine Huot (Huot 2013) représentant l'influence de l'homme sur la formation d'un Technosol.

III.2.b. *Processus observé*

Les particularités des Technosols (e.g. hétérogénéité, intensité des processus, jeunesse) compliquent leur analyse et nécessitent de coupler différentes méthodes d'études. Ceci explique pour partie l'importante diversité dans les recherches menées, tant au niveau des matériaux utilisés que des outils et méthodes mobilisées. Dans le cas de sol construit, bien souvent, les auteurs ont recours à une démarche expérimentale visant à reproduire avec plus ou moins de fidélité les conditions in-situ via l'utilisation de dispositifs tel que des lysimètres (Tifafi et al. 2017). Des études, cherchent ainsi à favoriser les interactions et la cinétique des processus physico-chimiques observées en broyant les matériaux utilisés ou en soumettant le Technosol à des conditions contrôlées (de température, d'humidité etc.). Une partie de ces études et de leurs caractéristiques sont reportées dans le **Tableau 7**. La nécessité d'appréhender les processus pédogénétiques à différentes échelles spatiales et temporelles engendre l'utilisation de méthodes variées allant de l'étude du profil de sol, de sa minéralogie, de sa structure, aux flux d'éléments pouvant se dérouler en son sein à l'isotopie.

Des phénomènes de lixiviation sont ainsi reportés lors des premiers stades d'altérations. Lors d'une étude sur des dépôts industriels de matériaux alcalins, à différents pas de temps, Grünewald et al. (2007), observent une baisse du pH durant les premières années associée à un phénomène de carbonatation. Ce processus engendrant la formation de minéraux rarement observés naturellement tel que la terlingite ou la thaumasite. Ces phénomènes d'altérations sont en général liés à des changements d'humidité entraînant une modification des conditions d'oxydo-réduction. Par ailleurs, des processus : d'accumulation de la matière organique ont été reporté notamment dans les horizons supérieurs (Bini and Gaballo 2006), d'agrégation (Monserie et al. 2009), de lixiviation et/ou d'évolution du profil avec la formation de nouveaux horizons (Martín et al. 2007; Huot et al. 2015; Séré et al. 2010). La jeunesse des Technosols est en général associée à une importante réactivité chimique (Lehmann and Stahr 2007 in Vidal-Beaudet et al. 2016) liée à leurs surfaces spécifiques d'échanges et certains processus cités ci-dessus telle que l'altération. La **Figure 12** récapitule l'ensemble des spécificités potentielles de la pédogénèse d'un Technosol.

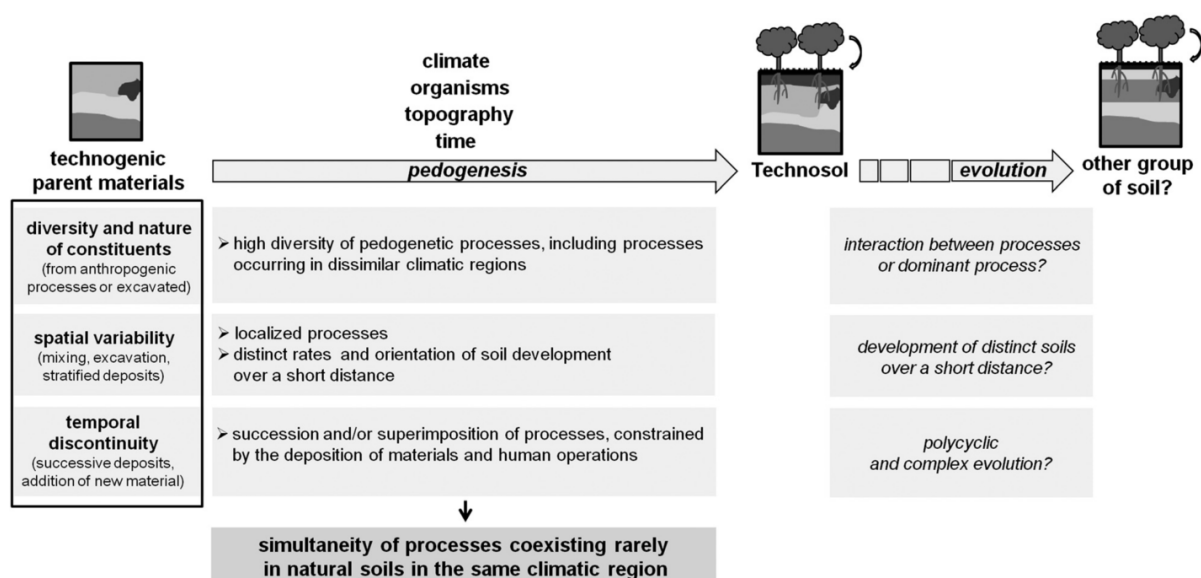


Figure 12 : Figure issue de l'article d'Huot et al. (2015) représentant les spécificités potentielles de la pédogénèse d'un Technosol.

• Sol construit

Concernant les sols construits (voir **Tableau 7**), des phénomènes équivalents, tels que l'agrégation (Deeb et al. 2016b ; Vidal-Beaudet et al. 2016), la compaction (Jangorzo et al. 2013) ou la biodégradation couplée à une évolution granulométrique et donc de l'espace poral (Grosbellet et al. 2011), sont rapportées.

• Toitures végétalisées

Très peu d'études s'intéressent spécifiquement à l'évolution des sols des toitures végétalisées et la majorité, voire la totalité d'entre elles concernent des toitures extensives. Les toitures extensives présentent des différences importantes par rapport aux types de sol rencontrés « classiquement » en génie pédologique lié (i) à la très faible épaisseur de sol utilisée (< 10 cm), (ii) à la nature des substrats (très majoritairement minéraux et constitués d'agrégats minéraux exogènes (e.g. pouzzolane ou perlite)), (iii) aux types de plantes utilisés (en général à des plantes grasses de type sedum) et (iv) aux conditions environnementales qui peuvent y être observées entraînant par exemple une alternance de phases de dessiccations-humectations fortes, avec des températures élevées en lien avec la faible épaisseur de substrat. Néanmoins, ces différences n'empêchent pas l'observation de processus similaires à ceux reportés dans des Technosols. De-Ville et al. (2017), lors d'une étude sur cinq substrats de toitures végétalisées extensives âgées de cinq ans, montrent ainsi un affinage de la taille des particules du substrat engendrant une augmentation de la capacité de rétention en eau. Schrader et Böning (2006) étudiant

une dizaine de toitures de deux catégories d'âges (< 8 ans pour les toits jeunes et > 12 ans pour les toits « vieux ») observent une différenciation significative entre les deux catégories avec une acidification du sol en parallèle d'un enrichissement en matière organique et azote lié à l'âge. Ces résultats sont contradictoires avec ceux trouvés par Bouzouidja et al. (2016), qui observent une diminution des teneurs en carbone organique au niveau des substrats de toitures extensives âgés de 4 ans. Néanmoins, la plupart des études montrent un impact du temps sur l'évolution des substrats de toitures végétalisées, en lien avec les facteurs environnementaux et la nature du substrat utilisé suggérant ainsi l'établissement d'un processus de pédogénèse sur ce type de sol.

III.2.c. Temporalité des processus

Différentes phases de pédogénèse ont été observées. Ainsi, Séré et al. (2010), étudiant un Technosol construit à base de boues de papeterie, de sol traité thermiquement et de compost de déchets verts durant 3 ans (voir **Tableau 7**), observent deux phases : (i) une première phase de changement rapide au niveau physique et chimique des matériaux parentaux avec des phénomènes de compaction, d'altération et de lessivage. Ces premiers processus n'ont pas d'équivalent direct dans des sols « naturels », et (ii) une deuxième phase, où les processus sont équivalents à ceux observés dans des sols naturels : décarbonatation et agrégation entraînant des évolutions de la structure et des propriétés hydriques du Technosol. Confirmant ce type de résultats, Grosbellet et al. (2011) dans une étude portant sur un Technosol formé de deux couches (voir **Tableau 7**) observent que la majorité des changements notamment structuraux, se déroulent durant la première année en lien avec la biodégradation de la matière organique. Ces études montrent bien les différentes phases pouvant exister lors de la pédogénèse d'un Technosol conduisant à un état d'équilibre entre le Technosol et son environnement. Cet équilibre se rapproche de la notion de climax (Buol et al., 1989 dans (Séré 2007)) avec une stabilisation du profil dans le temps. Néanmoins, le faible temps d'étude des Technosols empêche la certitude d'atteindre un état d'équilibre. De ce point de vue, une stabilité relative a pu être rapportée concernant des toitures végétalisées (Schrader and Böning 2006). Aucune des études citées ci-dessus ne s'intéresse directement à la conception d'un Technosol dans un objectif de production alimentaire.

Parent materials	Climat/localisation	Duration	Scale	Studied or observed process	Studied pedogenesis factor of influence	Presence of plants	Irrigation	Soil pre-treatment	References
Excavated acidic earth material, sludge and green waste compost, green waste compost and bricks.	Daylight: 16h at 21 °C; night: 8 h at 18 °C; relative air humidity = 70%	55 days	In-lab - 2 litres pot	Aggregation and nutrient availability (phosphorus)	Nature and arrangement of the parental material Presence of plants	Yes : rye- grass and rape	Yes - constant humidity	Air dried, crushed and sieved at 2 mm	(Vidal-Beaudet et al. 2016)
Sandy loam soil and sphagnum peat or organic compost (of sewage sludge, wood chip or green waste)	Temperate climate; Angers, France	60 month	In-situ - 600 liters plot	Carbon dynamic and fragmentation/particle size	Technosol structure (particle size) Nature of organic matter	No	No	Sieved at 20 mm	(Vidal-Beaudet et al. 2012)
Excavated deep horizon, green waste compost	Climate chamber: photoperiod = 12h, 22/20°C, Air humidity = 75%	21 weeks	In-lab - mesocosm	Aggregation, particle size and biodegradation	Soil fauna (earthworm), and plant	Yes: rye-grass	Yes - constant humidity	Air-dried, sieved to 4 mm	(Deeb et al. 2017)
Papper-mill sludge, thermally treated soil material, green waste compost	Continental climate; Homécourt, France	3 years	In-situ - lysimetryc plots	Leaching, aggregation, soil compaction, profile evolution and soil structure.	-	Yes: < 1.5 year: spontaneous plants. > 1.5 year : rye grass and alfalfa	No	-	(Séré et al. 2010)
Gravels, treated industrial soil mixed, paper mill sludge and green waste compost	16h day-lengthwith, temperature of 20 °C and moisture = 50 %	268 days	In-lab - mesocosms	Aggregation and dynamic of porosity	Fauna and root	Yes: Lupin	Yes	Air-dried, crushed and sieved at 500 µm. Some thermically treated.	(Jangorzo et al. 2014)

Tableau 7 : Les processus observés et conditions d'études de 5 articles traitant de la question de la pédogénèse de sol construit.

III.3. Facteurs d'influence

Nous avons vu les processus qui pouvaient se dérouler au sein d'un Technosol et leurs originalités éventuelles en comparaison à un sol naturel. Nous avons commencé à aborder les facteurs pouvant influencer la pédogénèse des Technosols, nous allons ici les détailler. Ces facteurs sont susceptibles d'affecter les processus par leurs natures, leurs cinétiques et/ou leurs périodes d'actions, en fonction du type et de l'environnement du Technosol considéré. Il nous est possible de distinguer les facteurs abiotiques des facteurs biotiques.

III.3.a. Facteurs biotiques

- **L'homme**

De par la définition même d'un Technosol, l'homme est à l'origine totale (dans le cas de Technosols construits) ou partielle (cas des Technosols fortement transformés) des Technosols. Son impact va pouvoir se manifester :

- durant sa formation : au travers de l'apport de matériaux parentaux le constituant pour tout ou partie et de leurs agencements ;
- durant son évolution, au travers d'actions telles que l'excavation, la compaction, l'imperméabilisation, l'apport de matériaux, le labour etc.

Ces impacts doivent donc être considéré au niveau des processus observés et de leurs caractéristiques. Pour illustration, l'irrigation peut engendrer une diminution irréversible de la porosité notamment lors des premières phases d'humectation (Jangorzo et al. 2014).

- **La faune et la flore**

Malgré la présence potentielle de polluants et/ou d'artefact au sein des SUTMA qui peuvent se révéler peu voire pas favorable à l'établissement de faune et de flore, ceux-ci ont montré qu'ils peuvent accueillir d'importants niveaux de biodiversité (Joimel et al. 2017). Dans le cas des Technosols, le choix des matériaux va influencer la survie et la reproduction de certaines espèces de vers de terre (Pey et al. 2014). Par ailleurs, même si aucune ou très peu de faune et/ou de flore n'était présente initialement, une colonisation passive se réalise au cours du temps (Frouz et al. 2013; Lucisine et al. 2015).

Dans le cas de sols construits, l'impact des racines, d'espèces ingénieurs de l'écosystème tels que les vers de terre ou encore les communautés microbiennes ont été étudié. Ceux-ci ont en effet une influence sur la structure des Technosols, leurs altérations ainsi que la dynamique du carbone et des nutriments (Pey et al. 2013; Jangorzo et al. 2014; Deeb et al. 2016a; Deeb et al. 2016b ; Vidal-Beaudet

et al. 2016). Etudiant deux groupes éco-morphologiques de vers de terre, Pey et al. (2013) démontrent leur impact sur la structure organo-minérale d'un Technosol, via une activité d'enfouissement, cet impact étant dépendant du groupe éco-morphologique des vers considérés. Toutefois, les auteurs ne distinguent pas d'effet des vers sur la teneur en carbone du sol et émettent l'hypothèse d'un manque de mesure ou de teneur en carbone des matériaux trop important qui masquerait l'effet. Etudiant ensemble l'effet des vers et des plantes dans des Technosols équivalents, Jangorzo et al. (2014), montrent que le premier développement des racines entraîne une augmentation de la porosité tout comme lors la première activité d'enfouissement des vers qui engendre une nouvelle porosité qui sera ensuite soit comblée soit réutilisée lors de leurs exploration du sol. Tandis que Vidal-Beaudet et al. (2016), ne notent aucun impact du développement des plantes sur le processus d'agrégation.

Ces études mettent bien en évidence le caractère mécanique (développement des racines qui va combler une partie de la porosité) aussi bien que chimique (stimulation de la minéralisation des matières organiques via leur digestion par les vers), de la faune et de la flore sur les processus pédogénétiques. Par ailleurs, ses effets sont multifactoriels : Deeb et al. (2017), démontrent bien l'interaction existante entre les facteurs considérés (présence/absence de vers, type de sol et type de plante). Cet effet dépendra du processus étudié, de son échelle d'étude mais également, de l'espèce voire de la sous-espèce (i.e : groupe éco-morphologique considérée), du type de matière organique, de sa qualité ou des matériaux en mélange.

III.3.b. Facteurs abiotiques

- **Nature des matériaux**

De par leurs caractéristiques physico-chimiques uniques (Rokia et al. 2014) en comparaison à un sol naturel (Baumgartl 1998), les matériaux parentaux d'un Technosol, vont influencer la nature et la cinétique des processus en son sein. La présence de certains minéraux carbonatés peut ainsi freiner son évolution. Au contraire, l'hétérogénéité des matériaux parentaux ou du profil de sol, peut favoriser certaines réactions et/ou leurs vitesses en augmentant par exemple leurs surfaces spécifiques. Le taux de matières organiques est ainsi fortement lié à la stabilité des agrégats ou à la biodégradation (Chenu et al. 2000; Grosbellet et al. 2011). Allant plus loin, Vidal-Beaudet et al. (2016), montrent l'impact du type de matériel parental utilisé et plus particulièrement de la nature de la matière organique sur le processus d'agrégation. Enfin, la vitesse d'écoulement d'un fluide au sein du sol a fait l'objet de nombreuses études qui ont montré son importance vis-à-vis de la nature et la cinétique des processus (Baumgartl 1998). Dans le cas de sols anthropisés, leurs valeurs de masses volumiques apparentes importantes et/ou la présence de matériaux grossiers et/ou la présence d'un scellement en surface ou en profondeur vont impacter les écoulements qui différeront par rapport à un sol naturel à la fois d'un point

de vue vertical et horizontal (Baumgartl 1998), remettant en cause l'utilisation de concept classique tel que la Loi de Darcy concernant l'écoulement des fluides. Une vitesse de circulation d'eau rapide pourra ainsi favoriser les réactions à cinétiques rapides, à l'inverse celle de sol scellé en surface pourra être faible (Burghart et al., 2004 dans Séré, 2007).

- **Le temps**

Comme nous l'avons déjà évoqué ci-dessus, à l'échelle des temps géologiques, les Technosols construits se différencient très nettement du fait de leur jeune âge. Ce paramètre est essentiel car l'intensité des processus de pédogénèse a été montrée comme décroissant avec l'âge d'un sol (Sauer 2010; Egli et al. 2014). En complément, il est essentiel de garder à l'esprit que les processus de pédogénèse peuvent être hiérarchisés selon une échelle de temps dans un sol naturel (Séré 2007). Le faible temps d'études aujourd'hui possédé concernant des sols construits où des Technosols en général, ne permet pas de réaliser un tel classement au sein d'un Technosol, toutefois, sa transposition peut-être discutée.

Conclusion partielle - Chapitre I - partie 2

Si l'étude de Technosols construits est aujourd'hui en pleine expansion, aucune étude ne s'intéresse pour le moment à leurs composition et évolution dans un objectif de production alimentaire. L'évolution d'un Technosol, en particulier durant ses premières années, est déterminante pour en apprécier sa fonctionnalité. Les connaissances acquises dans trois domaines : horticulture, science du sol – génie pédologique – et toitures végétalisées peuvent servir dans l'étude de Technosols productifs.

Conclusion chapitre I

Le développement récent et important de l'agriculture urbaine et en particulier de l'une de ses formes : les toitures productives, représente une opportunité intéressante pour générer de nouveaux services écosystémiques en ville. Les toitures végétalisées sont aujourd'hui développées pour certains services écosystémiques notamment ceux liés à l'isolation thermique du bâtiment et la captation d'eau de pluie. Cependant d'autres services, comme développés dans cette synthèse de la littérature, pourraient aussi être pris en compte. Ainsi les toitures végétalisées représentent un potentiel de recyclage de déchets urbains largement inexploré et peuvent permettre la production de biomasse alimentaire. Les études multi-services écosystémiques sont rares dans la littérature.

Cette synthèse de la bibliographie montre que le développement de toitures végétalisées productives passe par la connaissance des services écosystémiques qu'elles peuvent rendre et qu'une approche multi-service est indispensable. Les services écosystémiques sont aujourd'hui l'un des outils majeurs, bien qu'encore peu utilisé, de la transformation et la planification de nos villes (Gómez-Baggethun and Barton 2013). Les espaces de productions en ville et plus particulièrement les toitures productives, redeviennent à ce sujet un outil d'aménagement des villes. Toutefois, le manque de connaissances concernant (i) les services et di-services écosystémiques rendus et (ii) les compromis pouvant être fait au niveau de leurs conceptions pour optimiser certains services, limitent aujourd'hui ce développement. Par ailleurs, étant donné l'importance des propriétés du sol dans la fourniture de ces services, c'est un compartiment qui doit être particulièrement étudié. Si des Technosols sont créés à partir de matériaux résiduels, la question de leur évolution temporelle et donc celle de leurs propriétés et services écosystémiques rendus, est posée. Par ailleurs, d'autres questions concernant l'inocuité environnementale ou la faisabilité réglementaire de l'utilisation de certains résidus peuvent être soulevées.

Les toitures productives constituent un champ d'étude peu connu tant sur le plan fondamental qu'appliqué. L'acquisition de connaissances nouvelles concernant la mise en place de sols à partir de résidus urbains dans le cadre de toitures productives dont il est attendu des services écosystémiques apparaît comme nécessaire. Enfin, dans l'optique de construire des villes circulaire à haut niveau de service écosystémique, le développement de telles toitures devient une réelle opportunité de recherche pouvant ainsi orienter vers de meilleures pratiques.

Problématique de thèse

Ce travail de thèse ambitionne d'étudier des Technosols de toitures productives avec la contrainte de n'utiliser pour leur composition que des déchets urbains selon trois objectifs principaux :

- (i) évaluer leur fonction de production alimentaire,
- (ii) évaluer les services écosystémiques rendus,
- (iii) décrire et quantifier les premières étapes de pédogénèse.

Un quatrième objectif est d'évaluer la pertinence de l'implantation de tels systèmes en milieu urbain et leur optimisation possible. Pour cela, les travaux s'appuieront sur trois dispositifs expérimentaux visant à tester différents modèles de Technosols et type de résidus. L'ensemble de la démarche et des objets d'études sont résumés au sein de la **Figure 13**. Celle-ci représentant le système étudié ainsi que les deux grands axes d'études de la thèse : services écosystémiques et pédogénèse. Le champ d'étude des chapitres y est également représenté.

Les objectifs de la thèse seront déclinés au travers de 10 questions de recherche réparties au sein des chapitres IV, V et VI :

Chapitre III - Services écosystémiques

- Partie 1 – Services écosystémiques :
 - *Question n°1:* Quels sont les services et di-services écosystémiques rendus par un Technosol productif ? Existe-t-il des compromis entre services ?
 - *Question n°2:* Comment se situent ces services par rapport à une toiture végétalisée non productive ?
- Partie 2 - Approvisionnement alimentaire
 - *Question n°3:* Un Technosol construit uniquement à partir de résidus urbains organiques permet-il une production alimentaire significative d'un point de vue quantitatif et acceptable au plan qualitatif ?
 - *Question n°4:* Le niveau de production et la qualité des légumes sont-ils influencés par le type de sol et/ou son évolution ?

Chapitre IV – Fertilité d'un Technosol

- *Question n°5:* Comment évoluent les stocks de nutriments présents au sein du Technosol durant la première année ?

- *Question n°6:* La fertilité du Technosol uniquement constitué de déchets urbains est-elle satisfaisante et le reste-t-elle après un an de culture ?

Chapitre V – Pédogénèse d'un Technosol :

- *Question n°7:* Comment des Technosols formés à partir de matériaux riches en matière organique évoluent-ils à court terme (1 an) ? Quels processus de pédogénèse peut-on observer et quels sont leur importance relative?
- *Question n°8:* Quel est le bilan C au sein du Technosol durant la première année d'implantation?
- *Question n°9:* Quel est l'impact des matériaux parentaux, des plantes cultivées et d'ingénieurs du sol sur les premières étapes de pédogénèse ?

Chapitre VI – Discussion générale

- Général : *Question n°10:* Des Technosols productifs constitués uniquement de déchets urbains sont-ils une voie de végétalisation productive durable ?

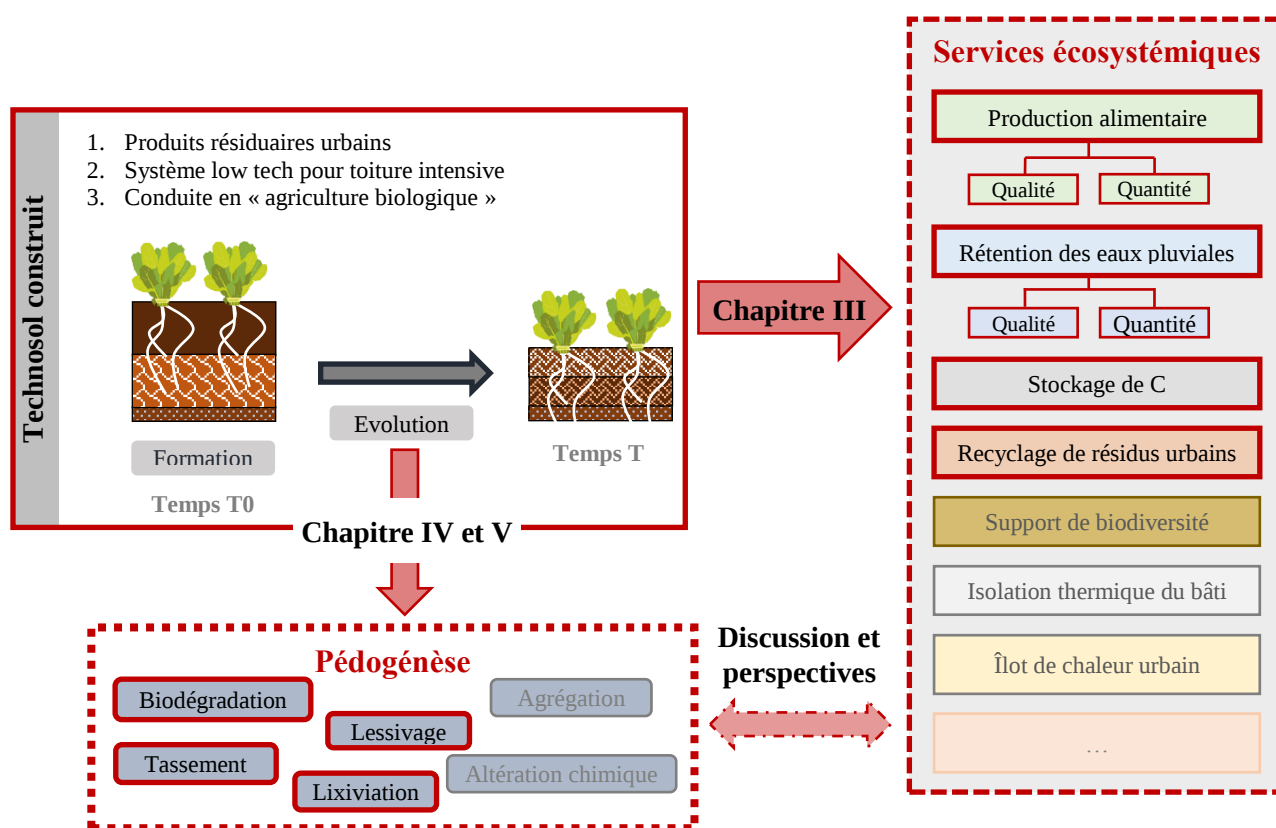


Figure 13 : Représentation schématique du champ d'étude des différents chapitres constitutifs des travaux de thèse



Toit d'AgroParisTech – Montage de l'expérimentation n°3 en septembre 2015 ©BaptisteGrard

Chapitre II - Matériel et méthodes : Dispositifs expérimentaux du projet T4P et caractérisation



Toit expérimental « Bertrand Ney » d'AgroParisTech en septembre 2014. © David Haddad.

Dans ce chapitre, une première partie visera à décrire le projet de recherche T4P et les dispositifs expérimentaux utilisés au sein des travaux de thèse. Nous verrons ensuite, les méthodes utilisées pour l'ensemble des mesures réalisées.

Partie 1 : Matériel - Le projet T4P (Toit Parisien Productif, Projet Pilote)

I. Objectifs

Le projet de recherche T4P a commencé en mars 2012 avec pour objectif général de tester la faisabilité de la culture sur les toits à partir de résidus urbains. Le projet, toujours en cours, s'est traduit par l'installation de différents dispositifs expérimentaux (5) dont 3 ont été utilisés et pilotés pour tout ou

partie dans le cadre de cette thèse. Les différents dispositifs et les mesures qui y sont réalisées sont présentés ci-dessous.

Ce projet est mené conjointement par plusieurs unités de recherches : l'UMR SAD-APT (INRA-AgroParisTech), qui est à l'origine du projet, l'UMR ECOSYS (INRA-AgroParisTech) qui porte notamment les recherches sur le sol et la biodiversité, l'UMR GENIAL (AgroParisTech) qui s'occupe principalement des aspects polluants et l'UMR ESE (CNRS/UPS/AgroParisTech). Par ailleurs, différentes entreprises sont associées au projet : BioYvelinesServices^{<http://www.bioyvelines.fr/>}, LaBoitesàChampignons^{<https://www.laboiteachampignons.com/>}, Topager^{<http://topager.com/>} et Cultures en villes^{<http://culturesenville.fr/>}. Durant la totalité de la thèse, j'ai eu la responsabilité de l'ensemble des dispositifs expérimentaux décrits ci-dessous (conduite de culture, récolte, prélèvement, manipulation en laboratoire etc.). Une description détaillée du projet est disponible sur le site d'AgroParisTech rubrique « jardin expérimental »¹³. Une vidéo du montage ainsi qu'une explication du dispositif n°3 est par ailleurs disponible^{14&15}.

II. Cahier des charges de l'étude

L'ensemble des dispositifs expérimentaux au sein du projet T4P, a été conçu autour d'un cahier des charges résumable en trois points :

- Une **non-utilisation d'intrant de synthèse** (à savoir insecticide, pesticide et fertilisant chimique) au sein des systèmes de culture. Ceci répond à une volonté de minimiser leur impact environnemental et de respecter des normes actuellement en vigueur ou qui le seront en milieu urbain, à savoir : le plan Ecophyto^{<http://agriculture.gouv.fr/le-plan-ecophyto-pour-reduire-lutilisation-des-produits-phytosanitaires-en-france>} qui vise à réduire voir à proscrire l'usage de produit phytosanitaire en ville en particulier pour l'entretien des espaces verts ; des dispositifs tels que la charte main verte à Paris pour les jardins partagés qui proscriit l'usage de produits phytosanitaires ou enfin la loi du 6 février 2014 qui proscriit à partir de 2020 l'utilisation de produits phytosanitaires pour l'entretien des espaces verts, forêts ou promenades.
- L'**utilisation exclusive de déchets urbains** pouvant être trouvés dans des filières locales en tant que support de culture ou Technosol, afin de créer un circuit vertueux de déchets produits et valorisés localement et qui ne trouvent pas forcément de filière de valorisation

¹³ <http://www.agroparistech.fr/T4P-un-Projet-de-recherche-innovant-pour-des-Toits-Parisiens-Productifs.html>

¹⁴ Montage de l'expérimentation n°3 : <https://www.youtube.com/watch?v=zNvg5i9SpKg>

¹⁵ Explication autour de l'expérimentation n°3 : <https://www.youtube.com/watch?v=3IRNZEK5Lvo&t=22s>

directe. Cela permet d'insérer ces toitures productives dans le métabolisme urbain (Barles 2009).

- La **conception d'un système de culture facilement transposable et utilisable** par des personnes sans connaissance spécifique en agronomie. Par cette contrainte, le projet se situe plutôt dans **un modèle de jardin associatif** que de maraîchage professionnel induisant certains choix de conception où la production de biomasse n'est pas toujours maximisée.

III. Matériaux utilisés

Six résidus urbains différents ont été utilisés sur l'ensemble des dispositifs expérimentaux pour la composition des Technosols:

- Un **compost de déchets verts**, provenant de la plateforme de compostage de l'entreprise BioYvelinesServices ;
- Du **bois broyé**, provenant de la plateforme de compostage de l'entreprise BioYvelinesServices ;
- Un **compost de bio-déchets**, provenant des plateformes de l'entreprise Véolia ;
- Un **résidu de champignonnière** produit par l'entreprise Laboiteàchampignon pour réaliser une culture de pleurote sur substrat à base de marc de café usagé mélangé avec des résidus ligneux (i.e. : bois, paille..) ;
- Un **mélange de briques et de tuiles** concassées produit par l'entreprise ECT ;
- Des **plaquettes forestières** (diamètre 10-20 ou 20-40 mm) provenant de la plateforme de compostage de l'entreprise BioYvelinesServices ont également été utilisées sur l'ensemble des dispositifs expérimentaux en tant que paillage.

Parmi ces six résidus, on peut distinguer : 5 résidus organiques et 1 résidu minéral. Un mélange, constitué à 60% de compost de biodéchets et 40% en volume de résidu de champignonnière a été utilisé dans l'un des dispositifs expérimentaux.

Ces six résidus ont été utilisés (i) pour des raisons de disponibilité géographique (notamment : compost de déchets verts et bois broyés) et/ou (ii) pour leurs productions (potentielles) en milieu urbain (notamment : résidu de champignonnière, mélange de briques et tuiles et compost de bio-déchets).

Par ailleurs, un substrat de type **Terre à planter®** acheté en jardinerie (marque « Or brun ») a été utilisé en tant que référence. Ce substrat sera par la suite nommé « Terreau » au regard de sa teneur de carbone organique (voir **Annexe n° 1**) et des appellations des supports de cultures tel que définis par la norme AFNOR NF U 44-551.



Plaquettes forestières



Bois broyé



Briques et tuiles concassées



Mélange



Résidus de champignonnière



Compost de biodéchets



Compost de déchets verts

Figure 14 : Photos des différents résidus urbains utilisés dans le cadre des expérimentations. ©Baptiste Grard et Charlène Zahir.

Enfin, des billes d'argiles expansées (8-16 mm rondes ; distribuées par la société Leprieuré¹⁶) ont été installées sur les dispositifs n°1 et 2 (décrit ci-dessous) en tant que réserve d'eau. La **Figure 14** présente l'aspect de l'ensemble des matériaux utilisés (à l'exception du terreau). Les caractéristiques physico-chimiques des différents produits utilisés sont présentées en **Annexe n° 1**.

IV. Rotations et pratiques culturales

Deux types de rotation de culture ont été mises en place au sein des expérimentations :

IV.1. Une rotation de culture simplifiée

Celle-ci est présentée sur la **Figure 15**. Deux cultures majeures s'enchaînent : laitues et tomates cerise suivies d'une culture d'hiver (mélange de trèfle et de seigle). La tomate et la laitue ont été choisies au sein de cette rotation pour deux raisons :

- (1) la tomate est connue pour être un légume exigeant d'un point de vue nutritif tandis que la laitue l'est moins ;
- (2) la comparaison entre un légume fruit et feuille est intéressante du point de vue des polluants. Les légumes feuilles étant connus pour leurs capacités d'accumulation de certains polluants en présentant notamment une importante surface potentielle de dépôt foliaire.

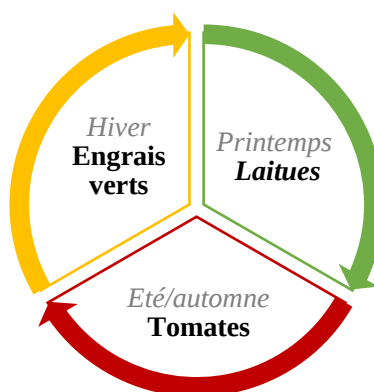


Figure 15 : Rotation de culture simplifiée

IV.2. Une rotation de culture diversifiée

Cette rotation vise à optimiser la production sur une surface réduite, à cultiver des légumes couramment utilisés dans des jardins urbains et à viser un délai de non-retour d'une même famille de légumes pendant

¹⁶ <http://www.vegetalid.fr/>

4 ans. Les cultures sont en général associées pour une complémentarité de leur système racinaire (visant à maximiser l'espace de sol exploré) et/ou de développement aérien et/ou de besoin nutritif. La rotation est organisée autour de 4 associations principales (se déroulant pour la plupart entre mars et octobre) : choux - haricot, courgette - radis, tomate - laitue et carotte – oignon (**Figure 16**). Entre ces quatre associations, des cultures intermédiaires sont placées, notamment durant la période hivernale. La définition de cette rotation de culture a fait l'objet d'un stage de fin d'étude en 2014 réalisé par Antoine Juvin (Juvin 2014).

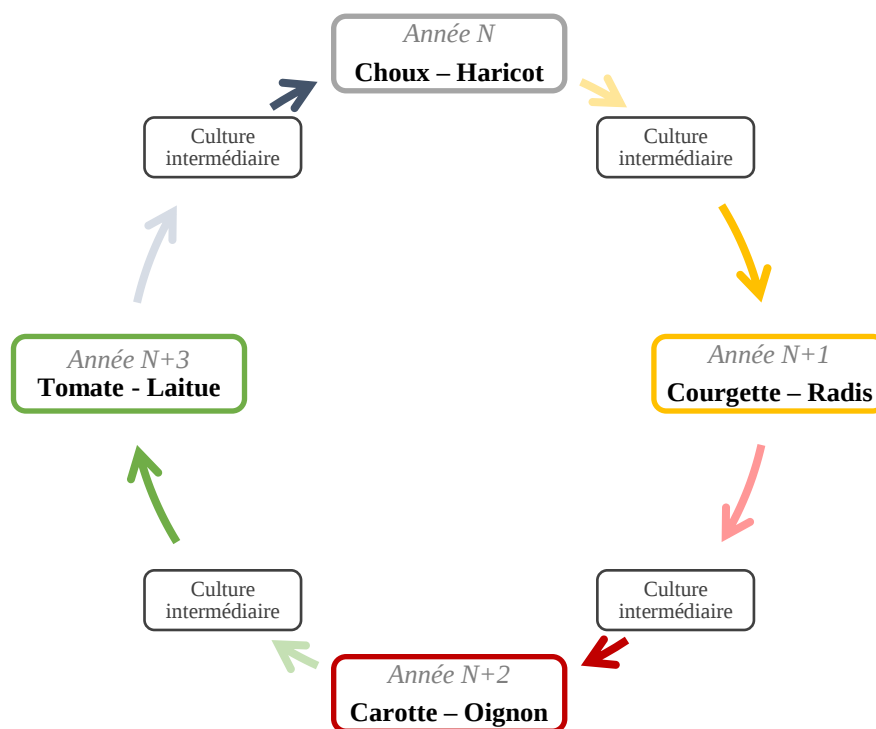


Figure 16 : Rotation de culture diversifiée

IV.3. Entretien des cultures



Figure 17 : A gauche : Larve de punaise sur un plant de haricot récolté en août 2016. A droite : coccinelle sur une feuille d'épinard en mars 2016 ©BaptisteGrard

IV.3.a. Lutte contre les ravageurs

Lors de l'observation de ravageurs sur des cultures, différents traitements phytosanitaires utilisables en agriculture biologique ont été employés. Les principaux ravageurs qui ont été observés sont : les pucerons, les limaces, le mildiou, l'oïdium, la piéride du chou et les punaises. Principaux traitements réalisés : savon noir dilué, ferramol®, purin d'ortie, purin de prêle, lait demi-écrémé dilué et purin de gourmands de tomates. En 2012 et 2013, quelques traitements à la bouillie bordelaise ont été effectués et jusqu'en 2016, des pièges à bières contre les limaces ont été mis en place. Chaque traitement a été reporté sur un cahier de laboratoire.

IV.3.b. Taille des cultures

Les gourmands de plants de tomates ont été systématiquement taillés de manière à diriger la croissance des plants. Les feuilles de courgettes les plus touchées par l'oïdium ont été taillées et retirées des bacs pour minimiser l'attaque. Les feuilles de choux ou de haricots ayant séché totalement n'ont pas été laissées sur les plants ou en surface des bacs mais systématiquement retirées. Les plants de tomates ou de haricots ont été tuteurés pour permettre un développement aérien (voir **Figure 18**).



Figure 18 : Plants de haricots tuteurés en juin 2014.

V. Les expérimentations de thèse

V.1. Caractéristique du site expérimental

L'ensemble des expérimentations ont été réalisées sur la toiture expérimentale « Bertrand Ney », située au 16 rue Claude Bernard dans le 5^{ème} arrondissement de Paris sur le bâtiment de l'aile Arbalète du centre d'AgroParisTech (48°50'24.4"N, 2°20'54.5"E ; voir les **Figure 19** et **Figure 20**). La toiture est d'une superficie totale de 851m² environ à un équivalent 5^{ème} étage (environ 25 mètres de haut).



Figure 19 : Carte de Paris localisant le centre Claude Bernard d'AgroParisTech (Source : ©google maps).

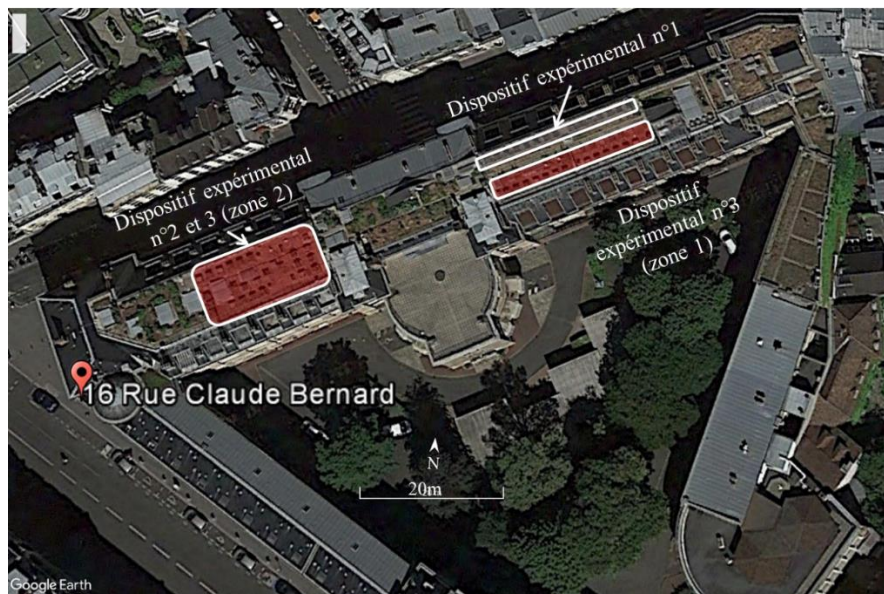


Figure 20 : Photo aérienne du toit Bertrand Ney avec indication de l'emplacement des différents dispositifs expérimentaux.

V.2. Dispositifs expérimentaux

Trois dispositifs expérimentaux issus du projet de recherche T4P ont été utilisés dans le cadre de ces travaux de thèse : nommés dispositifs n°1, 2 et 3 (voir la **Figure 20**). Cette partie a pour objectif de présenter chacun de ces dispositifs : traitement mis en place, rotation de culture et mesures réalisées. Les résultats générés par les dispositifs seront ensuite utilisés dans des parties spécifiques de la thèse (ensemble ou séparément). Pour des raisons de clarté, les chapitres présentant les résultats de la thèse, reviendront sur une partie du matériel et méthode évoquée ci-dessous.

Ces trois dispositifs ont été installés pour des raisons principalement liées au projet :

- Le **dispositif n°1** dit « S1 », a été installé en 2012, dans un objectif de tester la faisabilité de la culture sur les toits à partir de résidu urbains, sur deux aspects : quantité et qualité de la biomasse produite. Pour cela, différents matériaux parentaux issu de résidus urbains et agencement de ces derniers ont été mise en place ;
- Le **dispositif n°2** dit « T4Pbis », a été installé en mars 2013, pour étudier, de manière quantitative, certains services écosystémiques. Pour cela, trois traitements « types » du dispositif n°1 ont été sélectionné ;
- Le **dispositif n°3** dit « Thèse », installé en octobre 2015, a été construit pour étudier l'évolution des Technosols en place ainsi que l'influence de facteurs sur celle-ci. Il a été décidé, de modifier certains matériaux parentaux utilisés et notamment d'utiliser un compost de biodéchets à la place du compost de déchets verts. L'une des raisons de ce choix, est que le compost de biodéchet a été considéré comme plus pertinent dans l'optique d'un potager en toiture recyclant les résidus issus de l'immeuble.

Des pratiques communes, importantes au regard de l'évolution des Technosols, ont été appliquées sur l'ensemble des dispositifs :

- **Les bacs** ont un **poids** compris entre 300 et 450 kg.m⁻² à capacité maximale de rétention en eau.
- L'ensemble des supports de cultures utilisés répondent aux critères de la norme AFNOR NF U 44-551 concernant la présence **d'éléments traces métalliques**.
- L'**installation des matériaux** sur les dispositifs n°1 et 2, s'est faite à partir de mesures de volume occupé par les matériaux directement dans les bacs. A l'inverse, pour le dispositif n°3, les matériaux (dont la masse volumique apparente est connue) ont été pesés avant d'être disposés dans les bacs.
- **Paillage** : Toutes les cultures ont été paillées avec 3 cm de plaquette forestière (0-20 mm ou 20-40 mm) au pied des végétaux à l'exception des végétaux directement semés (i.e. carottes-oignons et radis). Les plaquettes ont été installées pour limiter l'évaporation du Technosol ainsi que l'arrivée d'adventices.

- **Irrigation** : deux dispositifs d'irrigation ont été installés sur les bacs expérimentaux : un dispositif de goutte à goutte (adapté à la basse pression) et un système d'asperseur (4 asperseurs de 90° par bac). Ces derniers n'ont toutefois pas été installés sur le dispositif « 2 ». Les asperseurs n'ont été utilisés/ouverts qu'à de rares occasions, pour la levée de graines semées par temps sec par exemple. Sur la plupart des dispositifs expérimentaux, l'irrigation a fonctionné du mois de mai au mois d'octobre. En l'absence d'un dispositif de mesure directe de l'humidité au sein des Technosols couplé au système d'irrigation ou d'un logiciel de calcul de besoin des végétaux, l'irrigation a été réglée manuellement avec la même dose d'irrigation apportée sur l'ensemble des bacs. Des compteurs d'eau ont été installés au niveau de chaque dispositif expérimental pour connaître le volume d'eau apporté pour chaque saison de culture (à l'exception du dispositif n°1 entre 2012 et 2015).
- **Travail du sol** : seul un travail du sol superficiel a été effectué entre chaque culture sur l'ensemble des bacs expérimentaux. Les 15 premiers centimètres du Technosol ont été binés à l'aide d'une binette permettant de décompacter l'horizon de surface (voir **Figure 73** au sein de l'**Annexe n° 1**).
- L'ensemble des bacs expérimentaux a été placé sous un **filet** de mailles 8 mm permettant de limiter la venue d'oiseaux sur les expérimentations.
- Les bacs expérimentaux ont été espacés au minimum de 50 cm et l'ensemble des traitements et répliquats au sein des dispositifs réparti aléatoirement par répliquat (à l'exception du dispositif n°2 où la répartition a été aléatoire ; voir représentation schématique des dispositifs: **Figure 21**, **Figure 25** et **Figure 29**).
- **Apport de matière** : un apport de matière a été réalisée annuellement sur les dispositifs n° 1 et 2 mais pas sur le n°3. Cette pratique correspond à ce qui est réalisée au niveau de la culture en lasagne par les jardiniers (Collaert 2010), avec un apport annuel du matériaux constitutif de la couche supérieure, pour « remettre la lasagne à niveau ». De fait, après les mesures d'épaisseurs annuelles des Technosols, les bacs des dispositifs n°1 et 2 ont subi un apport de matière correspondant à la couche supérieure du traitement. Le volume apporté est calculé par différence d'épaisseur entre le haut du Technosol à un instant T et sa hauteur initiale (30 cm) multiplié par la sa largeur et sa longueur initiale. Les volumes apportés sont résumés au sein d'un tableau présent en **Annexe n° 2**.

Dispositif n°	1	2	3
Date d'installation et de démontage	Mars 2012 – en cours	Mars 2013 – Mars 2015	Novembre 2015 – en cours
Dimension des bacs de culture	80*80*35 cm	90*90*35 cm	80*80*35 cm
Type de bac de culture	Composteur	Composteur	Assemblé à la main
Nombre total de bacs de culture	15	9	36
Système d'irrigation	Oui	Oui	Oui
Type de système d'irrigation	Goutte à goutte et aspersion	Goutte à goutte	Goutte à goutte et aspersion
Présence d'une réserve d'eau	Oui (5 cm – bille d'argiles expansées)	Oui (5 cm – bille d'argiles expansées)	Non, couche drainante de 3 cm de briques et tuiles concassées
Collecte des eaux de percolation	Non	Oui	Oui
Epaisseur initiale du Technosol	30 cm	30 cm	30 cm
Nombre de traitements expérimentaux	5 : L-I, L-R, L-M, C et L-I_Bis	3 : L, L-I et C	6 : O, OP, OPE, M, MP et MPE.
Nombre de répliquats par traitement	n = 3	n = 3	n = 6
Matériaux parentaux Technosol	Compost de déchets verts, bois broyé, résidus de champignonnières et terreau	Compost de déchets verts, bois broyé et terreau	Compost de biodéchets, résidus de champignonnières, mélange de briques et tuiles concassées et bois broyé.
Date de première mise en culture	Mars 2012	Mars 2013	Novembre 2015
Paillage des cultures	Oui	Oui	Oui
Type de paillage	Plaquette forestière (10-20 & 20-40 mm) sur 3 cm	Plaquette forestière (10-20 & 20-40 mm) sur 3 cm	Plaquette forestière (10-20 & 20-40 mm) sur 3 cm
Apport annuel de matière	Oui	Oui	Non

Tableau 8 : Description des trois dispositifs expérimentaux.

		Dispositif expérimental n°		
		1	2	3
Eau	In-situ	Collecte des eaux de percolation	Non	Oui
		Quantité d'eau pour irrigation	Partielle (uniquement depuis 2016)	Oui
	Laboratoire	pH	Non	Oui
		C dissous	Oui	Oui
		Nmin	Oui	Oui
Technosol	In-situ	Epaisseur	Oui	Oui, à différents pas de temps
		Masse volumique apparente	Partielle	Oui, à différents pas de temps
		Colonisation racinaire	Non	Oui, à différents pas de temps
	Laboratoire	Analyse du sol (pH, C _{organique} , m.o, N _{tot} , CaCO ₃ etc.)	Oui, à différents pas de temps	Oui, à différents pas de temps
		Teneur en ETM	Oui, à différents pas de temps	Oui, à différents pas de temps
		Minéralisation (C et N)	Non	Oui (sur matériaux parentaux)
		Qualité de la matière organique – Van Soest	Non	Oui (sur matériaux parentaux)
		Capacité de rétention en eau	Non	Oui, à différents pas de temps
		Granulométrie des particules	Non	Oui à T0 et T+6mois
Végétaux	In-situ	Pesées et comptages des récoltes par bac	Oui	Pesées et comptages des récoltes par bac
		Observation sanitaire qualitative des récoltes	Oui	Observation sanitaire qualitative des récoltes
	Laboratoire	Teneur en C et N	Oui pour certaines récoltes	Oui pour certaines récoltes
		Teneur en éléments traces métalliques	Oui pour certaines récoltes	Oui pour certaines récoltes

Tableau 9 : Ensemble des mesures réalisées sur les trois dispositifs expérimentaux

De manière à faciliter la compréhension des différents dispositifs, l'ensemble de leurs caractéristiques et des mesures réalisées en leurs seins, sont récapitulés au sien du **Tableau 8** et **Tableau 9**.

V.3. Dispositif expérimental n°1

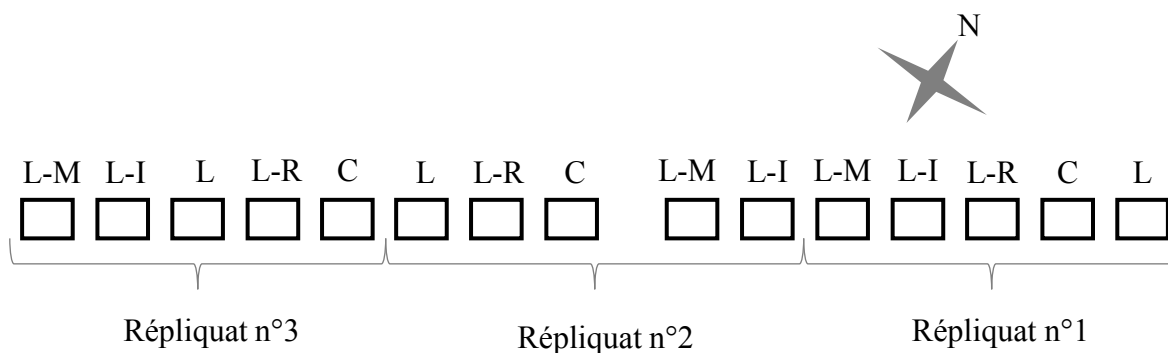


Figure 21 : Représentation schématique de l'ensemble des traitements du dispositif expérimental n°1.

V.3.a. Traitement expérimentaux

L'organisation d'un bac expérimental ainsi qu'une photo du dispositif sont présentées ci-dessous (**Figure 22**). La particularité des bacs du dispositif n°1 étant de comporter une réserve d'eau de 5 cm dans la partie basse constituée de billes d'argiles expansées.

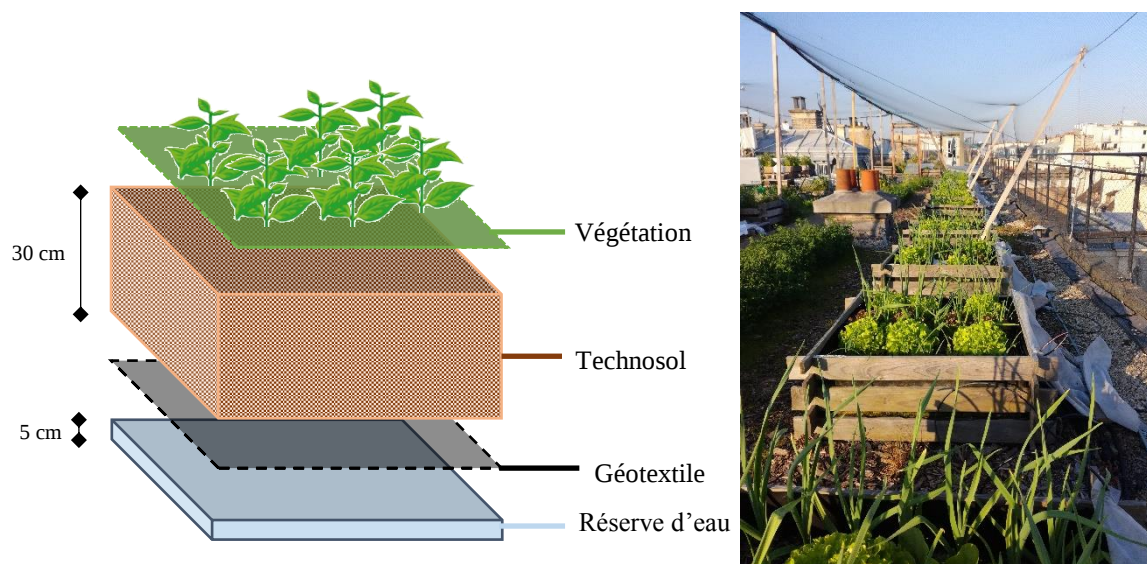


Figure 22 : Organisation d'un bac expérimental du dispositif n°1 (à gauche) et photo de 15 bacs du dispositif en avril 2017 (à droite) ©Baptiste Gard.

Les traitements en lasagnes (ou couches) ont été inspirés d'une pratique issue des jardins partagés conceptualisée par Patricia Landa dans les années 1980 aux Etats-Unis et popularisée en France par

Jean-Paul Collaert dans son ouvrage « L'art du jardin en lasagne » (Collaert 2010). Un traitement (**L**) en lasagne, composée d'une couche supérieure de 15 cm de compost de déchets verts et d'une couche inférieure de 15 cm de bois broyé était initialement présent sur le dispositif. Du fait d'une contamination en vers de terre (épigé) (i.e. des vers de terre ont été retrouvé dans d'autres traitements que L-I) au sein de ces traitements (et d'autres), celui-ci a été exclu des résultats présentées dans le corps de cette thèse. Cette contamination peut s'expliquer soit par (i) la capacité de déplacement des vers et/ou (ii) la présence d'œufs de vers dans le compost et/ou (iii) un transport du fait d'autres animaux et notamment d'oiseaux qui malgré les filets arrivent à faire de rare passages sur les bacs. Seul l'article « Recycling urban waste as possible use for rooftop vegetable garden » présenté en **Annexe n° 10** fait référence à ce traitement.

Le dispositif n°1 compte donc 4 traitements expérimentaux (voir la **Figure 23**) :

- Un contrôle (**C**) : composé sur 30 cm de terreau « Terre à planter® – Or brun » remplacé en 2015 par un traitement **L-I_Bis** identique au traitement L-I décrit ci-dessous.
- Une lasagne inoculée (**L-I**) : de même composition que L mais en étant inoculée avec trois espèces de vers de terre de deux catégories écologiques : 15 *Dendrobaena veneta* individuels (vers épigé), 35 *Eisenia fetida* (vers épigé), et 10 *Lumbricus terrestris* (vers épi-anécique).
- Une lasagne avec des résidus de champignonnière (**L-R**) : composée d'une couche supérieure de 12,5 cm de compost de déchets verts, d'une couche intermédiaire de 2,5cm de résidu de champignonnière et d'une couche inférieure de 12,5 cm de bois broyé
- Un mélange (**M**) : constitué du mélange sur 30 cm de compost de déchets verts avec du bois broyé.

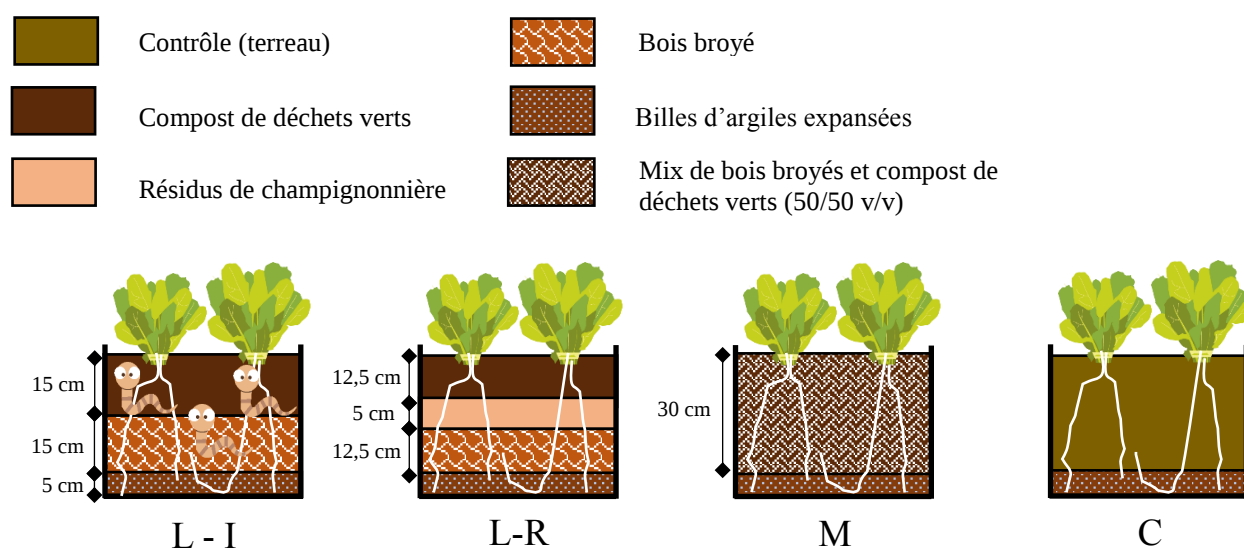


Figure 23 : Traitements du dispositif expérimental n°1.

V.3.b. Rotation de culture

La **Figure 24** ci-dessous illustre la rotation de culture qui a été suivie sur le dispositif expérimental n°1 entre 2012 et 2016.

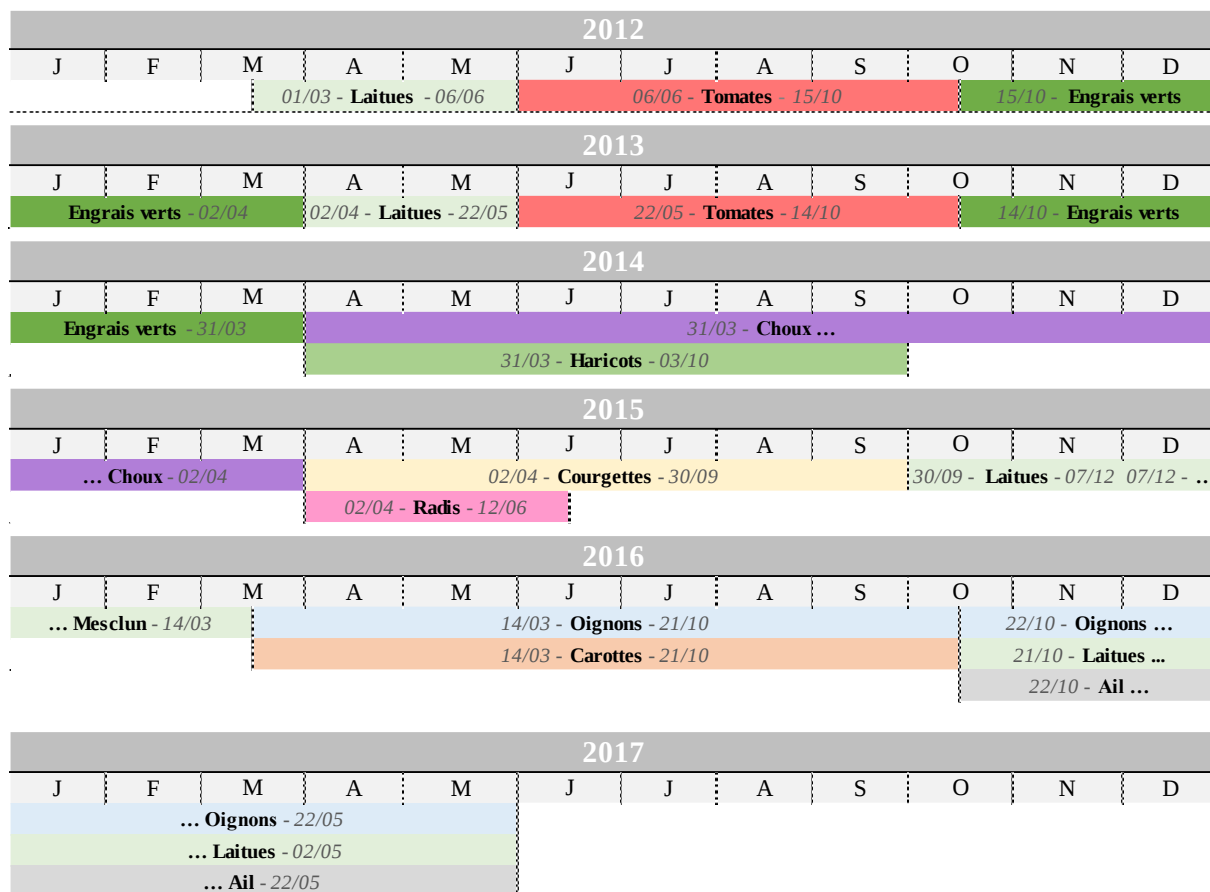


Figure 24 : Rotation de culture en place sur le dispositif expérimental n°1.

V.4. Dispositif expérimental n°2

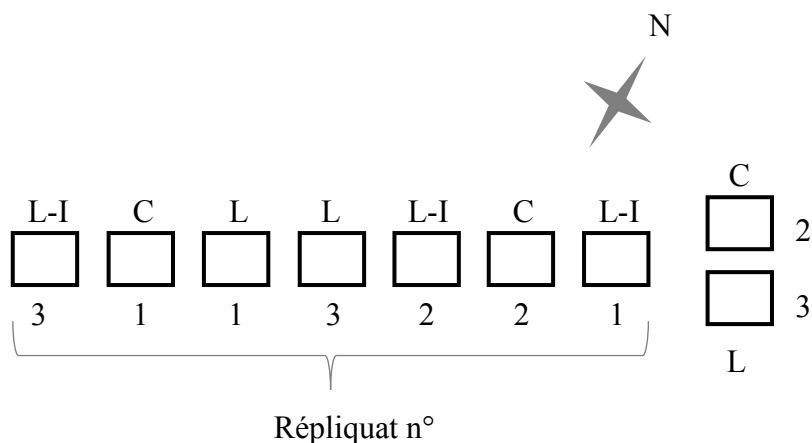


Figure 25 : Représentation schématique de l'ensemble des traitements du dispositif expérimental n°2.

V.4.a. Traitements expérimentaux

Les bacs du dispositif n°2 ont la même composition que ceux du dispositif n°1 (**Figure 26**). Leur seule différence étant d'être surélevés par rapport au niveau du sol et équipés de bidons servant à collecter les eaux de percolation (**Figure 26**) provenant du surplus de la réserve d'eau.

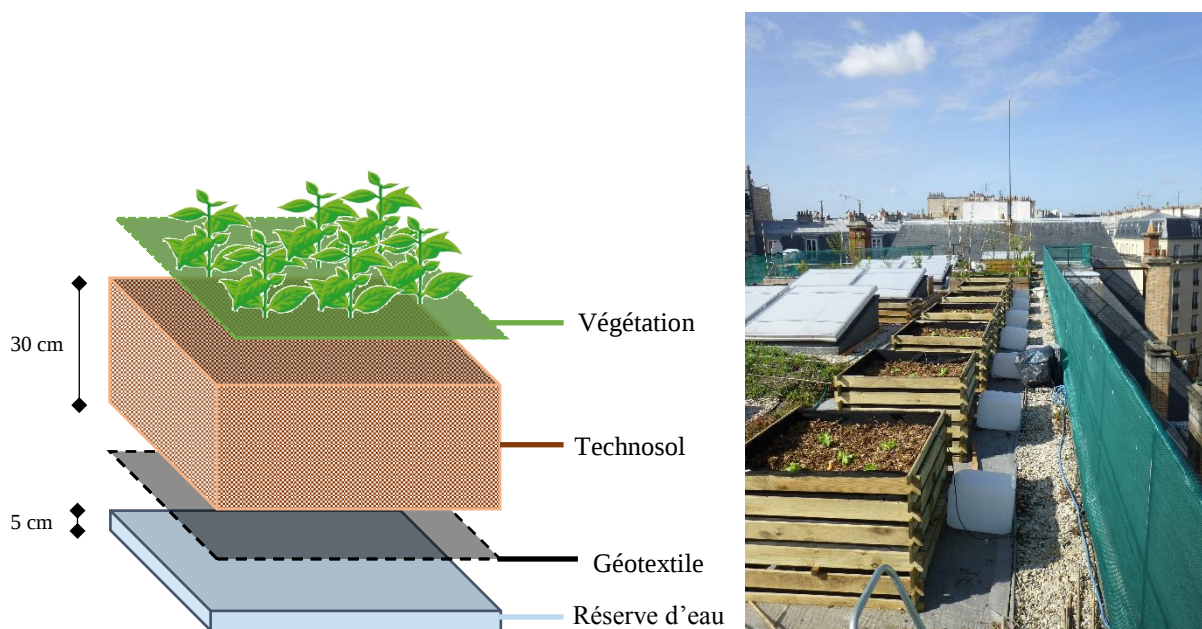


Figure 26 : Organisation d'un bac expérimental du dispositif n°2 (à gauche). Bacs expérimentaux du dispositif avec les bidons servant à la collecte des eaux de percolations (à droite). ©Baptiste Gard

Le dispositif comporte 9 bacs avec trois traitements (**Figure 27**):

- Un contrôle (**C**) : composé sur 30 cm de terreau « Terre à planter – Or brun ® »
- Une lasagne (**L**) : composée d'une couche supérieure de 15 cm de compost de déchets verts et d'une couche inférieure de 15 cm de bois broyé
- Une lasagne inoculée (**L-I**) : de même composition que L mais en étant inoculée avec trois espèces de vers de terre de deux catégories écologiques : 15 *Dendrobaena veneta* individuels (vers épigé), 35 *Eisenia fetida* (vers épigé) et 10 *Lumbricus terrestris* (vers épi-anécique).

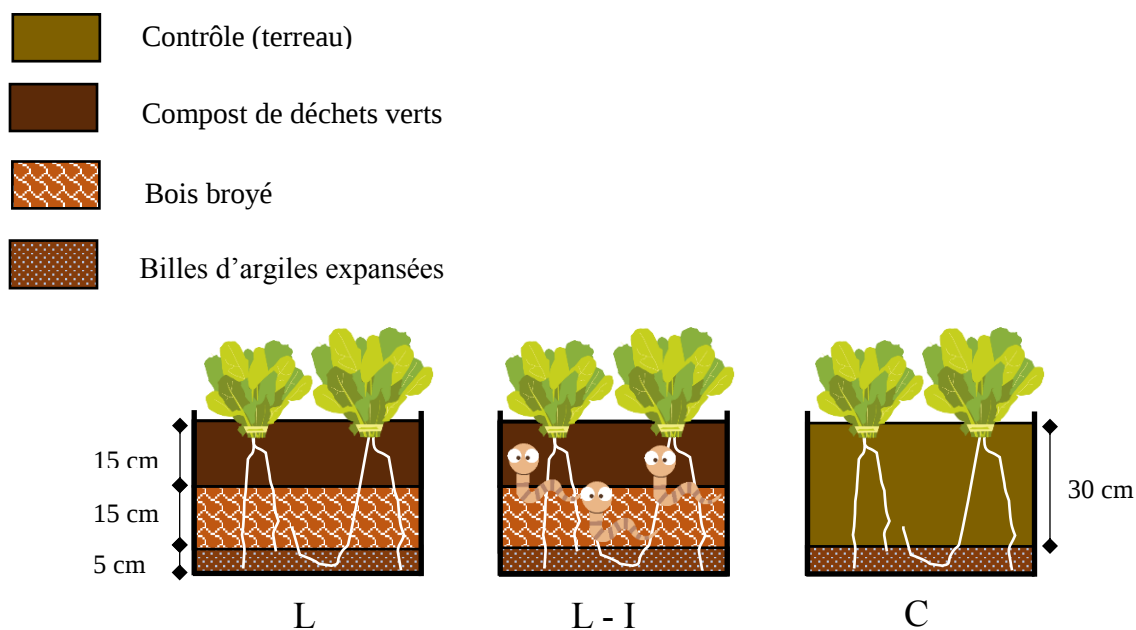


Figure 27 : Schéma des traitements expérimentaux du dispositif n°2.

V.4.b. Rotation de culture

La **Figure 28** ci-dessous présente la rotation de culture effectuée sur le dispositif expérimental n°2 entre mars 2013 et 2015.

2013											
J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
			01/03 - Laitues - 22/05		22/05 - Tomates - 14/10				14/10 - Engrais verts		
2014											
J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Engrais verts - 31/03			31/03- Laitues - 10/06		10/06 - Tomates - 13/10				13/10 - Engrais verts		
2015											
J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Engrais verts - 10/03											

Figure 28 : Rotation de culture en place sur le dispositif expérimental n°2.

V.5. Dispositif expérimental n°3

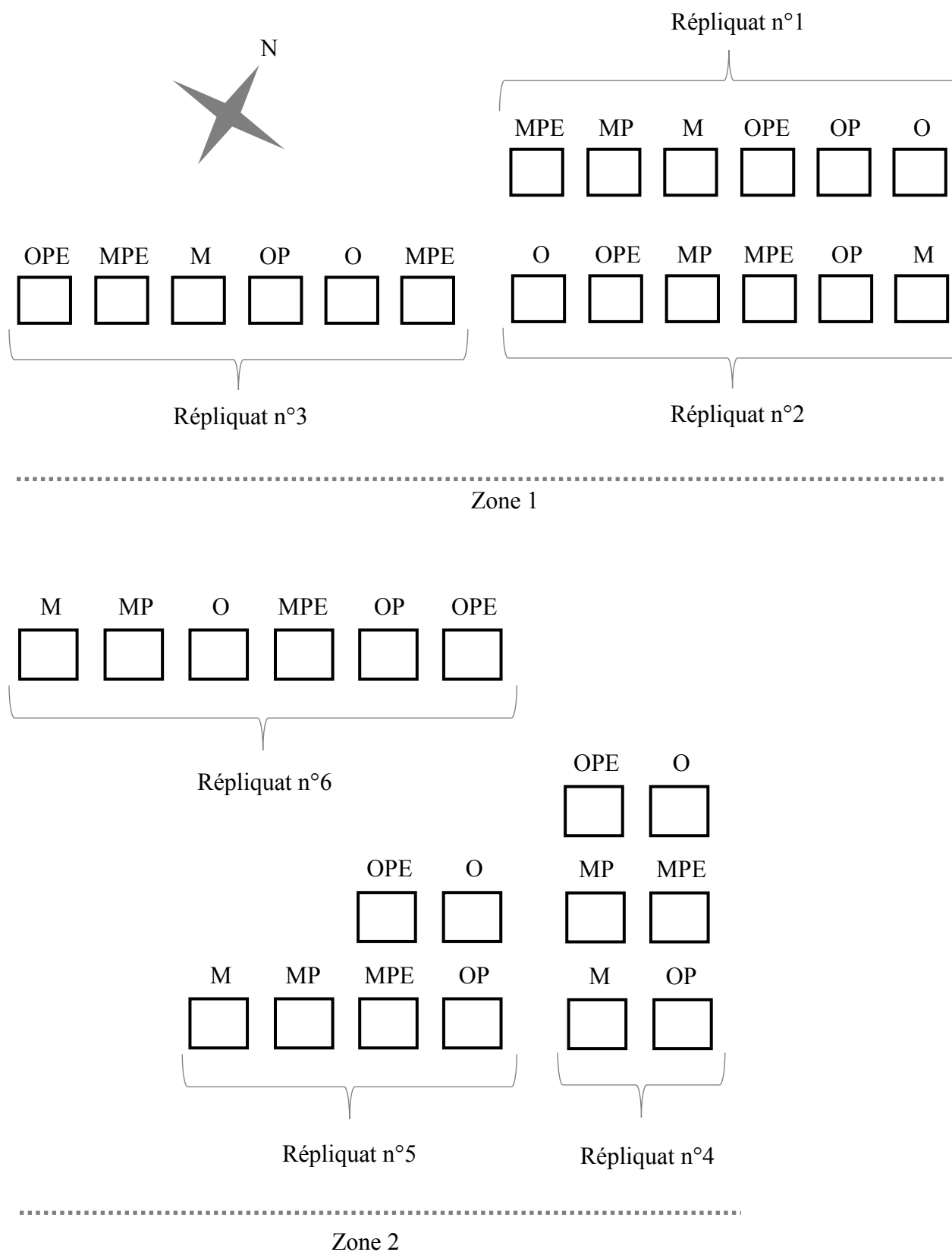


Figure 29 : Représentation schématique de l'ensemble des traitements du dispositif expérimental n°3.

V.5.a. Traitements expérimentaux

L'organisation d'un bac expérimental (**Figure 31**) ainsi qu'une photo (**Figure 30**) du dispositif sont présentées ci-dessous. La particularité des bacs du dispositif n°3 étant de comporter un horizon drainant (i.e. l'eau n'y étant pas retenue contrairement au cas de la réserve d'eau pour les dispositifs expérimentaux n°1 et 2) de 3 cm dans la partie basse des bacs constitué du mélange de briques et tuiles concassées.

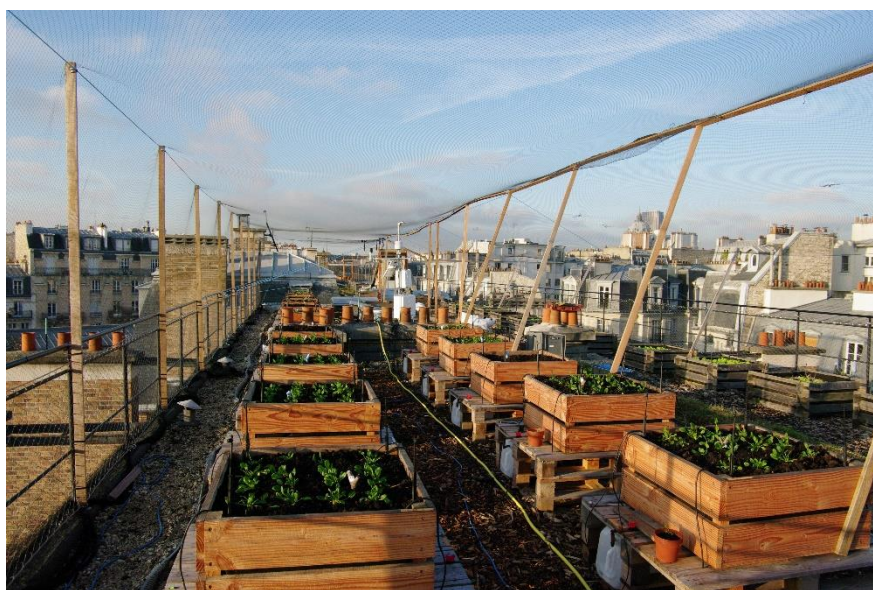


Figure 30 : Bacs expérimentaux du dispositif n°3 en novembre 2015. © Baptiste Gard.

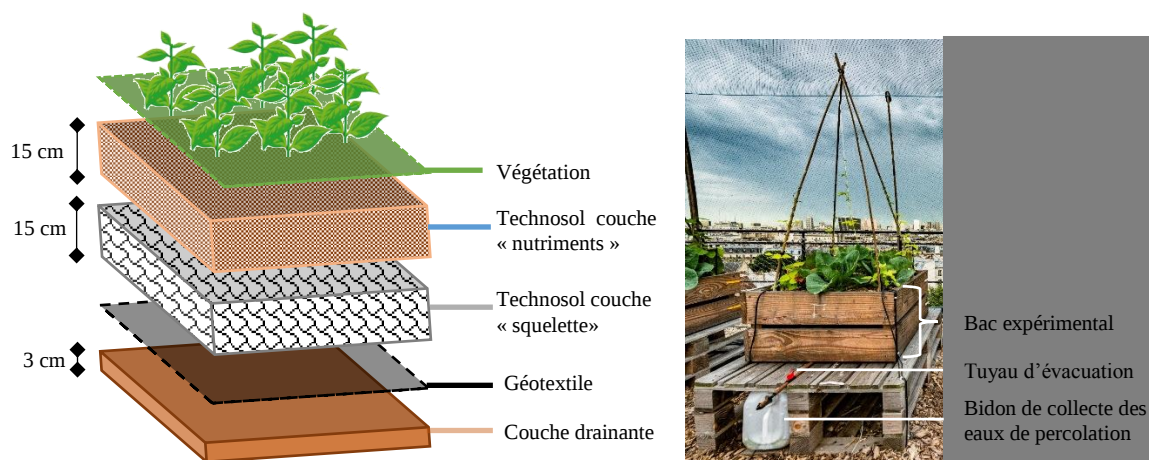


Figure 31 : Schéma de l'organisation d'un bac expérimental du dispositif n°3 en vue explosée (à gauche) et à partir d'une photo (à droite).

Le dispositif comporte 36 bacs avec six traitements (**Figure 32**):

- Un organique sans plante (**O**) : composé d'une couche supérieure de 15 cm d'un mélange de compost de bio-déchets et de résidus de champignonnière (60/40 v/v) et d'une couche inférieure de 15 cm de bois broyé ;
- Un organique avec plante (**OP**) : qui a la même composition que le traitement O mais comporte des plantes cultivées ;
- Un organique avec plante et des vers de terre (**OPE**) : qui a la même composition que le traitement O mais comporte des plantes cultivées ainsi que des vers. Les vers ont été inoculés lors de la plantation des bacs en novembre 2015 avec 20 g par bac soit entre 33 à 41 individus de vers épigés *Eisenia fetida* ;
- Un minéral sans plante (**M**) : composé d'une couche supérieure de 15 cm d'un mélange de compost de bio-déchets et de résidus de champignonnière (60/40 v/v) et d'une couche inférieure de 15 cm d'un mélange de briques et tuiles concassées ;
- Un minéral avec plante (**MP**) : qui a la même composition que le traitement M mais comporte des plantes cultivées ;
- Un minéral avec plante et des vers de terre (**MPE**) : qui a la même composition que le traitement M mais comporte des plantes cultivées ainsi que des vers. Les vers ont été inoculés lors de la plantation des bacs en novembre 2015 avec 20 g par bac soit entre 33 à 41 individus de vers épigés *Eisenia fetida*.

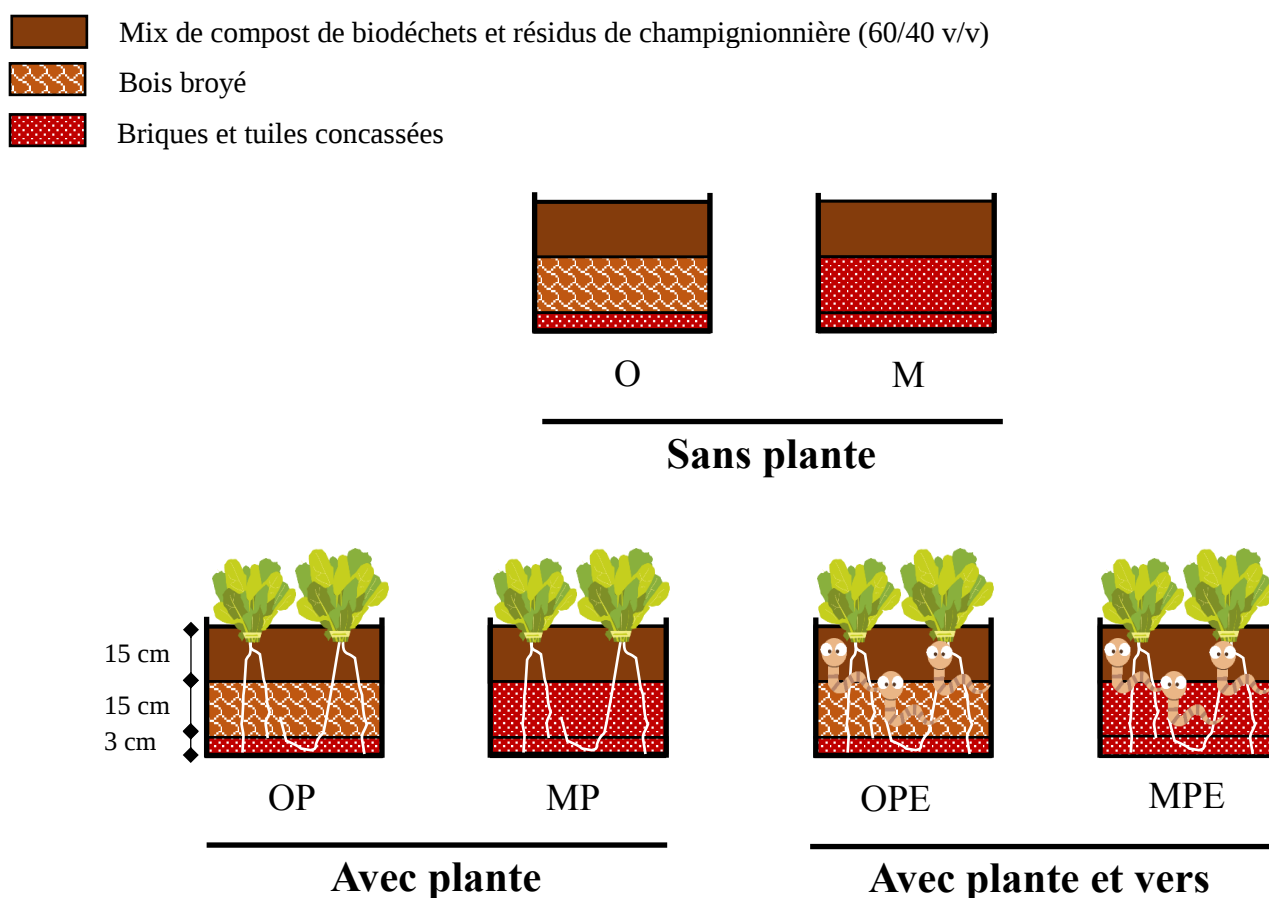


Figure 32 : Schéma des traitements expérimentaux du dispositif n°3

V.5.b. Rotation de culture

La **Figure 33** ci-dessous présente la rotation de culture effectuée sur le dispositif n°3 entre novembre 2015 et 2016.

2015						2016						
N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N
11/11/2015 - Epinards - 03/05/2016												
						04/05/2016 - Choux - 30/08/2016						
						04/05/2016 - Haricots - 28/10/2016						
											01/09/2016 - Laitues - 04/11/2016	

Figure 33 : Rotation de culture mise en place sur le dispositif expérimental n°3 entre novembre 2015 et 2016.



Pycnomètre ©Alexandre Barrier-Guillot

Partie 2 : Méthodes

I. Climat

Une station météorologique Campbell CR1000 a été installée au côté des dispositifs expérimentaux (**Figure 34**) et permis de réaliser en continu les mesures suivantes :

- Température de l'air en °C.
- Pression de l'air (mbar)
- Rayonnement solaire (W.m^{-2} et MJ.m^{-2})
- Pluviométrie (mm)
- Vitesse du vent (m.s^{-1})
- Direction du vent.

L'ensemble de ces paramètres sont mesurés toutes les 5 minutes par la station météo puis moyennés sur une période de 30 min à l'exception de la pluviométrie qui est sommée. La pluviométrie et température, relevées sur la toiture expérimentale durant les 5 saisons de culture, sont présentées en **Annexe n° 9**.

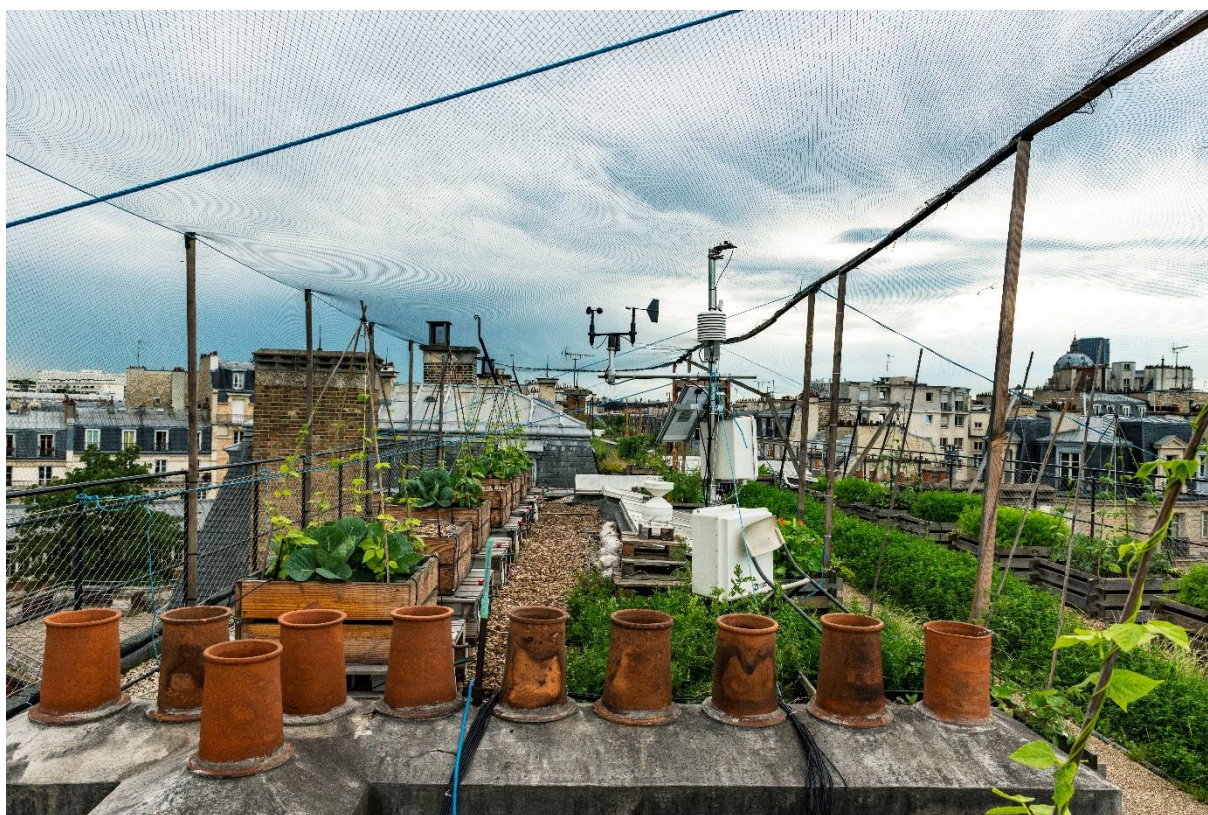


Figure 34 : Photo de la station météorologique Campbell CR1000 en mai 2016 sur le toit « Bertrand Ney »
©Mairie de Paris.

II. Mesures réalisées au niveau de l'eau

II.1. In-situ :

II.1.a. Quantification et collecte des eaux de percolation

Les eaux de percolation des Technosols ont été récupérées sur deux dispositifs expérimentaux, le n°2 et 3. Pour cela, les bacs ont été équipés dans leurs parties inférieures d'une membrane étanche permettant d'orienter l'eau par gravité vers un bidon destiné à récolter l'ensemble des eaux de percolation (**Figure 26** et **Figure 31**). Sur le dispositif n°2, les eaux de percolation correspondent aux eaux non retenues par le Technosol en place et non stockées dans la réserve d'eau, il s'agit donc ici des eaux de débordements de cette dernière. En revanche, sur le dispositif n°3, les eaux de percolation correspondent aux eaux non retenues par le Technosol.

Dans les deux cas, le protocole appliqué est le même : dès qu'un bidon (dédié à la collecte des percolats) se remplit, il est pesé et deux échantillons de 40-60 ml de percolats sont collectés et stockés temporairement à 4°C. Avant d'être placés à -20°C, l'un des deux échantillons est filtré avec un filtre en microfibre de verre (porosité : 1,2 µm, diamètre : 90 mm et épaisseur : 0,26 mm). Les deux échantillons sont ensuite stockés à -20°C avant analyse. A chaque événement de débordement, 2 échantillons d'eau de pluie de 40-60 ml sont également collectés à l'aide d'un pluviomètre manuel et traités de la même façon. Il en est de même pour l'eau du robinet, utilisée pour l'irrigation et collectée à intervalle régulier.

II.1.b. Quantification du volume d'eau d'irrigation

Sur le dispositif n°3, des compteurs d'eau par traitement permettent de relever les volumes d'irrigations apportées. Les compteurs ont été relevés entre 1 à 5 fois par semaine.

Sur le dispositif n°2, un compteur d'eau commun a permis de relever le volume d'eau irrigué régulièrement. Sur le dispositif n°1, depuis 2015, des compteurs d'eau ont été installés par traitement pour comptabiliser le volume d'eau irrigué.

II.2. En laboratoire : Analyse des eaux

Trois types d'analyses sont réalisés sur les eaux de percolation, de pluie ou du robinet et détaillées ci-dessous

II.2.a. Mesure de pH

Une mesure de pH sur échantillon filtré à température ambiante avant congélation et à l'aide d'un pH mètre.

II.2.b. Mesure de l'azote minéral

La concentration en N-NH_4^+ and N-NO_3^- a été analysée par colorimétrie et densité optique à 540 et 660 nm en flux continu (appareil utilisé : Skalar Analytical, Breda, the Netherlands). Les détails de la mesure sont présentés en **Annexe n° 3**.

II.2.c. Mesure du carbone organique total (TOC)

La concentration en carbone total et organique dissous a été mesurée à l'aide d'un analyseur carbone organique (Shimadzu TOC-5000/5000A et TOC-5050/5050A). L'analyse est réalisée via une oxydation thermique à 680°C et à l'aide d'une attaque à l'acide phosphorique d'une partie de l'échantillon. Les détails de cette manipulation sont également présentés en **Annexe n° 3**.

Il est important de noter que deux types de matières organiques peuvent être distingués : la matière organique soluble et la matière organique particulaire (MOP). La MOP peut-être libre ou présente dans des agrégats (Six et al. 1998) tandis que la matière organique soluble circule avec la solution du sol (Zmora-Nahum et al. 2005). Par convention, une filtration à 0,45 μm permet de séparer les matières organique dissoutes ($< 0,45 \mu\text{m}$) et particulaires ($> 0,45 \mu\text{m}$) à (Wangersky 1993 ; Gustafsson and Gschwend 1997). Dans notre cas, et sur les deux dispositifs dont les eaux de percolations sont collectées, une filtration à 1,2 μm a été effectué, ce qui veut dire que le terme de carbone organique dissous que nous utiliserons par la suite du fait de l'analyse TOC recouvre à la fois la matière organique dissoute mais également une partie de la matière organique particulaire $< 1,2\mu\text{m}$.

III. Mesures réalisées au niveau des plantes

III.1. Pesées des récoltes

Plusieurs indicateurs peuvent être pris pour le rendement : le poids total par bac ou par pied, le nombre de produit récoltés, leurs tailles etc. Sur l'ensemble des dispositifs, pour chaque culture, au minimum l'ensemble des produits récoltables par bac ont été pesés. Dans bon nombre de cas, ces pesées ont été plus précises :

- pour les légumes fruits (tomates et courgettes) : plusieurs récoltes ont été effectuées. Le moment des récoltes répond à deux règles : la maturité des fruits ou la nécessité de récolter pour implanter une autre culture. Les légumes fruits ont été systématiquement comptabilisés par pied et comptés ;
- pour les légumes feuilles (laitues, choux etc.) : une seule récolte a été effectuée. Celle-ci a été réalisée soit lorsque le produit était considéré comme mûr soit qu'une autre culture devait être implantée. Les légumes ont été au minimum pesés par bac, en comptant le nombre d'unités récoltées, ou récoltés et pesés par pied. Des mesures de calibres ont été réalisées sur certains légumes ;
- pour les légumes racines, les récoltes sont effectuées à l'échelle du bac. Trois pesées ont été systématiquement effectuées après nettoyage des produits à la main : pesée de la biomasse totale, racinaire et épiquée. Par ailleurs, le nombre d'unités récolté par bac a été compté.

Pour l'ensemble des légumes récoltés, deux biomasses ont été distinguées : celle comestible et celle non comestible (dans le cas de haricots séchés ou de légumes ayant pourri par exemple). Dans le calcul final du rendement, seule la fraction comestible est comptabilisée. Les valeurs de rendement par bac ont été en général extrapolées en faisant l'hypothèse d'une linéarité dans le rendement entre la taille du bac ($< 1 \text{ m}^2$) et le m^2 .

Aucun résidu de partie aérienne de culture n'a été laissé au sein des bacs de manière à faciliter les bilans de matière. Une fois la récolte finale effectuée sur des légumes, les plants en place ont été coupés à l'interface du sol (les racines étant laissées dans le Technosol) et compostées en dehors de l'expérimentation. Sur le dispositif n°3 l'ensemble de la biomasse (dont les plants) a été pesé pour connaître au mieux les exportations.

III.2. Mesure de matière sèche

Une fois récolté, les produits ont été lavés à l'eau courante avant qu'un échantillon d'environ 200 g de matière fraîche par produit soit séché à l'étuve à 40°C durant un minimum de deux semaines. Une fois les échantillons secs, ils ont été pesés. Leurs matières sèches étant obtenues par différence entre le poids frais et sec.

III.3. Mesure des éléments traces métalliques

L'ensemble des mesures en éléments traces métalliques a été réalisé sur échantillon sec broyé. Cinq éléments ont été analysés : Cu, Zn, Pb, Cd et Hg. Les mesures ont été effectuées par le laboratoire de chimie analytique (LCA) d'AgroParisTech (UMR GENIAL, INRA-AgroParisTech). Les éléments ont

été analysés en spectrométrie d'absorption atomique sur un HITACHI Z5000. Pour le Cd, le Pb et le Cu la mesure est exécutée en SAA Electrothermique. Pour Zn et Hg la mesure est faite en SAA Flamme. Le détail des mesures est présenté en **Annexe n° 4**.

IV. Mesures réalisées au niveau des Technosols

Pour faciliter la compréhension, les mesures ont été séparées en mesures réalisées in-situ et en laboratoire.

IV.1. « In-situ »

IV.1.a. Echantillonnage et mesures

Pour l'ensemble des dispositifs, si les niveaux de caractérisation sont variables, les protocoles de prélèvement sur le terrain sont les mêmes.

IV.1.a.i Prélèvement de matériaux parentaux

Des prélèvements ont été effectués à chaque début d'expérimentation ou lorsque des matériaux parentaux ont été rapportés sur le système de culture. Ceux-ci ont été prélevés aléatoirement dans leurs contenants initiaux, avec un minimum de $n = 3$ répliquat. Chaque répliquat étant lui-même un échantillon composite.

IV.1.a.ii Prélèvement et mesures in-situ

A chaque période d'analyse, les observations, mesures ou prélèvements ont été réalisés en échantillonnant progressivement le Technosol de haut en bas par couche. Les dispositifs expérimentaux n°1 et 2 ne disposant que de 3 répliquats, les prélèvements de Technosols ont été effectués directement au sein de chacun de ces répliquats. Le dispositif n°3 disposant quant à lui de 6 répliquats, les prélèvements ont été effectués sur 3 répliquats prévus à cet effet (correspondant à la zone 2 sur la **Figure 29**) et de ce fait progressivement détruits au cours de la première année de culture. Une zone allant de 30*30 cm à 50*50 cm a été définie à chaque période d'analyse pour prélever. Cette zone est illustrée sur la **Figure 35** avec l'horizon supérieur quasiment intégralement retiré.

IV.1.a.iii Observations réalisées

Lors des prélèvements, un certain nombre d'observations qualitatives ont été réalisées. Pour le dispositif n°3, une grille d'observation a été mise en place et est présentée en **Annexe n° 5**.

IV.1.a.iv Mesure de matière sèche

Lors de l'extraction du Technosol couche par couche, un échantillon allant de 20 à 100 g de matière fraîche a été prélevé pour chaque couche ou matériaux. Celui-ci a ensuite été séché au minimum 48h à 105°C avant d'être pesé. Sa teneur en matière sèche a été obtenue par différence entre le poids humide et sec.



Figure 35 : Photo d'une zone (35*35 cm) de prélèvement sur deux bacs différents avec un horizon inférieur en brique. A gauche, la couche supérieure a été retirée. A droite, l'intégralité du Technosol a été retiré jusqu'au bas de l'horizon drainant. Photo prise en novembre 2016 lors de prélèvement au bout d'un an sur les Technosols du dispositif n°3. ©Grard Baptiste.

IV.1.a.v Mesure de masse volumique apparente



Figure 36 : A gauche, photographie sur un Technosol à 6 mois de deux cylindres de pF enfoncés dans l’horizon supérieur du Technosol. A gauche : photographie d’une grille (maille - 1cm) servant au profil racinaire ici pour l’horizon supérieur. Les deux photographies ont été prises sur les Technosols du dispositif n°3. ©Alexandre Barrier-Guilot et Baptiste Gard.

Des cylindres de volumes et de poids connus ont été prélevés sur chaque matériaux ou couche du Technosol. Ces échantillons étant non perturbés, ils ont été prélevés avant extraction des couches. La **Figure 36** montre un cylindre, utilisé pour la mesure de masse volumique apparente, enfoncé dans l’horizon supérieur du Technosol. Une fois enfoncé, le substrat autour du cylindre est retiré puis celui-ci est repris et arasé. Concernant les horizons inférieurs plus grossiers, lorsque le cylindre ne pouvait être directement enfoncé, celui-ci a été progressivement rempli à la main en essayant de minimiser les perturbations.

Une fois prélevé, le cylindre est pesé avec l'échantillon frais. Les cylindres de pF étant utilisés pour les courbes de rétention d'eau (décrite ci-dessous), leur teneur en eau est déduite grâce aux mesures de matière sèche (décrite ci-dessus). La masse volumique apparente (MVA) est déterminée selon la formule suivante :

$$MVA = \frac{m_{\text{éch.frais}} - m_{\text{eau}}}{V_{\text{éch.}}}$$

Equation - Calcul de la masse volumique apparente d'un échantillon.

Avec, MVA = masse volumique apparente (g.cm⁻³) ; m_{éch.frais} = Masse de l'échantillon frais (g); m_{eau} = masse d'eau au sein de l'échantillon (g) ; V_{éch.} = volume de l'échantillon (correspondant à celui du cylindre ; cm³).

IV.1.a.vi Développement racinaire

Lors des prélèvements au bout de six mois et un an sur les Technosols du dispositif n°3 nous avons souhaité quantifier le développement des racines le long du profil de sol. Pour cela, une grille (maille 1 cm²) a été placée contre le Technosol une fois chaque couche prélevée. La présence de racines a ensuite été relevée cellule par cellule en notant de 0 (absence) ou de 1 (présence). La méthode de mesure est illustrée sur la **Figure 36**.

IV.1.a.vii Présence de vers

Au sein de chaque couche prélevée, avant de prendre des échantillons de Technosol, des vers de terre ont été recherchés manuellement pendant au moins 2 minutes. Dans le cas d'une observation de vers, ceux-ci sont prélevés et comptabilisés (en tant que juvénile ou adulte) par couche. Une fois ces mesures effectuées, les vers ont été remis en surface des Technosols (voir **Figure 37**).

IV.1.a.viii Mesure d'épaisseur/effondrement

Sur le dispositif n°3 : une barre horizontale placée sur la diagonale de chaque bac a été utilisée pour mesurer l'épaisseur des Technosols. L'épaisseur étant mesurée entre le bas de la barre et le haut du Technosol (voir **Figure 37**). Les bacs ont ainsi été mesurés à vide puis couche par couche à l'installation et durant les périodes de prélèvements. La mesure d'épaisseur totale comporte 10 points espacés de 10 cm chacun, tandis que la mesure d'épaisseur d'une couche lors d'un prélèvement, comme illustrée à la **Figure 37**, ne comporte que 4 points de mesures du fait de la taille de zone. L'existence d'une couche

a été déterminée par son homogénéité. Pour exemple, l'épaisseur d'un horizon supérieur composé de compost s'arrête lorsque des bouts de bois broyé (correspondant à la couche inférieure) sont visibles.

Sur les dispositifs n°1 et 2 les mesures d'épaisseur des Technosols ont été effectuées à l'aide d'une fine tige de bambou graduée. Celle-ci étant enfoncée, le long de la diagonale du bac tous les 10 cm, jusqu'au fond du bac (haut de la réserve d'eau donc) pour connaître l'épaisseur du Technosol.



Figure 37 : A gauche, mesure d'épaisseur dans une zone de prélèvement. A droite, des vers remis sur la surface d'un Technosol après comptage et pesé.

IV.2. En laboratoire

IV.2.a. Caractérisation physique

IV.2.a.i Teneur en matière sèche

Voir ci-dessus.

IV.2.a.ii Mesures de la capacité de rétention en eau par dessiccation

Deux types de dispositifs ont été utilisés pour les mesures de capacité de rétention en eau : des tables de succion de type bac de sable entre pF 1 et 2 (suivant la norme AFNOR EN 13041 :1999) et des presses de Richards entre pF 2 et 4/4,2 AFNOR NF EN 13040 :2000).

L'ensemble des mesures réalisées entre pF 1 et 2 ont été réalisées sur des cylindres (PVC ou métallique) de 10 cm de diamètre et 9 à 11 cm de hauteur. Pour les mesures entre pF 2 et 4/4,2, les mêmes cylindres ont été utilisés pour les mesures portant sur du bois broyé du fait de la taille des particules, tandis que les mesures sur les autres matériaux ont été réalisées avec des cylindres de 5 cm de diamètre et 5 cm de haut. Une toile de lyophilisation servant de tamis (maille de 100 μm) a été installée au bas de chaque cylindre pour assurer le contact billes de verre ou plaque poreuse – Technosol.

Le protocole de mesure peut-être résumé au travers des points suivants :

- L'humectation des échantillons s'est faite par remontée lente par capillarité, l'échantillon étant laissé à saturation pendant 24 à 48h ;
- Une stabilisation relativement lente des échantillons entre deux points de pF a pu être observée, de ce fait, les mesures entre deux points de pF ont été effectuées dans un minimum de 4 jours ;
- De la kaolinite a été utilisée au niveau des plaques poreuses au sein des presses Richards pour favoriser le contact entre l'échantillon et la plaque ;
- A chaque point de pF, l'échantillon a été pesé et fait l'objet d'une mesure d'épaisseur et de diamètre au sein du cylindre.

IV.2.a.iii Détermination de la masse volumique réelle

- Dans le cas d'un matériau hydrophobe :

Afin de déterminer la masse volumique réelle (MVR) d'un matériau, nous avons utilisé des pycnomètres (**Figure 38**). Le protocole utilisé est extrait du livre (« Analyse physique des sols » de Mathieu et Pielain, (1998) dans (Barrier-Guillot 2017)) utilise de l'eau distillée. La mesure du volume d'un échantillon sec (broyé à 2mm), dont la masse est connue, est effectuée par déplacement de liquide, déterminée par la différence de poids entre le pycnomètre plein d'eau (50 cm³) et celui du pycnomètre plein avec l'échantillon :

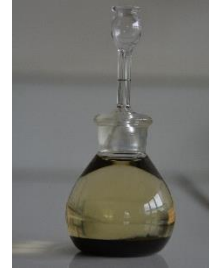


Figure 38 : Photo d'un pycnomètre. ©Alexandre Barrier-Guillot

$$M_{l.d.} = M_3 - M_2 - M_1$$

Equation - Calcul de la masse de liquide déplacée – mesure de la masse volumique réelle

Avec, $M_{l.d.}$ = masse de liquide déplacée (g) ; M_1 = masse de l'échantillon sec (g) ; M_2 = masse pycnomètre plein du liquide (g) et M_3 = masse pycnomètre plein (échantillon + liquide) (g).

$$V_{l.d.} = \frac{M_{l.d.}}{MV_l}$$

Equation - Calcul du volume de liquide déplacé – mesure de la masse volumique réelle.

Avec, $V_{l.d.}$ = volume de liquide déplacé (cm³) ; $M_{l.d.}$ = la masse de liquide déplacée (g) ; MV_l = masse volumique du liquide (g.cm⁻³).

$$MVR = \frac{m_{ech.}}{V_{l.d.}}$$

Equation - Calcul de la masse volumique réelle

Avec, MVR = masse volumique réelle en g.cm⁻³ ; $m_{ech.}$ = masse de l'échantillon (g) et $V_{l.d.}$ = volume de liquide déplacé (cm³).

Ce protocole est adapté pour des sols. Les substrats testés ici sont très riches en matière organique et sont hydrophobes. Il était impossible d'obtenir une décantation dans de l'eau distillée et de nombreuses bulles d'air se formaient. Afin de pallier ces problèmes, un protocole a été rédigé, remplaçant l'eau distillée par de l'éthanol à 96%. Des phases d'agitation et de décantation permettent une bonne immersion des substrats dans l'éthanol sans bulle d'air. Ce protocole, mis en place dans le cadre du stage d'Alexandre Barrier Guillot (Barrier-Guillot 2017) est disponible en **Annexe n° 7**.

Cependant, les matériaux utilisés, comme le mélange de brique et de tuile ainsi que le bois broyé sont très poreux. Ce protocole ne permet pas de prendre en compte les pores non-accessibles qui se trouvent aux cœurs des particules de bois et de briques. Le fait de broyer l'ensemble de l'échantillon à 2 mm sous-estime la masse volumique de l'échantillon.



Figure 39 : Eprouvette graduée utilisée pour la détermination de la masse volumique réelle du bois broyé.

Un deuxième protocole permettant de mesurer la masse volumique réelle « exacte » de matériaux poreux a été rédigé, puis réalisé. Ce protocole est décrit ci-dessous.

- Dans le cas d'un matériau poreux grossier

La méthode est fondée sur la poussée d'Archimède : dans un volume de liquide connu, l'immersion totale d'un objet entrainera la montée du niveau de ce liquide, ce volume déplacé est égal au volume de l'objet immergé, qui une fois rapporté à sa masse sèche, exprimera sa masse volumique réelle.

La difficulté rencontrée ici, est que certains matériaux poreux, comme le bois broyé, flottent dans l'eau, même après saturation totale des pores accessibles à l'eau. Le protocole est réalisé dans des éprouvettes de 1L. Un bouchon, dont la masse et le volume ont été mesurés, a été confectionné afin de maintenir toutes les particules de bois immergé, permettant ainsi de définir la masse volumique réelle de l'échantillon (voir la **Figure 39**).

Le calcul de la masse déplacée et de la masse volumique réelle sont les mêmes que précédemment. Seul change le calcul du volume réel de l'échantillon :

$$VR_{éch.} = 1000 - m_{eaud.} - V_{r.b.}$$

Equation - Calcul du volume réel de l'échantillon dans le cas d'un échantillon grossier poreux –
Mesure de la masse volumique réelle.

Avec, $V_{R_{éch.}}$ = volume réel de l'échantillon (mL) ; $m_{eaud.}$ = masse d'eau déplacée (g) et $V_{r.b.}$ = volume réel du bouchon (mL).

Les différences obtenues entre les résultats du protocole de détermination des masses volumiques réelles des matériaux hydrophobes et ceux obtenus par celle des masses volumiques de matériaux poreux à granulométrie réelle (réalisé sur le bois broyé et la brique concassée) permettent de déterminer le volume des pores inaccessibles au sein des particules de ce deux matériaux.

IV.2.a.iv Détermination de la masse volumique apparente

Voir ci-dessus.

IV.2.a.v Fractionnement granulométrique de particules

Nous avons suivi la norme NF X 31-516 de 2007, sans appliquer la partie densimétrique du protocole. Seuls les matériaux parentaux ($n = 3$) et les Technosols du dispositif n°3 au bout de 6 mois ont été traités.

Pour cela 50 g d'échantillon sec ont été mis à agiter dans 300 mL d'eau distillée pendant 16h avec 20 billes de verres afin de détruire tous les agrégats et mottes présents. Ils ont ensuite été passés à travers 4 tamis de 5 mm, 2 mm, 0,2 mm et 0,05 mm.

5 fractions sont ainsi récupérées (voir **Figure 40**) :

- *Fraction 1* > 5 mm ;
- 5mm > *fraction 2* > 2mm ;
- 2mm > *fraction 3* > 0,2mm ;
- 0,2mm > *fraction 4* > 0,05mm ;
- 0,05mm > *fraction 5*.

Le passage à travers des tamis a été réalisé sans forçage, uniquement par rinçage. Les fractions récupérées sont ensuite placées à l'étuve à 60-80°C, jusqu'à ce qu'elles soient sèches. Enfin elles sont pesées puis conservées.



Figure 40 : 5 fractions obtenues après le fractionnement granulométrique d'un échantillon de bois. © Alexandre Barrier-Guillot

IV.2.b. Caractérisation chimique

IV.2.b.i Analyse des sols

Les analyses présentées dans le **Tableau 10** ont été réalisées par le laboratoire d'analyse des sols INRA d'Arras¹⁷. Ces informations étant par ailleurs disponibles sur le site du laboratoire.

Type d'analyse	Protocole / norme
Carbone organique (g.kg ⁻¹)	NF ISO 10694
Azote total (g.kg ⁻¹)	Méthode INRA interne
pHeau	NF ISO 10390 adaptée
Calcaire (CaCO ₃) total (g.kg ⁻¹)	NF ISO 10693
Phosphore Olsen (P ₂ O ₅) (g.kg ⁻¹)	NF ISO 11263
Capacité d'échange cationique méthode Metson (cmol+.kg ⁻¹)	Méthode INRA
Potassium total HF (ICP-AES; g.100g ⁻¹)	NF EN ISO 111885
Conductivité totale sur extrait 1/25 (m/v) à 25°C (mS.cm ⁻¹)	Méthode INRA
Manganèse extractible à l'EDTA-BCR (mg.kg ⁻¹)	Méthode INRA
Fer extractible à l'EDTA-BCR (mg.kg ⁻¹)	Méthode INRA

Tableau 10 : Analyses et méthodes sous accréditation réalisée par le laboratoire INRA Arras.

IV.2.b.ii Détermination des potentiels de minéralisation du carbone et de l'azote des matériaux parentaux

Des cinétiques de minéralisation du carbone ont été établies en laboratoire sur les matériaux parentaux, les mélanges et le bois broyé. Les incubations se sont déroulées en conditions contrôlées durant 239 jours à 20°C et avec une humidité du matériau ajusté hebdomadairement à pF_{1,7} (soit 5 kPa) . Les matériaux parentaux utilisés pour cette manipulation ont été préalablement séchés à l'étuve pendant 6 jours à 40°C, puis tamisés à 5 mm. Les refus du tamis 5 mm ont été broyés à 8 mm, puis ajoutées à la fraction < 5 mm. Cette décision a été prise en considérant que, si l'ensemble de l'échantillon avait été broyé directement à 8 mm, des particules de taille inférieure à 8 mm auraient pu être broyées plus

¹⁷ <https://www6.npc.inra.fr/las>

finement, faussant ainsi la granulométrie initiale. Les masses suivantes : résidus de champignonnière : 10 g sec ; mélange compost et résidus de champignonnière : 15 g sec par échantillon; compost de bio-déchets : 25 g sec et bois broyé : 25 g sec ; ont été placées dans un tube pvc avec une coupelle plastique à sa base et disposé dans un bocal en verre de 2L fermé et équipé d'un septum permettant la mesure (voir **Figure 41**). Chaque échantillon a été répliqué 4 fois.

- **Minéralisation du carbone**

- *Mesure de la minéralisation*

Le CO₂ dégagé a été dosé par micro-chromatographie à phase gazeuse (micro GC 490 ; **Figure 41**) à 46 dates échelonnées entre 1 et 239 jours. Après chaque mesure, chaque bocal a été ouvert puis pendant au moins 5 min afin de renouveler son atmosphère avant que l'humidité soit vérifiée et un ajout d'eau distillée réalisé si nécessaire à pF1,7 avant ré-incubation.

La quantité de carbone minéralisée est obtenue par le calcul suivant :

$$C_m = \frac{C_{ech.} * 10^{-6} * V_b. * M[C]}{M[GazParfait] * m_{ech.sec}}$$

Avec, C_m. = quantité de C minéralisé par kg de matériau sec (g.kg⁻¹) ; C_{éch.} = concentration en CO₂ dans l'atmosphère du bocal avec l'échantillon (ppm) ; V_{b.} = volume du bocal (2l dans notre cas) ; M[C] = masse molaire du C de 12 g.mole⁻¹ ; M[GazParfait] = volume molaire des gaz parfait à 20°C, soit 24,055 L.mole⁻¹ et m_{ech.sec} = masse du matériau sec.

- **Minéralisation de l'azote**

- *Pesée des échantillons*

La méthode de détermination de l'azote étant destructive, un échantillon par date de mesure a été pris. 9 dates de mesures ont été réalisées : J0-7-14-28-42-56-70-176-239. Les échantillons ont été conditionnés de la même manière que les échantillons pour la minéralisation du C (voir **Figure 41**). Toutefois, deux différences existent entre les deux manipulations : (i) au niveau du nombre d'échantillon par bocal en verre : 2 échantillons sont placés par bocal au sein d'un même tube de PVC et (ii) le bocal de verre a été laissé ouvert durant l'incubation pour éviter une saturation en CO₂ de son atmosphère. L'humidité des échantillons a donc été corrigée toutes les semaines pour être maintenue à pF1,7 à l'aide d'eau distillée.



Figure 41 : Photographie, à gauche : un tube PVC contenant un (minéralisation du carbone) ou deux (minéralisation de l'azote) échantillon(s). A droite : photographie du micro-GC et d'échantillon en cours de mesure pour leur teneur CO₂. ©Alexandre Barrier-Guillot et Baptiste Gard.

- Mesure de la minéralisation nette de l'azote

Chaque échantillon est prélevé après correction de l'humidité, puis placé en flacon avec 100ml de solution de KCl à 1 mole.l⁻¹ et agité durant une heure suivant ainsi la norme concernant l'extraction de l'azote. L'échantillon est ensuite filtré (fibre en microfibre de verre, porosité : 1,2 µm) et stocké à -20°C avant analyse. L'analyse de la teneur en azote minéral de la solution est finalement réalisée sur un analyseur continu de type skalar.

- Erreur de manipulation

L'humidité des échantillons pour la minéralisation de l'azote du carbone, a été adaptée tout au long de la manipulation par rapport au poids initial à pF 1,7. Cependant la perte de masse due à la minéralisation d'azote et de carbone n'a pas été prise en compte. Cette perte de masse était ainsi remplacée par de l'eau au fur et à mesure des ajustements d'humidité. Les échantillons n'ont donc pas été à humidité constante jusqu'à J114. Cependant, pour la minéralisation de l'azote, la perte de masse due à la minéralisation a été prise en compte dans le calcul final de minéralisation de l'azote. A partir de J114, les échantillons ont été maintenus à pF1,7 en prenant compte ces pertes de masse.

IV.2.b.iii Indice de stabilité de la matière organique

Une analyse biochimique des matériaux parentaux a été réalisée selon la méthode Van Soest (Norme AFNOR XP U44-162) à l'aide d'un extracteur de fibres FOSS, Fibertec 1020. L'échantillon a subi plusieurs attaques d'acides et de solvants permettant de différencier:

- les composés solubles dans l'eau ($SOLU_{eau}$).
- les composés organiques insolubles dans le détergent neutre (NDF_{org}). 100ml de détergent est ajouté à l'échantillon et porté à ébullition.
- les composés organiques insolubles dans le détergent acide (ADF_{org}). 100l de solution acide est ajouté avec l'échantillon et porté à ébullition.
- la lignine dite sulfurique (ADL_{org}). De l'acide sulfurique à 72% est introduite au sein de l'échantillon.

Les durées précises et modalités des attaques successives sont détaillées au sein de la norme. Entre chaque attaque, l'échantillon est rincé à l'eau bouillante voir à l'acétone de manière à stopper celle-ci. Après ces attaques, les échantillons sont séchés à $103^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ pendant au moins 16 h puis pesées pour obtention des masses. Les échantillons sont ensuite placés dans un four à combustion à $480^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ durant 6h avant d'être refroidis et à nouveau pesés. Les différentes fractions $SOLU_{eau}$, NDF_{org} , ADF_{org} et ADL_{org} sont ensuite obtenues par différences de masses.

Les quantités relatives aux différentes fractions sont ensuite déduites par les calculs suivants :

$$SOL_{eau} = 100 - SOLU_{eau}$$

$$SOL_{NDF} = SOLU_{eau} - NDF_{org}$$

$$HEM = NDF_{org} - ADF_{org}$$

$$CEL = ADF_{org} - ADL_{org}$$

$$LIC = ADL_{org}$$

Avec :

- SOL : composés organiques solubles, exprimé en $\text{g.}100\text{g}^{-1}$ de m.o (matière organique);
- CEL : approximation de la cellulose, exprimé en $\text{g.}100\text{g}^{-1}$ de m.o ;
- HEM : approximation de la cellulose, exprimé en $\text{g.}100\text{g}^{-1}$ de m.o ;
- LIC : somme des lignines et des cutines, exprimé en $\text{g.}100\text{g}^{-1}$ de m.o.

L'Indice de Stabilité de la Matière Organique (ISMO – norme XP U 44-162) exprime le pourcentage de matière organique potentiellement résistante à la dégradation. Plus l'ISMO est élevé, plus la valeur amendante du produit organique est importante. L'ISMO est exprimé en $\%C_{organique}$ de la matière organique selon la formule suivante :

$$ISMO = 44,5 + 0,5 * SOL - 0,2 * CEL + 0,7 * LIC - 2,3 * Cm3$$

Avec :

- SOL : composés organiques solubles, exprimé en g.100g^{-1} de m.o ;
- CEL : approximation de la cellulose, exprimé en g.100g^{-1} de m.o ;
- LIC : somme des lignines et des cutines, exprimé en g.100g^{-1} de m.o ;
- Cm3 est la proportion de carbone de la matière organique exogène minéralisée après 3 jours d'incubation (XPU 44 163) exprimée en %Corganique de la matière organiques exogènes. Dans notre cas, suite à un problème de manipulation, la proportion du carbone minéralisée en 3 jours d'incubation, a été estimée à partir de nos incubations en laboratoire à 20°C avec un Q10 de 2. Ce qui donne :
 $\text{Cm3}_{\text{mélange}} = (1,46 \pm 0,19) * 2$ et $\text{Cm3}_{\text{boisbroyé}} = (0,23 \pm 0,03) * 2$.



Photo d'épinards broyés – © Alexandre Barrier-Guillot

Chapitre III - Service écosystémique et Technosol productif

Dans une optique de valorisation des résidus urbains, nous allons ici nous intéresser à l'implantation de toiture productive en lien avec les services écosystémiques rendus. Nous étudierons tout d'abord quels sont les services rendus et l'impact du type de Technosol sur ces derniers. Nous nous focaliserons ensuite sur la fonction de production alimentaire de ces toitures et regarderons l'impact du type et de l'agencement du Technosol sur celle-ci. Ce chapitre sera focalisé sur trois aspects :

1. Les services écosystémiques qui peuvent être rendus
2. Les leviers d'optimisation de ces services
3. L'importance et les facteurs d'influence de la production alimentaire à partir de système de culture sur les toits basé uniquement sur des résidus urbains

Partie 1 : Services écosystémiques et Technosol productif

Les services écosystémiques rendus par les toitures végétalisées, sont aujourd'hui la raison principale de leurs développements. Dans le cas des toitures végétalisées productives, ces services ont encore peu, voire pas, été analysés et quantifiés à partir d'études de cas (voir Chapitre I : partie 1 - **Tableau 4**). Or cette quantification est indispensable à leurs compréhensions en vue d'une optimisation des services pouvant être délivrés.

Parmi les composantes d'une toiture, le Technosol est celui qui va directement ou indirectement influencer les services rendus. C'est pourquoi, la conception de Technosol dans une optique de production alimentaire, nécessite de connaître les services rendus par ces dernières en lien avec la composition de leurs sols.

Compte-tenu de ces problématiques, nous allons nous attacher à répondre aux questions suivantes :

- Quels sont les services et di-services écosystémiques rendus par un Technosol productif constitué uniquement de résidus urbains ? Quel compromis peuvent être envisagés entre services ?
- Quel est le niveau de service rendu par rapport à une toiture végétalisée non productive ?

“Rooftop farming on urban waste provide many ecosystem services”

Baptiste J.-P. Grard^{*1,2}, Claire Chenu¹, Nastaran Manouchehri³, Sabine Houot¹, Nathalie Frascaria-Lacoste², Christine Aubry⁴

(1) AgroParisTech, UMR Ecosys INRA-AgroParisTech, Université Paris-Saclay, 78850 Thiverval-Grignon, France

(2) Laboratoire Ecologie Systématique Evolution, AgroParisTech, CNRS, Université Paris Sud, Université Paris Saclay, 91400 Orsay, France

(3) UMR GENIAL, AgroParisTech, France

(4) INRA, UMR 1048 SADAPT, 75231 Paris, France

* Corresponding author. E-mail: claire.chenu@inra.fr

Statut de l'article: accepté et publié¹⁸ dans le journal *Agronomy for sustainable development*¹⁹.

Abstract

Urban farming, especially on rooftops, is a popular and growing topic in both the media and the scientific literature, providing a genuine opportunity to meet some of the challenges linked to urban development worldwide. However, relatively little attention has been paid to date to the growing medium of green roofs, i.e., Technosols. A better understanding of the influence of Technosols and the link with ecosystem services is required in order to maximize the environmental benefits of urban rooftop farming. Between March 2013 and March 2015, a pilot project called T4P (Parisian Productive rooftopP, Pilot Experiment) was conducted on the rooftop of AgroParisTech University. Urban organic waste was used, and results were compared with those obtained using a commercial potting soil, based on yield and trace metal concentrations, substrate characterization, and the amount of leaching. An assessment of the ecosystem services expected from the Technosols was undertaken in terms of the output of food (food production and quality), regulation of water runoff (quantity and quality), and the recycling of organic waste. Indicators of these ecosystem services (e.g., yield, annual loss of mass of mineral nitrogen) were identified, measured and compared with reference cases (asphalt roof, green roof, and cropland). Measured yields were almost equivalent to those obtained from horticultural sources in the same area, and the Technosols also retained 73.9 – 83.9% of the incoming water (rainfall or irrigation). This is the first quantitative analysis of ecosystem services delivered by urban garden rooftops developed on organic wastes, and demonstrates their multifunctional character, as well as allowing the identification of trade-offs. An ecosystem services approach is proposed for the design of soil-based green infrastructure of this kind, and more generally for the design of sustainable urban agriculture.

¹⁸ <https://link.springer.com/article/10.1007/s13593-017-0474-2>

¹⁹ <http://www.springer.com/life+sciences/agriculture/journal/13593>

Keywords: urban farming, ecosystem services, Technosol, urban waste, green roof, urban garden, productive rooftop, green infrastructure.

Introduction

The last decade has seen an increasing level of interest in urban agriculture (Specht et al. 2013). Urban agriculture can be defined as “an industry located within or on the fringe of a town, a city or a metropolis, which grows or raises, processes and distributes a diversity of food and non-food products, (re-)using largely human and material resources, products and services found in and around that urban area, and in turn supplying human and material resources, products and services largely to that urban area” (Mougeot 2000). Urban agriculture is often considered as an opportunity to improve nutrition and food security in urban areas as well as to provide social value and environmental benefits (Lin et al. 2015). It is also a response to increasing demands from urban dwellers for local produce. Among the many forms of urban agriculture, productive rooftops based on substrate have emerged as an efficient solution given the lack of space in many cities (Orsini et al. 2014). This form is also known as “building-integrated non-conditioned urban agriculture” (Goldstein et al. 2016) to distinguish it from building-integrated conditioned farms such as hydroponic farms under greenhouses.

- **Urban agriculture as green infrastructure**

Substrate-based productive rooftops are a type of green infrastructure. According to Gomez and Barton (2013), the term “green infrastructure” “captures the role that water and vegetation in or near the built environment play in delivering ecosystem services at different spatial scales (building, street, neighborhood, region).” An increasing body of literature demonstrates that green infrastructure can offset some of the negative impacts of urban areas. Among green infrastructure, green roofs have been developing rapidly; in consequence they are increasingly being studied for their many benefits (Berardi et al. 2014). They offer great potential in that roofs in cities in particular represent large and undervalued surface areas. Indeed, roof areas can represent up to 32% of the horizontal surface of built-up areas (Oberndorfer et al. 2007). Several authors have examined the environmental benefits provided by green roofs, with the majority focusing on extensive vegetated roofs planted with short, drought-resistant species (see the review by Cook-Patton and Bauerle 2012). However, because most of these studies focus on one particular benefit at a time, a comprehensive assessment is still needed to identify all the benefits and drawbacks in a comprehensive way.

- **Ecosystem services as a framework analysis**

The required broad-based assessment of green infrastructure can be provided by an ecosystem services framework, as previously demonstrated in urban ecosystems (Gómez-Baggethun and Barton 2013). Ecosystem services are the benefits that human societies derive from ecosystem functioning (Millennium

Ecosystem Assessment 2005). Most of the ecosystem services provided by cities result from the presence of green infrastructure (Gómez-Baggethun and Barton 2013). Vegetated rooftop ecosystems could provide services such as water-flow regulation and runoff mitigation, urban temperature regulation, air purification, waste assimilation and recycling, regulation of the global climate, pollination, mitigation against the loss of natural biodiversity, aesthetic satisfaction, access to recreation, and even, in the case of productive rooftops, the provision of food (Cook-Patton and Bauerle 2012; Gómez-Baggethun and Barton 2013). To date, the potential of green roofs for water retention (Czemiel Berndtsson 2010), the reduction of air pollution (Yang et al. 2008), noise abatement, carbon sequestration, and thermal regulation (Li and Babcock 2014) have been examined extensively for rooftops, but the concept of ecosystem services is still barely used in the case of vegetated rooftops, as discussed by Luederitz et al. (2015).

To our knowledge, quantitative assessment of the ecosystem services provided by productive rooftops has not yet been undertaken, although they are designed to grow vegetables, they differ from vegetated rooftops in several ways. First, to grow plants on substrates, soils are created *de novo* on these roofs from a variety of materials such as topsoil and/or organic waste (Oberndorfer et al. 2007); these are known as constructed Technosols (Rossiter 2007). Second, the constraints differ from those that affect non-productive rooftops (Eksi et al. 2015). Because food production is the primary objective, an adequate provision of nutrients is required, together with the appropriate water-retaining capacity and related physical characteristics. Nutrients can be provided either by mineral fertilizers, which can lead to nutrient loss (Rowe 2011), or by a substrate rich in organic matter such as compost (Grard et al. 2015). A few authors have investigated the potential of extensive green rooftops for crop production (Whittinghill et al. 2013) or the potential of rooftops for food production, i.e., the production potential of growing systems using substrate made of potting soil amended with compost and fertilizer (Orsini et al. 2014) or using compost mixed with sand (Eksi et al. 2015). Sanyé-Mengual et al. (2015) showed that the environmental impact and economic cost were lower for soil-based production on rooftops than in a rooftop greenhouse. However, no studies have yet been devoted to soil as a critical component in the functioning and environmental impacts of productive vegetated rooftops.

- **Productive rooftops and Technosols**

Despite the fact that soils contribute substantially to urban ecosystem services via several functions, they are generally overlooked (Morel et al. 2014). Compared to classical Technosols at ground level (either constructed or resulting from deposits), constructed Technosols on productive rooftops have to meet specific technical requirements (e.g., related to the load capacity of the roof) in addition to the expected function of supporting plant growth. The use of local materials such as urban organic waste in these soils offers multiple advantages: (1) it avoids the consumption of non-renewable resources such as peat or the transport of rural soils to cities; (2) it avoids the costs incurred and the harmful greenhouse

gases generated by the transport and treatment of organic waste; (3) benefit is gained from the nutrients contained in organic waste thereby reducing the consumption of mineral fertilizers; and (4) the materials can be lightweight. Potential disadvantages include substrate shrinkage, nutrient loss through storm water runoff, and carbon dioxide emissions through substrate respiration. Consideration of these constraints highlights the need for research into Technosol design for productive rooftops and the optimization of ecosystem services.

- **Ecosystem services evaluation**

While the quantification of ecosystem services is a necessary step in ensuring their proper consideration in management decision-making, current debates reflect the absence of any consensus regarding the methods of biophysical evaluation to be used for ecosystem services (see the review by Boerema et al. 2016). Referring to the ecosystem services cascade defined by Haines-young and Potschin (2010) in which ecosystem properties (biophysical properties or stocks) produce ecosystem functions (flows) that provide ecosystem services and these in turn benefit humans and may be ascribed an economic value, Boerema et al. (2016) recommend that flows or benefits rather than stocks alone be measured in any biophysical evaluation. Ecosystem services are usually evaluated using indicators as proxy measures, and many indicators have been proposed and discussed (e.g., Kandziora et al. 2013). While several authors express indicators as absolute values, others define the provision of ecosystem services in relative terms compared with a reference, which could be an optimal case (e.g., Van Wijnen et al. 2012). The selection of an appropriate reference is thus critical, and its influence on the evaluation must be considered.

From the research gaps outlined above, our aim was to evaluate the ecosystem services provided by productive open-air rooftops where the Technosols are based on recycled urban organic waste alone. We used a productive rooftop experiment (Grard et al. 2015) with a focus on constructed Technosols. Among the potential ecosystem services supplied by productive rooftops, we focused on four services: (1) food supply, (2) water-flow regulation and runoff mitigation, (3) regulation of runoff water quality, and (4) assimilation and recycling of organic waste. These services were chosen in view of their importance *per se*, as well as an expectation that the characteristics of Technosols favor these services in particular. We measured indicators of the different ecosystem services over the course of a two-year experiment, comparing the provision of ecosystem services to that used in other systems adapted to rooftop- or land-based vegetable production. To our knowledge, this is the first evaluation of multiple ecosystem services provided by productive rooftops.

I. Material and methods

I.1. Pilot rooftop experiment

The pilot experiment is located on the flat roof of a five-story building called “Bertrand Ney” at AgroParisTech University in Paris, France (48°50'24.4"N, 2°20'54.5"E ; **Figure 42**). The three main principles of the T4P experiment are that it should (Grard et al. 2015):

1. be transposable to people without specific agricultural skills and with limited economic resources, with the overarching objective of being able to “mimic” a community garden on the roof;
2. be based only on the use of local urban organic waste as a part of an urban metabolism (Barles 2009);
3. avoid the use of fertilizers and chemical pesticides in order to limit the contamination of food products and the ecosystem.



Figure 42 : Upper panel: Overview of the rooftop of AgroParisTech in March 2015. Image by David Haddad.com with permission. Lower panel left: Experimental devices in April 2013. Image by Baptiste Grard with permission. Lower panel right: Top view of an experimental plot with the drip irrigation system in April 2014. Image by Baptiste Grard, with permission.

Vegetables were grown in wooden boxes (90x90x40cm) typically used as backyard composters and separated from each other by at least 50 cm. The Technosols were surrounded by a geotextile membrane extending to the top of the box. An impermeable membrane lined the bottom of each box, allowing water to be stored beneath the Technosol in a 5 cm-deep volume filled with clay balls, which acted as a reservoir of water. An evacuation pipe at the top of the reservoir directed the overflow water to a collection tank (**Figure 43-a**).

Urban organic wastes were used as substrates to create the Technosol, which was a compost made of green waste from public parks and private gardens in the city, as well as crushed wood from the city gardens and parks, both provided by our partner *Bio Yvelines Services*. Potting soil was used as a reference. Parent materials were analysed by the soil laboratory of INRA Arras for pH_{water} (ratio soil/solution = 1/5 v/v) - NF ISO 10390, organic carbon content (dry combustion by heating at 1000°C with O_2) - NF ISO 10694 and total nitrogen (dry combustion by heating at 1000°C with O_2) - NF ISO 13878. Dry bulk density was measured according to NF EN 13041. Volumetric mass density was measured at pF1 (EN 13041) with respectively $0.8 \pm 0.2 \text{ g.cm}^{-3}$, 1.0 g.cm^{-3} and $0.3 \pm 0.02 \text{ g.cm}^{-3}$ for compost of green waste, potting soil and crushed. The main chemical characteristics of the organic waste are presented in **Figure 44**. Four trace metals (Cd, Pb, Cu and Zn) currently found in polluted urban garden soils were analysed in the parent material and in one harvest of tomatoes and lettuces during the first year. Prior to analysis, the soil samples were air dried (40°C) for at least two weeks and sieved. A Polarized Zeeman Atomic Absorption spectrophotometer model Z5000 (HITACHI) was used for ETAAS (Electro thermal Atomic Absorption Spectrometry) to determine Cd, Pb and Cu and for FAAS (Flame Atomic Absorption Spectrometry) to determine Zn. All measurements were performed on samples in triplicate.

Three different units were set up in March 2013, each with three replicates (**Figure 43-b**):

- Lasagna (L): a 15-cm layer of green waste compost covered with a 15 cm layer of crushed wood.
- Lasagna inoculated (L-I): a 15-cm layer of green waste compost covered with a 15-cm layer of crushed wood, in which we inoculated adult earthworms belonging to 3 species and 2 ecological categories: 15 *Dendrobaena Veneta* individuals (epigeic earthworm), 35 *Eisenia Fetida* (epigeic earthworm), and 10 *Lumbricus Terrestris* (epi-anecic earthworm). Inoculation densities were lower than usual practice according to Pey et al. (2014). After a year, only *Eisenia Fetida* survived with a high rate of reproduction.
- Control (C): 30 cm of potting soil.

Finally, woodchips (0-40 mm, **Figure 43-b**) were placed as a mulch on top of the Technosol to reduce evaporation (24 liters of mulch per box each growing season).

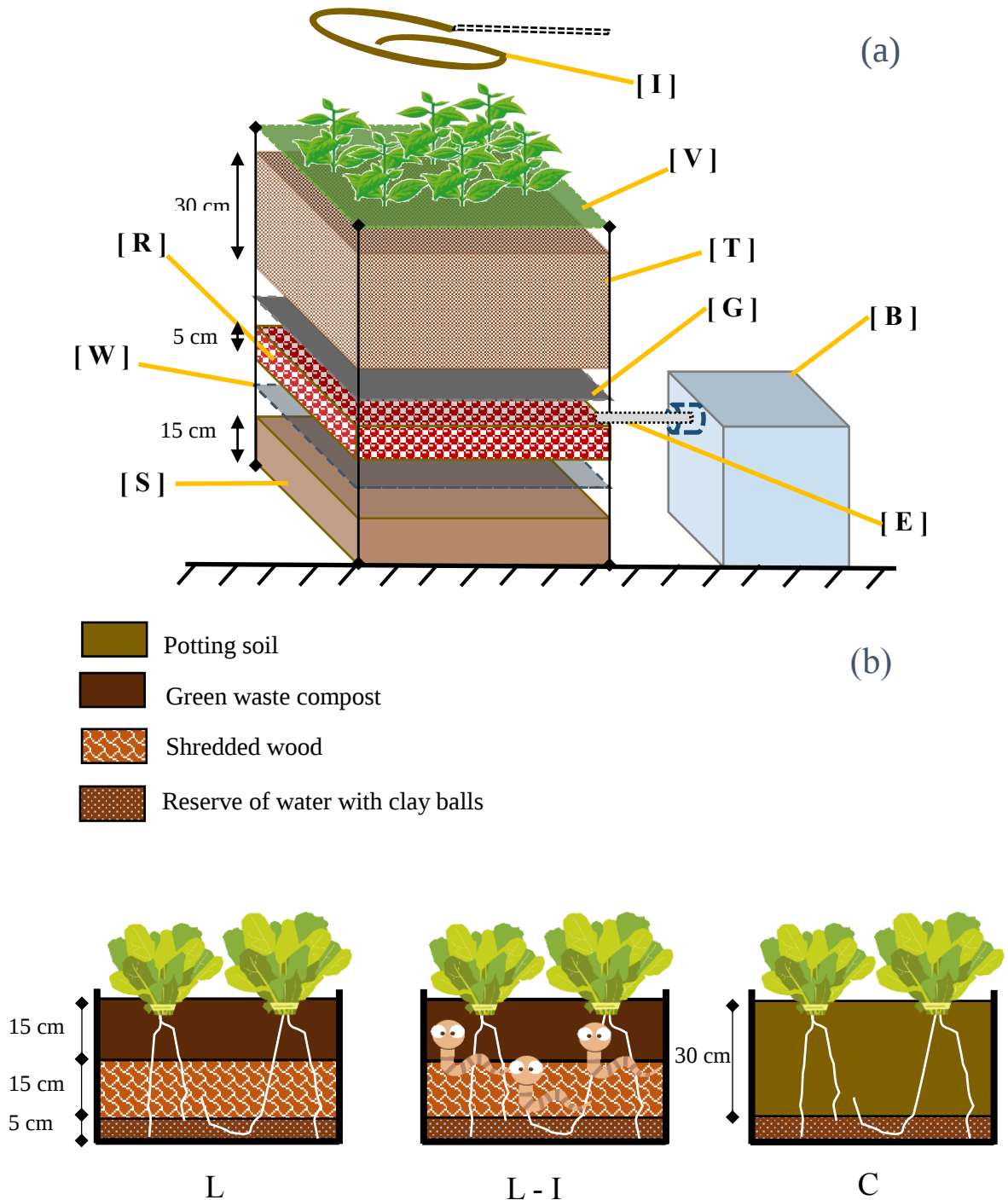


Figure 43 a & b : (a): Schematic drawing of experimental box. Legend : [B] : Bottle storage for the overflow of water, [E] : Evacuation, [G] : Geotextile, [I] : Drip irrigation system, [R] : Reserve of water with clay balls, [S] : Wooden pieces to raise the box, [T] : Technosol, [V] : Vegetation layer and [W] : waterproof membrane. (b): Description of the three treatments of the experiment.

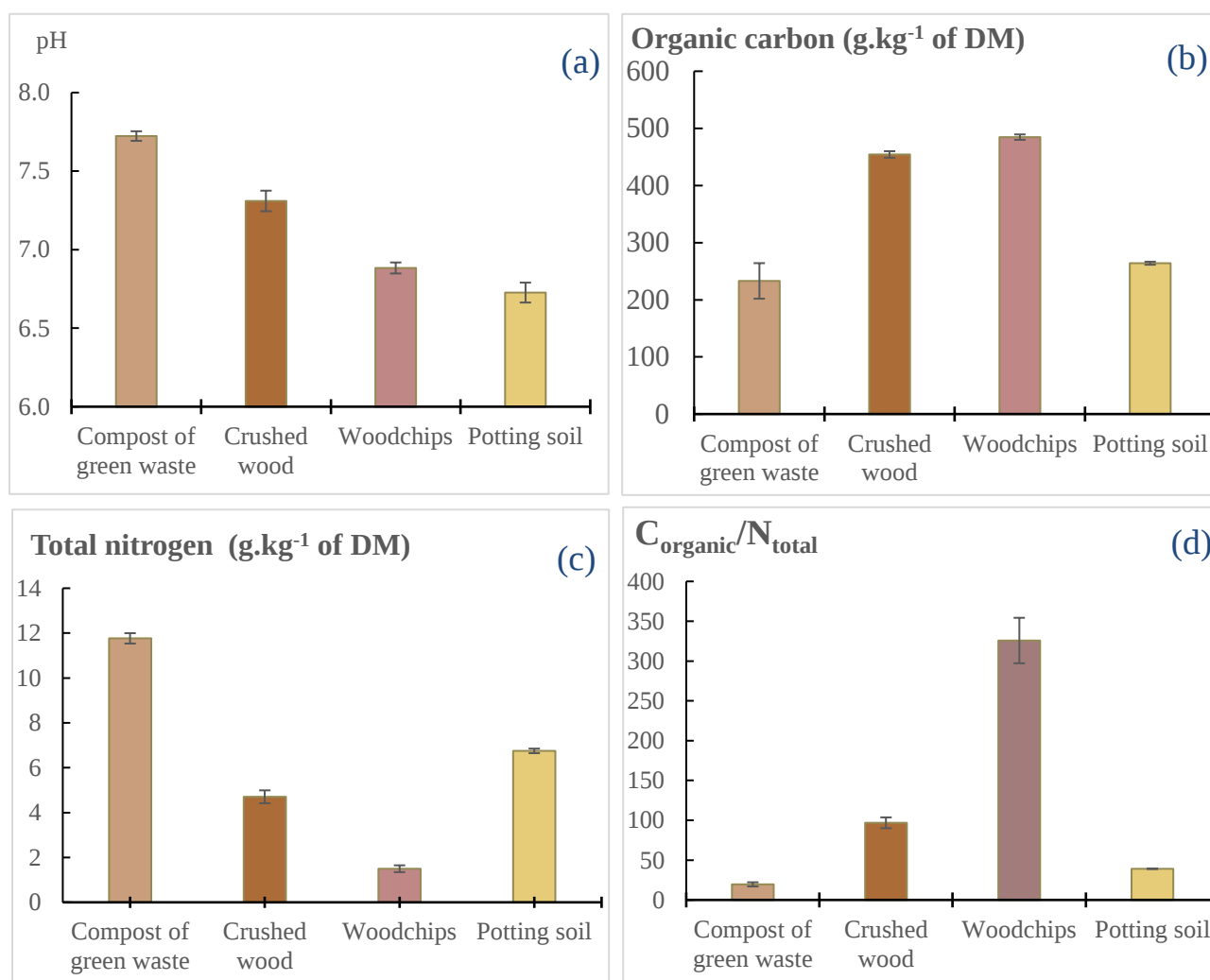


Figure 44 a, b, c & d: Characteristics of the organic waste used in the experiment. Mean and standard error based on three replicates.

The control was introduced to compare the performance of the Technosol organic waste with that of a reference frequently used in horticulture, and earthworms were inoculated with the hypothesis that they would modify the ecosystem services by accelerating the biodegradation of organic waste and creating biopores. *Eisenia Fetida* and *Dendrobaena Veneta* were selected with this in mind because they inhabit organic-rich materials and both species are commonly used in laboratory experiments. *Eisenia Fetida* is a robust earthworm species with good tolerance of a range of temperatures and humidities, which is also the case for *Dendrobaena Veneta* but to a lesser extent. *Lumbricus Terrestris* was selected because of its characteristics as an ecosystem engineer, which could affect the soil structure.

The structure of our boxes shares common elements with those used in standard green roofs (Oberndorfer et al. 2007), having a vegetation layer, a growing medium, a membrane layer (named geotextile in our case), and a waterproofing layer. However, our system also has three main differences from standard green roofs: first, we used wooden boxes in order to create accessible spaces, and to

distribute the weight on the roof and limit overloading. Second, we used a waterproof membrane to ensure the presence of a water storage volume, which additionally separated the contents of the box from the roof. Third, the proportion of compost in our experimental boxes greatly exceeded the standard proportion of organic matter recommended for non-productive green roofs. Usually, less than 20% of compost by volume is recommended due to possible negative impacts (mostly nutrient leaching), despite the potential advantages in terms of water retention capacity and biomass production (Eksi et al. 2015).

In March 2014, after a single cropping season, an important substrate shrinkage effect was observed in all cases. To compensate for this loss due to biodegradation and/or substrate compaction, we refilled the boxes to a height of 30 cm with either green waste compost (L and L-I) or potting soil (C). Hence, in March 2014, 88 liters of compost were added per box to L, 122 liters of compost to L-I, and 75 liters of potting soil to C. Between the two growing seasons, the undecomposed mulch was removed before refilling the boxes, before being subsequently returned.

During dry periods, the boxes were irrigated using a dripping-tap system with tap water. The volume used for irrigation was measured by a water meter. At the onset of the experiment in March 2013, we sampled cores from each layer. Both the sampled cores and the initial organic waste were air-dried and ground to 200µm prior to analysis at the soils laboratory of INRA Arras as described above.

The succession of cultures took place as follows:

- March to April 2013 and 2014: 5 units of lettuce (*Lactuca sativa*) per box;
- May to mid-October 2013 and 2014: 4 units of cherry tomatoes (*Lycopersicum esculentum* var. cherry) per box;
- Mid-October to March 2014 and 2015: green manure (*Trifolium incarnatum* and *Secale cereale*).

At harvest, shoots and roots were returned to the soil. Green manure was left to decompose on the surface of the soil. Notably, plant densities were quite low compared to those achieved by professional producers in the Ile-de-France region [personal communication with a farmer].

I.2. Meteorological data

Temperature, wind speed, solar radiation, and rainfall were recorded at the nearby meteorological station of the “Meteo France” network. This station is situated at Montsouris Park in Paris (48°49’18” North and 2°20’16” East), approximately 2.5km from the experimental roof.

Weather patterns were similar between the two growing seasons in terms of average temperature and solar radiation. However, annual precipitation differed greatly between the 2013-14 and 2014-15 growing seasons, at 584 mm and 687 mm, respectively. The distribution of rainfall also differed, with higher amounts recorded in April, June, July, August, and December in 2014-15, and less in May and September.

I.3. Ecosystem services evaluation

To achieve our aim of a full biophysical evaluation, we first identified the ecosystem services that might be expected from productive rooftops. We selected a subset of ecosystem services for which the characteristics of Technosols would be determinant, and which could be quantified using our experimental devices. We then identified the processes or functions generating the particular service, before selecting a corresponding indicator based on the literature. Finally, we chose a reference case to be compared with the rooftop for each service (see below).

The analytical framework is presented in **Tableau 11**. The choice of indicators, methods, and references for each ecosystem service is detailed below. All results are expressed per square meter of experimental unit. Because the experimental boxes occupied less than 1 m² of the surface area (0.81 m²), for all the variables we assumed a linear relationship between our boxes and a similar box with a surface area of 1 m².

I.3.a. Indicator for food supply (quantity and quality)

Each element of edible biomass was harvested and weighed to measure the yield. Prior to analysis, the harvests were dried to 60°C for at least two weeks. Results for trace metal elements in lettuces and tomatoes (**Tableau 12**) refer to fresh weight, with lettuce having 3% dry matter and tomatoes 8%. Methods to quantify trace metal elements in vegetables were the same as those for soil samples.

I.3.b. Indicator for water leaching (quantity and quality)

Throughout the two years of the experiment, water was collected four days at most after it had leached from the reservoir to the collecting bottle (Fig. 2). The volume of leachate was measured and a sample of 50 ml was collected and stored at -24°C prior to analysis. The amount of rainfall was determined using data from a rain gauge located near the roof (see Section 2.2). We calculated the proportion of influx water retained per box and per year as follows:

$$\text{runoff abatement} = 1 - \frac{[\text{Average water leached per box (mm)}]}{[\text{Average rain per box (mm)}]}$$

Equation - Runoff abatement.

In our case, the plants were also watered, but we did not take into account the amount of irrigation water to calculate the runoff abatement, because the ecosystem service of interest is the retention of rainfall. It should be noted that all units received the same amount of irrigation water.

Concentrations of dissolved organic and inorganic carbon were determined using an elemental approach. N-NH_4^+ and N-NO_3^- were analysed by colorimetry on a continuous flow (Skalar Analytical, Breda, the Netherlands). DOC was measured with a total organic carbon analyser (Shimadzu TOC-5000/5000A and TOC 5050/5050A) using catalytically aided combustion oxidation for TC and a pre-acidification for IC. Our samples were filtered at 70 μm which implies that the dissolved organic and inorganic carbon analyzed correspond to particulate, colloids and dissolved matter. We then calculated the average annual concentration of dissolved organic and inorganic carbon, NO_3 , and NH_4 in the water as follows:

$$[\text{Y}] = \frac{x_1 * V_{x1} + x_2 * V_{x2} + x_3 * V_{x3} \dots}{V_{\text{total}}}$$

Equation - Average annual concentration.

where x_i is the concentration in the overflow during event i in mg l^{-1} , V_i is the volume of water leachate during this event in liters, V_{total} is the sum of volumes from all leaching events in liters, and $[\text{Y}]$ is the weighted average concentration of element Y per year in mg.l^{-1} .

1.3.c. Urban waste regulation

We calculated the consumption of organic waste over the two years of the study, i.e., the volume initially placed in the units plus the volume used to refill the boxes at the beginning of the second year (see above). At the beginning of the second cropping season, The Technosol heights were measured by making 12 replicate measurements every 10 cm along one 110 cm diagonal of each box using a wooden stick.

1.3.d. Ecosystem service references and expression

One possible approach when evaluating ecosystem services is to compare the value of the indicator to a reference, be it another ecosystem or another management approach to the same one (e.g., Van Vijnen 2011). Because our objective was to evaluate the provision of ecosystem services using a new management option (productive rooftops with Technosols made of organic waste), we chose three types of reference: two standard rooftop management references involving asphalt and non-productive green roofs, and one standard production system, i.e., vegetable production on farmland. We searched the literature for available data on the selected indicators for these reference cases.

To express the value of the ecosystem services, we used the indicator value per square meter of productive unit, which neglects in the first instance the contribution of the bare rooftop bands between or around the productive units (**Tableau 11**).

I.4. Statistical analysis

Statistical analyses were performed using R software (R-3.1.1). The three treatments with three replicates for each case were compared using an analysis of variance after ensuring the normality of the data using a Shapiro test. A multiple comparison of means was determined by the post-hoc Tukey test. Where the normality of the data was not respected, a Kruskal Wallis test was applied followed by a post-hoc Nemenyi test. A significance level of $p\text{-value} < 0.05$ was used for each test.

Ecosystem services		Indicator		Processes	References
Provisioning services	Food supply	Food quantity	Production of food (kg fresh weight.m ⁻² .year ⁻¹)	Primary production, anchoring and good physical conditions for roots, provision of water and nutrients, beneficial organisms, pest control	Productive rooftop or cropland
		Food quality	Concentration of trace metal element (mg.kg ⁻¹ of fresh matter)	Vegetables absorption, atmospheric desposition or water contamination	Quality standards
Regulating services	Water flow regulation	Quantity	% of rain water catch	Water infiltration, evapotranspiration, retention and drainage	Bare/Asphalt roof and/or Green roof
		Quality	Weigthed average concentration of [TOC], [TIC], [NO ₃ ⁻] and [NH ₄ ⁺].	Retention of elements and molecules, leaching, biodegradation	Bare/Asphalt roof and/or Green roof and quality standards
	Urban waste regulation	Storage and recycling	Waste used (kg.m ⁻² .year ⁻¹)	Biodegradation and substrate shrinkage	Bare/Asphalt roof and/or Green roof
	Carbon storage	Storage	C (kg.m ⁻²)	Biodegradation	Bare/Asphalt roof and/or Green roof

Tableau 11 : Evaluated ecosystem services and their indicators.

II. Results and discussion

			Food supply					Urban waste valorization			
(a)	T.	Vegetable	Food production (kg.m ⁻² .year ⁻¹)	Food quality				Compost + Potting soil (L.m ⁻² .2y ⁻¹)	Crushed wood (L.m ⁻² .2y ⁻¹)	Utilized waste	
				Pb (mg.kg ⁻¹)	Cd (mg.kg ⁻¹)	Cu (mg.kg ⁻¹)	Zn (mg.kg ⁻¹)			(kg.m ⁻² .2y ⁻¹)	(kgOC.m ⁻² .2y ⁻¹)
1	C	Total	4,5 ± 0,4					392	-	204	53
		Lettuce	1,2 ± 1	0,035 ± 0,005	0,006 ± 0	0,37 ± 0,07	4,15 ± 0,02				
		Tomatoes	2,9 ± 2,1	0,018 ± 0,002	0,003 ± 0	1,07 ± 0,02	4,29 ± 0				
	L	Total	4,4 ± 0,9					259	150	105	30
		Lettuce	1,5 ± 0,4	0,027 ± 0,002	0,005 ± 0	0,25 ± 0,01	2,79 ± 0,05				
		Tomatoes	2,1 ± 0,4	0,026 ± 0,002	0,0015 ± 0	1,15 ± 0,07	3,39 ± 0,07				
	L-I	Total	6,1 ± 0,2					301	150	117	33
		Lettuce	2,8 ± 1,9	0,02 ± 0	0,004 ± 0	0,21 ± 0,01	2,47 ± 0,02				
		Tomatoes	2,8 ± 0,9	0,01 ± 0	0,0014 ± 0	1,07 ± 0,02	3,38 ± 0,05				
	-		6,1 ^a					-	-	-	-
	-		18,9 ^c					-	-	-	-
2	-		10-14 ^g					-	-	30 ^f	7
5	-		-					-	-	-	8 ⁱ
5	-		-					-	-	-	3 - 10 ^j

			Water flow regulation								
(b)			Rainfall retention rate	Leached NO ₃ ⁻	Leached NH ₄ ⁺	Nmin balance in 2 years	TOC	TIC	TC balance in 2 years		
Type	Treatment	Vegetable	(%)	(mg.L ⁻¹)	(kg.ha ⁻¹ .2y ⁻¹)	(mg.L ⁻¹)	(kg.ha ⁻¹ .2y ⁻¹)	(g.m ⁻²)	(mg.L ⁻¹)	(mg.L ⁻¹)	(kg.ha ⁻¹)
1	C	Total	84 ± 16	183 ± 89	345 ± 176	0,6 ± 0,2	1,3 ± 0,2	7	210 ± 47	9 ± 2	465 ± 154
	L	Total	74 ± 7	9 ± 3	31 ± 7	0,4 ± 0	1,5 ± 0,1	-18	313 ± 44	21 ± 5	1131 ± 82
	L-I	Total	81 ± 8	7 ± 2	17 ± 4	0,6 ± 0,1	1,5 ± 0	-19	431 ± 55	15 ± 1	1154 ± 227
	-		-	5 ^b	33 ^b	0,1 ^b	0,4 ^b		-	-	-
2	-		-	0 - 75 ^b	0 - 57 ^b	0 - 81 ^b	0 - 16 ^b		-	-	-
3	-		4 ^e	5 ± 3, ^e	-	2,6 ± 1,4 ^e	-		16 ± 15 ^e	-	-
4	-		77 ^e	54 ± 36 ^e	-	1,3 ± 0,6 ^e	-		60 ± 50 ^e	-	-
4 & 5	-		65 - 85 ^d	1 ^d	-	0,2 ^d	-		-	-	-
	-		65 – 85 ^b	0 - 70 ^b	0 - 188 ^b	0 - 0,1 ^b	0 - 34 ^b		-	-	-
5	-		27 - 81 ^d	0,3 ^d	-	0,1 ^d	-		-	-	-
5	-		13 ^h	18 ^h	-	-	-		79 ^h	13 ^h	-

Tableau 12 (a and b): Values for the different ecosystem services derived from the literature and the T4P experiment. Studies: (1) Technosol productive roof tops, this study and published studies (a, b, c); (2) Cropland, average worldwide values ; (3) Asphalt roof ; (4) Non productive intensive rooftop ; (5) Non productive extensive rooftop. The T4P values are expressed as averages over the two years of the study. Results for food supply (food production and food quality) are detailed by production and in total (lettuce, tomato and green manure). Cu = Copper ; Zn = Zinc, Cd = Cadmium, Pb = Lead and T. = Traitement. Sources: ^a(Samangooei et al. 2016), ^b(Whittinghill et al., 2016), ^c(Orsini et al. 2014), ^d(Czemiel Berndtsson 2010), ^e(Zhang et al. 2015), ^f(References from professional producer), ^g(ITAB 2017), ^h(Beck et al. 2011), ⁱ(Getter et al. 2009). Dry bulk density used: Green waste compost = 0.3 g.cm⁻³; Potting soil = 0.52 g.cm⁻³; Crushed wood = 0.18 g.cm⁻³. TOC = Total Organic Carbon, TIC = Total inorganic Carbon and TC = Total Carbon.

II.1. Food supply

II.1.a. Food production

Yields ranged from 4.4 to 6.1 kg.m⁻² (**Tableau 12**), with no significant differences observed among treatments. Statistical differences only emerged when considering cropped species separately (**Tableau 12** – detailed for tomatoes and lettuce). Indeed, a positive effect of earthworms (L-I) was observed for tomatoes and lettuces ($p < 0.02$), while the control produced a lower yield of lettuces than L-I ($p < 0.0007$). Conversely, L produced fewer tomatoes than L-I or C ($p < 0.001$).

Surprisingly, we obtained much lower yields per square meter than those previously observed in a similar cropping system (Grard et al. 2015). One possible explanation was an attack of fungi (mostly mildew) on tomatoes during our second growing season. We chose to use only biological pest control methods as required in organic farming, and mostly we used preventive measures such as the application of horsetail manure, but these were not very efficient. Therefore, the fungi lasted as long as the tomato plants, thus weakening them. Nevertheless, yields for L and L-I units were equivalent to those observed in private vegetable gardens in the Paris area (Pourias 2013) and other productive rooftops (Samangooei et al. 2016), but lower than those observed in a comparable rooftop system where compost was used together with mineral fertilizers under a different climate (Orsini et al. 2014; **Tableau 12**). The present Technosols had *a priori* favorable characteristics for vegetable growth with a slightly acidic to slightly basic pH (**Figure 44**) and low dry bulk densities (0.2 ± 0.1 g.cm⁻³, 0.5 g.cm⁻³, 0.17 ± 0.03 g.cm⁻³ for green waste compost, potting soil and crushed wood).

II.1.b. Food quality

Concerns about contamination by trace metals of edible crops from urban agriculture have previously been raised because of their exposure to contaminants through different pathways of contamination (soil, air and water; Säumel et al. 2012). A few authors have pointed to (i) the impact of highway or industrial runoff concerning the deposition of heavy metals (Vittori Antisari et al. 2015), (ii) the fact that many urban soils are polluted with respect to soil/plant transfer (Säumel et al. 2012), and the possible advantages of growing food on an urban rooftop because some pollutants show a reduction in concentration with height (Tong et al. 2016). In our case, Pb and Cd concentrations in lettuce and tomatoes were below European limits (EU 2009), while there is no EU threshold for Zn and Cu (**Tableau 12**). These results confirm our previous findings (Grard et al. 2015). Lettuce exhibited higher trace metal concentrations than tomatoes for all elements except copper (Table 2) ($p < 0.05$) in accordance with other studies (Murray et al. 2009). The soil type (reflecting the treatment used in our case) also affected the trace metal concentration (**Tableau 12**) depending on the type of crop and the trace metal element ($p < 0.05$). Vegetables grown on potting soil showed higher concentrations of trace elements (all trace

metal elements for lettuce, copper and zinc for tomatoes) despite a lower concentration (see below) in the substrate, but more favorable soil parameters for transfer such as a lower pH (Fig. 3). The higher concentrations for L than L-I appear significant ($p < 0.05$) for all elements except copper in lettuce. As for the Technosols, the compost of green waste contained $40.13 \pm 1.33 \text{ mg.kg}^{-1}$ Cu, $0.47 \pm 0.07 \text{ mg.kg}^{-1}$ Cd, $51.60 \pm 5.57 \text{ mg.kg}^{-1}$ Pb and $179.33 \pm 6.66 \text{ mg.kg}^{-1}$ Zn. The potting soil contained $13.77 \pm 3.81 \text{ mg.kg}^{-1}$ Cu, $0.16 \pm 0.03 \text{ mg.kg}^{-1}$ Cd, $16.07 \pm 0.15 \text{ mg.kg}^{-1}$ Pb and $66.33 \pm 1.05 \text{ mg.kg}^{-1}$ Zn. The crushed wood contained $7.2 \pm 1.5 \text{ mg.kg}^{-1}$ Cu, $0.1 \pm 0 \text{ mg.kg}^{-1}$ Cd, $7.4 \pm 1.9 \text{ mg.kg}^{-1}$ Pb and $32.3 \pm 5.1 \text{ mg.kg}^{-1}$ Zn. All these values were well below the existing French norms for a growing medium (NF U 44-551), which may explain the relatively low trace element contents of the vegetables. Trace element concentrations may have two origins: aerial deposition and transfer from the Technosol. The vegetables were washed with water, the rooftop is on a 5-storey building, and no major highway is located within 1 km of the site, which limits aerial deposition (Tong et al. 2016; Antisari et al., 2015). However, other pollutants, such as PAH, should also be investigated.

II.2. Mitigation of runoff water

Most of the rainfall was retained by the cropping units (**Tableau 12**). C, L, and L-I exhibited rainfall retention rates of 84%, 74%, and 81%, respectively. The only significant differences were between C and L, with the former having the higher retention capacity ($p < 0.0002$). Retention is associated with several processes, including the absorption of water by plants, evapotranspiration, and retention by the Technosols. Both compost and potting soil are likely to exhibit a high water retention capacity.

In fact, the mitigation of runoff by the Technosols in our case is even higher than reported because we did not account for the irrigation water (which would result in retention rates of 90% for C, 84% for L, and 88% for L-I per unit of surface area). If retention rates are expressed not at the scale of the production unit but at the scale of the rooftop, i.e., accounting for the paved alleys between production units as 20% of the roof surface, the retention rates then lie between 59 and 67%.

Many authors have investigated the mitigation of runoff by green roofs (**Tableau 12**), indicating a high variability among green roof systems. Extensive green roofs retain between 27% and 81% of rainfall while intensive rooftops retain between 65 % and 85% (Czemiel Berndtsson 2010). This variability reflects the diversity of existing systems as well as the influence of a number of variables including climate, slope, type of Technosol, and age.

II.3. Water quality

II.3.a. Mineral nitrogen loss

The three Technosol units leached between 16.7 and 345.3 kg.ha⁻¹ of mineral nitrogen over the two years (**Tableau 12**). Most mineral nitrogen losses occurred in the first month of the experiment: 97% of total losses for C, 77% for L, and 57% for L-I. Mineral nitrogen losses were overwhelmingly in the form of nitrate (e.g., 90% by mass for L-I). The control units leached the most nitrates in terms of the weighted average concentrations (183.2 mg.l⁻¹) and leached mass, the latter being 16 times higher in C than in the L and L-I compost units. The L unit leached significantly more nitrate than L-I, suggesting the positive effect of earthworm inoculation. In terms of European standards for nitrate concentrations in potable water [< 50 mg.l⁻¹], L, L-I, and C exceeded this value in 3, 1, and 4 leaching events, respectively, out of a total of 40, 34, and 39 leaching events over the two years of the study. This nitrogen loss is ascribed to the biodegradation of the compost and potting soil, given that the initial concentrations of nitrate in the compost and potting soil are insignificant.

The L and L-I experimental units exhibited an equivalent or slightly higher loss of nitrate and ammonium per year by mass compared with cropland, non-productive, and productive rooftops (**Tableau 12**) (Whittinghill et al. 2016; Zhang et al. 2015). In the L and L-I units, the amount of nitrate leaching and average nitrate concentrations were similar to those found in the only productive farm investigated to date (Brooklyn Grange) despite the very different contents of organic matter: more than 50% in our experiment compared with 10% at Brooklyn Grange (Whittinghill et al. 2016). The higher losses of nitrate in the latter case could be due to (i) the use of mineral fertilizers, (ii) the climate, and (iii) the vegetation cover (type and intensity).

II.3.b. Carbon loss

Unlike nitrate leaching, we observed a constant loss of carbon over time, mostly in the form of dissolved organic carbon (more than 92% of the loss for all units), with the remainder being small particles of organic matter. Major differences were observed among units, with the order of the average concentration of dissolved organic carbon being C < L < L-I (**Tableau 12**). We assumed that the losses of dissolved organic carbon were due to the initial concentrations of dissolved organic carbon in the compost and potting soil and a rapid biodegradation of the compost, especially in the presence of earthworms (L-I).

Our constructed Technosols exhibited greater carbon losses through leaching than those described in the few references available in the literature on green roofs (Czemieli Berndtsson 2010; Whittinghill et al. 2016; Zhang et al., 2015) (**Tableau 12**). Our productive green roof with a rich organic-based substrate

thus degraded the quality of the runoff water significantly more than extensive green roof systems (Beck et al. 2011).

II.4. Waste valuation and carbon storage

The amount of waste valorized depends on the initial quantity of substrate used to construct the Technosols and the amount used to refill them after one and two years of cropping. The contrasting bulk densities of the materials (compost, crushed wood, and potting soil) and their rapid rearrangement after setting the units explained the differences in the volume used to set the systems per square meter. After one growing season, the L-I units showed the largest shrinkage, i.e., 50% reduction in the height of the Technosols compared to 36% for L and 31% for C. After the second growing season, this proportion reduced to 30% for L-I, 33% for L, and 14% for C, which was significantly less than in the first year ($p < 0.016$). Over the two years, a higher proportion of substrate shrinkage was observed for L and L-I ($p < 7.2 \cdot 10^{-8}$; data not shown) and a larger amount of organic waste was then used to refill the unit (**Tableau 12**). The measured shrinkage could be due to two processes: particle rearrangement with a subsequent compaction of material as observed in the first weeks after setting the units, and biodegradation of the organic materials. Treatment with earthworms (L-I) resulted in the most shrinkage during the first year ($p < 0.00014$), suggesting the possible impact of earthworms on both processes, as described for natural soils.

High levels of Technosol shrinkage, as observed here, are often considered as a sign of unsuitable growing substrate. However, in our case, the yields suggest that the physical conditions remained favorable for root growth in line with the low bulk densities. Furthermore, both the biodegradation of organic materials and the refilling of the units after one year provided nutrients to the plants.

To our knowledge, this service has not been evaluated for other productive green roofs, and our system valorizes urban wastes much more highly than extensive rooftops (**Tableau 12**). Because green roof Technosols are carbon-rich materials, they can be seen as a means of storing carbon. The constructed Technosols exhibited high inputs and potential stocks of organic carbon compared to standard extensive green roofs (**Tableau 12**). However, in order to assess the role of Technosols in storing organic carbon as a means of mitigating CO₂ emissions, there is a need to know the residence time of the carbon and compare it to those of alternative fates of compost, potting soil, and wood waste (e.g., combustion, application to cropland) in order to estimate the carbon balance of such green infrastructures. In other cases, it has been shown that carbon emissions linked to green roof implementation (e.g., fuel consumption) could be compensated by carbon storage and sequestration in less than nine years (Getter et al. 2009).

II.5. Provision of ecosystem services by productive rooftops

A sustainable and productive green roof should produce high-quality fresh vegetables for several years, avoid the use of non-renewable resources such as top soil and peat, provide an opportunity for recycling of urban organic waste, and deliver other ecosystem services such as reducing runoff from roofs without altering the water quality. Because so few vegetable production systems have been designed to date using only urban organic waste or recycled materials as observed by Molineux et al. (2009), the valuation of the ecosystem services of such cropping systems is useful.

The ecosystem services considered herein are provided by two components of the production units, notably the Technosols and the plants, which for example influence runoff quantity and quality through the absorption of water and nutrients, and evapotranspiration. We focus on Technosols because they have received less attention to date. We found that a compost-based Technosol provides quite similar or even improved ecosystem services compared to potting soil. Indeed, yields began to decrease in the second year for the potting soil, presumably because of nutrient exhaustion as confirmed by the very small quantity of mineral nitrogen leaching from these Technosols in the second year. Compost-based Technosols were, however, less favorable in terms of carbon leaching. Productive units with potting soil appeared less sustainable than compost-based ones, because of the addition of synthetic fertilizers to the peat during the manufacture of the potting soil, and the high environmental impact associated with peat extraction. Earthworm inoculation barely influenced the evolution and ecosystem services of the Technosols, apart from lower levels of substrate shrinkage and nitrate leaching.

We demonstrate that compost-based Technosols generate “new” ecosystem services (food production and an increase in the value of waste) compared to “standard” extensive green roofs, while ensuring important runoff mitigation. However, they also generate ecosystem disservices, with the leaching of nitrates and soluble carbon, which decreases the runoff water quality. As for green roofs in general, one of the main research questions about productive rooftops relates to an understanding of whether they are a sink or a source of chemical substances. Berndtsson et al. (2009) show that both intensive and extensive green roofs can act as a nitrogen sinks (despite the nitrogen dynamics in the substrate). We demonstrate here that a productive rooftop based on organic waste acted as a sink of mineral nitrogen (i.e., output of mineral nitrogen < input of mineral nitrogen, see **Tableau 12**), whereas it acted as a source of dissolved carbon. A crucial aspect in the conception of organic waste-based Technosols for food production is then the identification of the best trade-off between the expected mineralization of the organic waste to provide nutrients to plants and a limited mineralization to restrict the leaching of nitrogen, carbon or other elements.

To develop sustainable productive rooftops with a broader range of ecosystem services than those provided by standard green roofs, there is a future research need to investigate the possible trade-offs in

Technosol compositions with regard to the provision of ecosystem services over time, especially Technosol evolution. Possible deterioration in water quality should be studied regarding the specific Technosol composition requirement for productive roofs (i.e., a high proportion of organic matter). Finally, the use of biowaste compost produced by local compost units should be investigated.

A number of other potential ecosystem services were not investigated, namely biodiversity support, the regulation of pollination, climate regulation, and cultural services. As urban agriculture continues to be an increasing trend in many cities around the world, other ecosystem services need to be evaluated in order to allow a more comprehensive assessment to be made.

Conclusions

We have presented the first quantitative assessment of ecosystem services provided by productive rooftops. We find that making rooftops productive using organic waste has the potential to generate many urban ecosystem services, though with some potential disservices: the result is high levels of food provision with acceptable food quality in terms of contaminants, important runoff mitigation, and a local organic waste, but with a negative effect on runoff water quality in terms of carbon. We also showed that the challenge for researchers on the conception of constructed Technosols made of urban wastes is to manage the trade-offs between desired and unwanted mineralization of organic materials.

The ecosystem services approach allows for a comprehensive (of several ecosystem services) yet synthetic (one or just a few indicators per service) comparison between different management options for rooftops. The ecosystem services approach thus appears useful for city planners in the design of green infrastructure and for designing sustainable urban agriculture systems and more generally for conceiving cities with high levels of ecosystem services.

Acknowledgments:

We are especially grateful to our partners: Topager® for co-creating these productive rooftops with us, and BioYvelinesServices and La Boite à Champignons for supplying growing substrates, and for their support. We also thank Antoine Juvin, Jean Noel Rampon, Véronique Ethievent, Thibaud Perreira, Muriel Colin, Clémentine Jeannetteau, Elsa Petit, Jean-charles Michel and Yvette Barraud-Roussel and Sibylle Paris for their help with the experiments and laboratory work. We acknowledge the financial support of AgroParisTech, Chaire EcoConception Vinci, and DIM ASTREA.

Partie 2 : Production alimentaire

L'objectif de cette partie est double : (i) tester la faisabilité de la culture sur Technosol uniquement issu de résidus urbains, d'un point de vue quantitatif et qualitatif et (ii) étudier l'influence de facteurs liés à la composition, l'agencement et l'évolution des Technosols. Nous nous attacherons à répondre aux questions suivantes :

- Un Technosol construit uniquement à partir de résidus urbains permet-il une production alimentaire significative au regard d'indicateurs quantitatifs et qualitatifs ?
- Le niveau de production est-il influencé par le type de Technosol et/ou son évolution et/ou le type de plante cultivée ?

Ce chapitre rapporte l'ensemble des résultats obtenus sur les trois dispositifs expérimentaux du toit « Bertrand Ney ». Les résultats obtenus sur l'essai le plus ancien (le dispositif n°1) ont fait l'objet d'une publication en 2015 dans le journal « Future of Food: Journal on Food, Agriculture and Society »²⁰ et sont placées en **Annexe n° 10** : « Recycling urban waste as possible use for rooftop vegetable garden » Grard et al. (2015).

Introduction

Comme l'évoque Eric Duchemin (Lagneau et al. 2015), les villes sont des organismes reposant sur le monde rural pour leurs alimentations ainsi que pour assimiler leurs déchets. Malgré cela, l'agriculture urbaine (AU) n'est pas, à l'échelle mondiale, un phénomène négligeable. Elle serait ainsi pratiquée par 800 millions de personnes dont 200 millions dans un objectif de production marchande (Smit et al. 2001), produisant environ 15 à 20% des denrées alimentaires mondiales (Lorenz 2015). Ces chiffres cachent toutefois une forte disparité Nord – Sud avec une agriculture urbaine productive, majoritairement située dans des pays en développement (Orsini et al. 2013). Ainsi, à Antananarivo (Madagascar), l'agriculture urbaine produit par exemple, 90 % du cresson consommé (Aubry et al. 2012). A Paris, si en 1860, 95% de l'approvisionnement alimentaire de la ville était réalisé par la région, ce chiffre a chuté drastiquement à 5% en 1935 (Lagneau et al. 2015), avec un nombre de maraichers passé de 1804 en 1859 (entre Paris et sa banlieue) à 626 en 1958 et 286 en 2005²¹.

Toutefois, dans l'hémisphère Nord, l'intérêt croissant ces dix dernières années pour l'AU, a engendré de nombreux débats sur son potentiel de production alimentaire, y compris, pour les nouvelles formes de cultures sur le bâti, nommées Z-Farming (Zero-Acreage Farming ; Specht et al. 2013). En 2010,

²⁰ <http://futureoffoodjournal.org/index.php/journal>

²¹ <http://www.ile-de-france.chambagri.fr/> et l'exposition itinérante « Savez-vous planter les choux ? »

MacRae et al. (2010) ont ainsi cherché à déterminer si l'ensemble des espaces cultivables au sein de la ville de Toronto pouvaient fournir 10% de ses besoins en légumes frais. Cet objectif s'avère réalisable en ayant recours à des productions en toiture. Néanmoins, les auteurs soulignent le manque de connaissances et les défis agronomiques associées à ce type de production. Quoiqu'il en soit, cet ordre de grandeur est comparable au potentiel de production estimé dans d'autres villes (Mcclintock and Cooper 2009; Aerts et al. 2016).

Les études traitant de la question de la production alimentaire en toiture et sur Technosol sont rares comme montré précédemment (Chapitre I : partie 1 – **Tableau 4**; Elstein et al. 2008; Whittinghill et al. 2013; Orsini et al. 2014; Eksi et al. 2015; Kong et al. 2015; Aloisio et al. 2016; Whittinghill et al. 2016b). Dans une étude à Bologne (Italie), Orsini et al. (2014) montrent une production plus importante sur un substrat fertilisé ($18,9 \text{ kg.m}^{-2}$; Chapitre I : partie 1 - **Tableau 4**) que pour un autre système de culture en hydroponie. Eksi et al. (2015) se sont intéressés à la proportion optimale de compost de déchets verts en mélange avec des billes d'argiles expansées et du sable, dans un objectif de production alimentaire. Leurs résultats montrent un ratio optimal autour de 60 à 80% de compost (en volume ou en masse - non précisé par les auteurs), mais, les différences observées sont faibles. Aloisio et al. (2016) comparent pendant 45 jours la production de deux plantes comestibles sur deux mélanges commerciaux pour toiture extensive à un terreau sur 11 cm d'épaisseur (Chapitre I : partie 1 - **Tableau 4**). Ils observent une production bien plus importante avec le terreau qu'avec les mélanges commerciaux classiques de toiture extensive.

Aucune étude ne traite directement de la question de l'agencement des matériaux, de substrats de culture à base de produits résiduaux. Par ailleurs, la plupart des études ne dépassent pas une durée de trois ans et ont en grande majorité, recours à une fertilisation chimique externe (Chapitre I : partie 1 - **Tableau 4**). De manière à mieux connaître et appréhender le potentiel de production en toiture sur Technosol, cette étude a pour objectif d'étudier l'influence du Technosol à base de déchets urbains (nature et agencement des matériaux parentaux), de l'inoculation de macrofaune (vers de terre) et du temps sur la fonction de production alimentaire.

I. Matériels and méthodes

Cette étude utilise les résultats de trois dispositifs expérimentaux. Les caractéristiques de ces trois dispositifs sont détaillées au sein de la partie matériel et méthode de ce manuscrit (voir Chapitre II : partie 2). Pour faciliter la compréhension des résultats présentés ici, les grandes caractéristiques des dispositifs seront toutefois rappelées.

I.1. Dispositifs expérimentaux mobilisés

Les dispositifs expérimentaux sont constitués de :

- 15 bacs de cultures pour le dispositif n°1. Les Technosols en place ont été cultivés entre mars 2012 et 2017. Les 4 traitements expérimentaux du dispositif sont présentés ci-dessous ;
- 9 bacs de cultures pour le dispositif n°2, cultivés entre mars 2013 et 2015. Les 3 traitements expérimentaux du dispositif sont présentés ci-dessous ;
- 12 bacs de culture pour le dispositif n°3. Les Technosols ont été cultivés entre novembre 2015 et 2016. Seul les résultats des bacs non perturbés – correspondant aux répliquats 1 à 3 (voir partie matériel et méthode ci-dessus : Chapitre II, Partie 2) - ont été ici utilisés.

La structure des bacs des différents dispositifs est détaillée dans la partie matériel et méthode du manuscrit ci-dessus (**Figure 22**, **Figure 26** et **Figure 31**).

I.2. Technosol et traitement expérimentaux

Les traitements expérimentaux sont présentés par dispositif. Chaque traitement est répliqué 3 fois.

- **Dispositif expérimental n°1** - 4 traitements

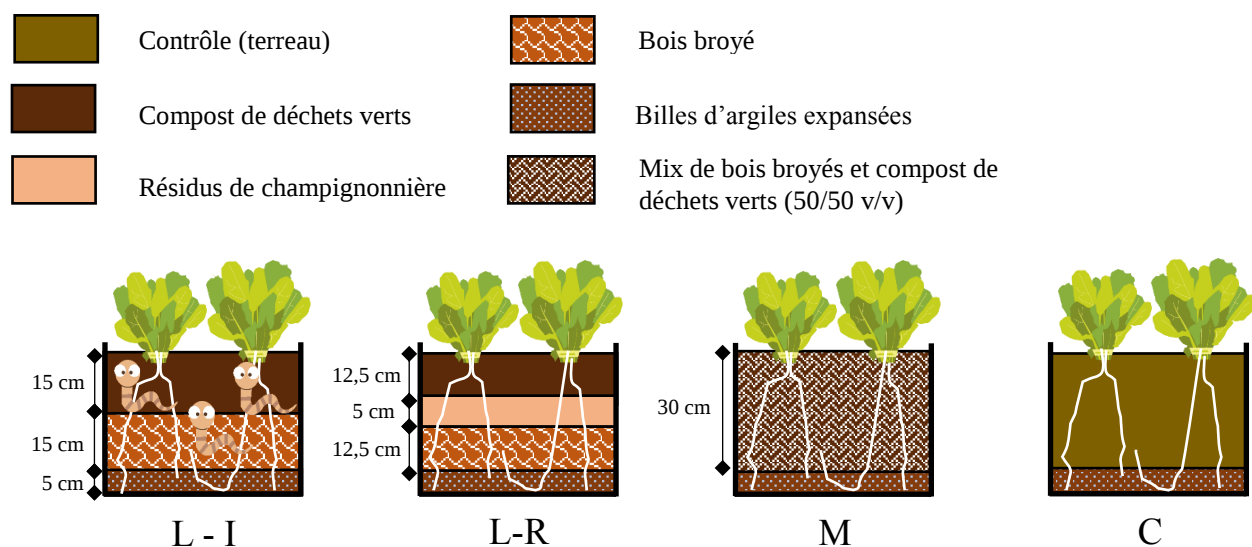


Figure 45 : Représentation schématique des traitements expérimentaux du dispositif n°1.

Il est important de noter qu'à partir de mars 2015, les trois bacs du traitement C ont été enlevés et remplacés par trois bacs d'un traitement identique au L-I nommé L-I_Bis visant à comparer l'effet de l'âge sur les Technosols.

• **Dispositif expérimental n°2 - 3 traitements**

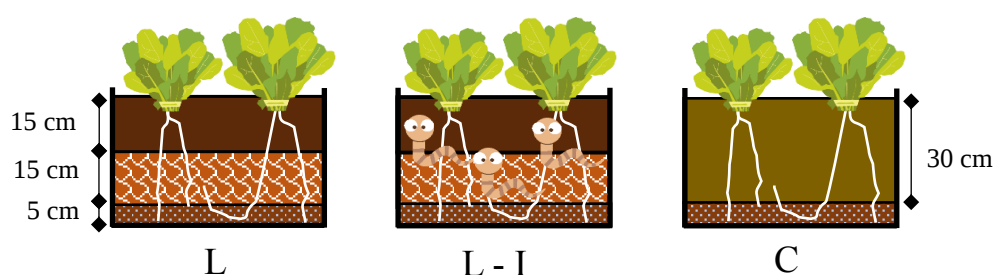
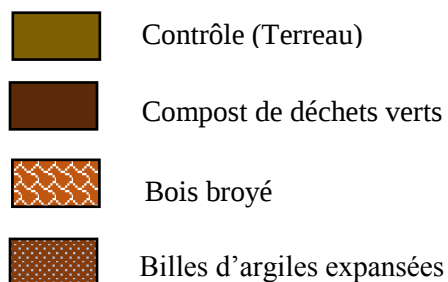


Figure 46 : Représentation des traitements expérimentaux du dispositif n°2.

• **Dispositif expérimental n°3 – 4 traitements**

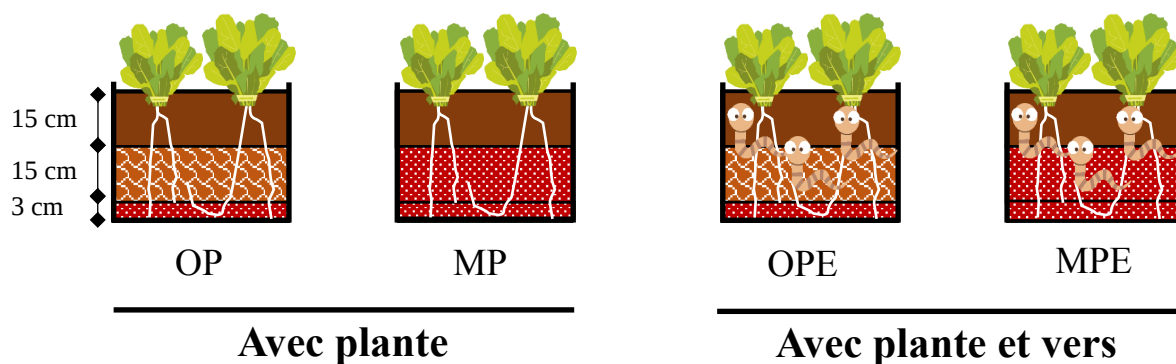
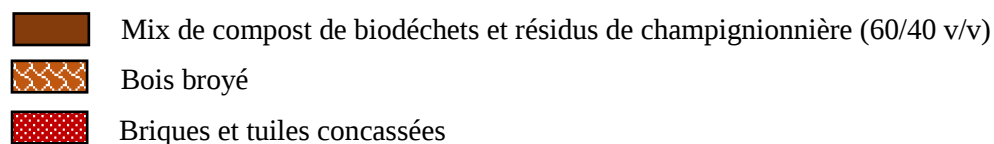


Figure 47 : Représentation des traitements expérimentaux du dispositif expérimental n°3. Mélange = compost de biodéchets (60% en volume) et résidu de champignonnière (40% en volume).

I.3. Succession de cultures

Une rotation de culture propre à chaque dispositif a été mise en place :

- **Dispositif expérimental n°1**

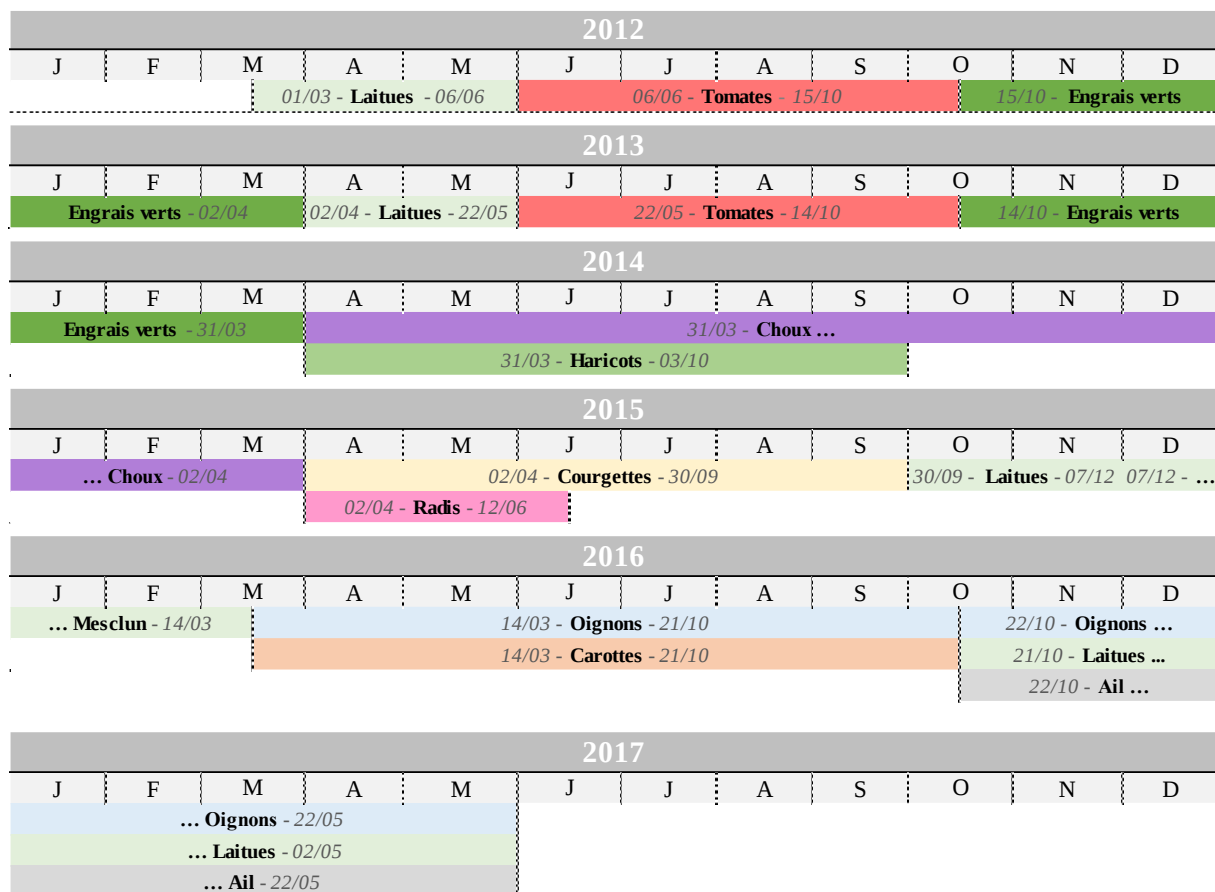


Figure 48 : Rotation de culture en place sur le dispositif expérimental n°1.

- **Dispositif expérimental n°2**

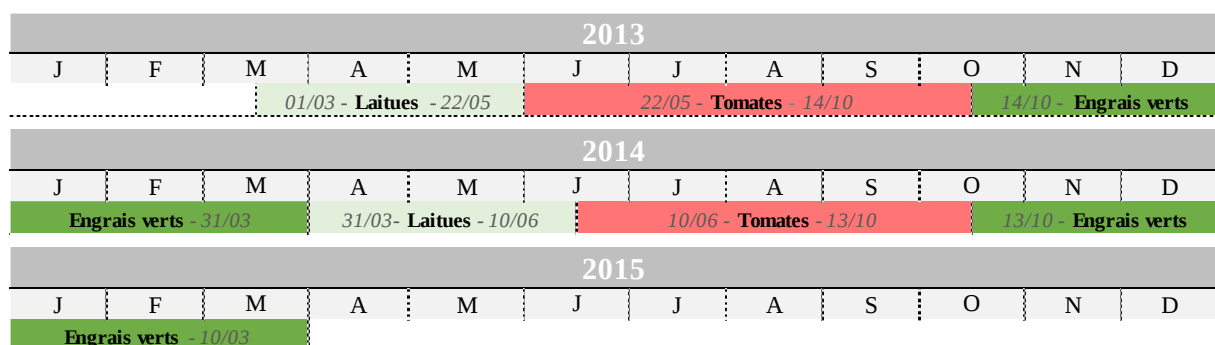


Figure 49 : Rotation de culture en place sur le dispositif expérimental n°2.

• **Dispositif expérimental n°3**

2015					2016							
N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N
11/11/2015 - Epinards - 03/05/2016						04/05/2016 - Choux - 30/08/2016						
						04/05/2016 - Haricots - 28/10/2016						
										01/09/2016 - Laitues - 04/11/2016		

Figure 50 : Rotation de culture mise en place sur le dispositif expérimental n°3 entre novembre 2015 et 2016.

I.4. Mesures réalisées

Les résultats de deux types de mesures vont être utilisés ici: mesure des rendements et mesure des concentrations en éléments traces métalliques. Les protocoles de ces mesures étant détaillés ci-dessus (voir partie Chapitre II : Partie 2) ils ne le seront pas ici.

Néanmoins, les points suivants doivent être rappelés :

- Les résultats de production sont exprimés en kg.m⁻². Le rendement est extrapolé par bac à un m² en faisant l'hypothèse d'une linéarité entre les 2 échelles ;
- Les résultats ne concernent que la partie comestible des légumes. A l'exception, (i) des carottes pour lesquels les feuilles ont également été comptées et (ii) des engrais verts (trèfle et seigle) pour lesquels la biomasse a été comptée comme comestible dans l'estimation des rendements annuels ;
- Les teneurs en ETM ont toutes été exprimées en matière fraîche. Les teneurs en matière fraîche ont été calculées grâce aux matières sèches réalisées sur les échantillons végétaux ou à partir de valeur issue de la bibliographie ;
- Les légumes analysés pour leurs teneurs en éléments traces métalliques ont au préalable été lavés, avant séchage, à l'eau du robinet.

I.5. Analyses réalisées

Tous les tests statistiques ont été réalisés sous R, version 3.3.2. Les comparaisons de résultats ont principalement été réalisées avec des tests Anova (I et II) quand les données étaient normales. La normalité était vérifiée par le test de Shapiro et l'homocédasticité par le test de Levene. Les résultats de ces deux tests étaient acceptés si les valeurs de p-value étaient supérieures à 5%. Lorsque l'une des deux conditions n'était pas respectée (normalité ou homoscedasticité), le test non-paramétrique de Kruskal-Wallis a été utilisé.

II. Résultats

II.1. Teneur en ETM des matériaux parentaux

Le **Tableau 13** présente les teneurs en éléments traces métalliques des matériaux parentaux en comparaison à la norme AFNOR sur les supports de cultures (AFNOR NFU 44-551). L'ensemble des matériaux parentaux présente des teneurs inférieures à la norme. Les teneurs les plus importantes sont observées pour les composts (de déchets verts ou de biodéchets).

	Exprimé en ppm				
	Pb	Cd	Cu	Zn	Hg
NF U 44-551	100	2	100	300	1
Terreau (2012 - 2013)	15,4 ± 1	0,2 ± 0,02	13,3 ± 2,5	66,3 ± 1,1	0,03 ± 0,001
Compost de déchets verts (2012 - 2013)	52,6 ± 4,6	0,5 ± 0,1	39,3 ± 4,5	179,3 ± 6,7	0,25 ± 0,018
Résidus de champignonnière (2012 - 2013 - 2015)	0,9 ± 0,2	0,1 ± 0,1	22,7 ± 3,8	29 ± 4,6	0,004 ± 0,001
Bois broyé (2012 – 2015)	6,5 ± 2,3	0,1 ± 0,02	7,1 ± 1,4	32,3 ± 5,1	0,03 ± 0,006
Compost de biodéchets (2015)	32,7 ± 32,1	0,3 ± 0,03	45,6 ± 1,7	151,6 ± 5,4	0,12 ± 0,025
Mélange (compost de biodéchets et résidus de champignonnière ; 2015)	30 ± 14,3	0,3 ± 0,01	52,8 ± 33,8	148 ± 33,9	0,09 ± 0,017
Mélange de briques et tuiles concassées (2015)	2,4 ± 0,1	0,03 ± 0,004	4,8 ± 0,1	6,6 ± 0,8	≤ 0,002

Tableau 13 : Teneur en élément trace métallique des matériaux parentaux en comparaison à la norme AFNOR NF U 44-551 sur les supports de cultures.

II.2. Quantité de biomasse alimentaire produite

II.2.a. Comparaison à une référence maraîchère

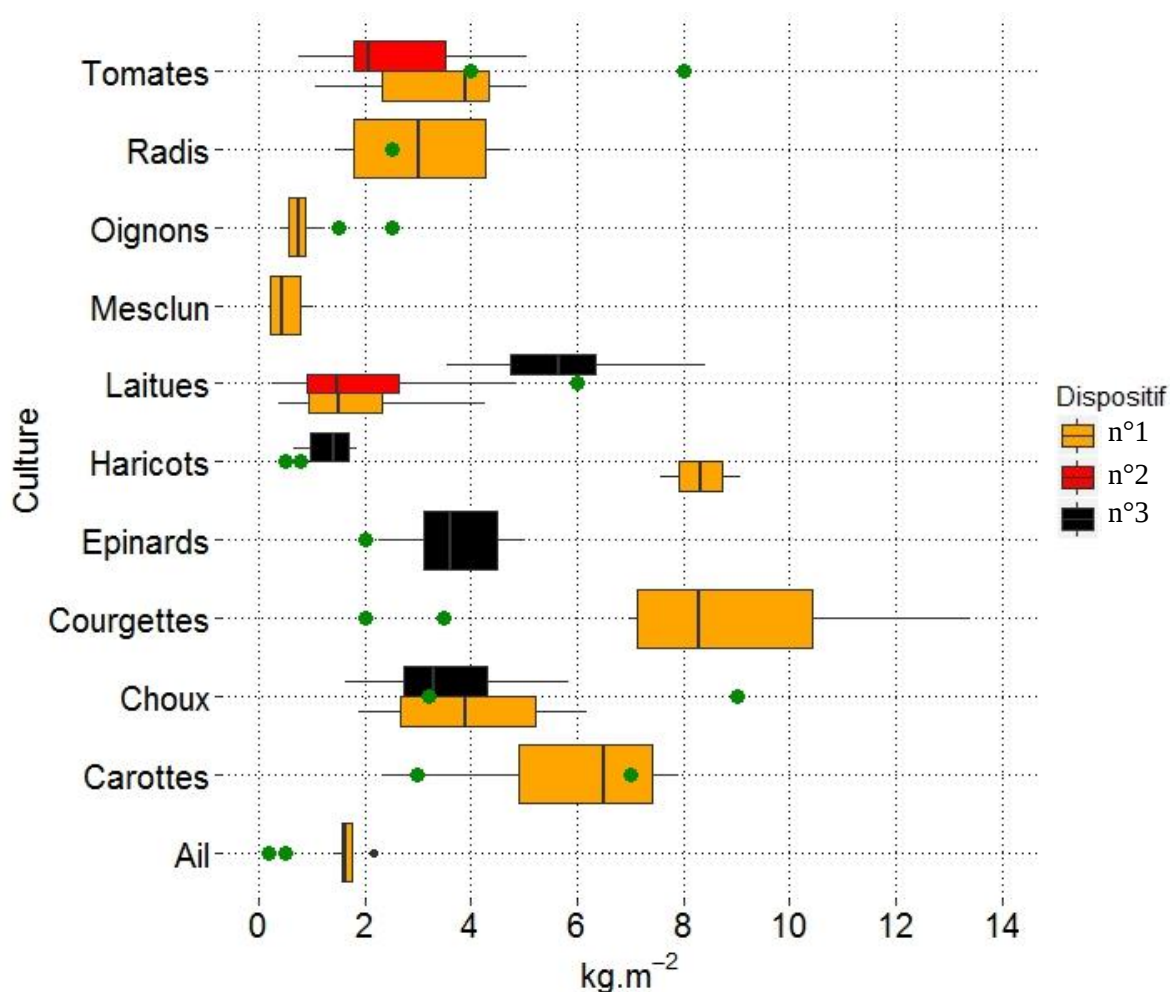


Figure 51 : Comparaison des rendements obtenus sur les 3 dispositifs expérimentaux par rapport à ceux de maraîchers professionnels (indiqué par les points verts issus de l'ITAB (2017)). Le rendement de carotte ne considère ici que la biomasse racinaire. Les valeurs indiquées par le boxplot correspondent au 1^{er} quartile, à la médiane et au 3^{ème} quartile, ainsi qu'à l'écart-type.

La **Figure 51** présente une comparaison de l'ensemble des rendements obtenus, tous traitements confondus, par légume et par dispositif expérimental. La référence utilisée est issue d'un guide professionnel sur la production de légumes biologiques en France, édité par l'Institut Technique de l'Agriculture Biologique²² (ITAB 2017). Cette comparaison montre, au niveau de la production, une diversité de situations selon le type de légume considéré. Les rendements de tomates sont ainsi globalement inférieurs à ceux classiquement reportés, tandis que ceux de courgettes et de haricots sont

²² <http://www.itab.asso.fr/>

supérieurs, comme en général pour les légumes feuilles et légumes racines. Globalement, la **Figure 51** montre que les rendements observés sur les dispositifs expérimentaux sont équivalents à ceux de maraîchers professionnels.

II.2.b. Facteurs d'influence

Le **Tableau 14** présente les rendements obtenus sur cinq saisons de cultures pour l'ensemble des traitements et dispositifs expérimentaux étudiés. Les analyses statistiques ont été réalisées par dispositif expérimental. Trois facteurs ont été considérés (avec leurs interactions) : traitement, type de légume (carotte, oignon, tomate etc.) et saison de culture. Ces analyses montrent :

- pour le dispositif n°3, sur une saison de culture, une absence d'effet du traitement. Seule l'interaction entre le type de légume considéré et le traitement est significative ;
- pour le dispositif n°2, sur deux saisons de culture, l'ensemble des facteurs présentent un impact significatif ainsi que leurs interactions. Le traitement L-I est plus productif que les deux autres traitements. Par ailleurs, l'année 2013 montre une production supérieure (pour l'ensemble des traitements) que l'année 2014 ;
- Enfin, pour le dispositif n°1, l'ensemble des facteurs considérés sont également significatifs à l'exception de l'interaction entre le facteur traitement et année. Le traitement L-R est plus productif que les traitements L-I et L-I_bis, eux-mêmes plus productifs que les traitements M et C. Le facteur année est significatif mais n'a de sens qu'entre les saisons de culture 2012 – 2013 et 2013 – 2014 où les mêmes cultures ont été effectuées. Entre ces deux saisons, la deuxième est la plus productive.

Globalement ces analyses montrent un effet net des traitements (à l'exception du dispositif n°3) dépendant du type de culture. Les analyses présentées au sein du **Tableau 14** ont été effectuées par culture. Celles-ci vont être utilisées ci-dessous pour détailler les effets observables :

- **Effet de la disposition des matériaux parentaux** (comparaison pour le dispositif n°1 de L-I VS M)

Le traitement L-I présente une production supérieure à M sur les 5 saisons de cultures. Sept cultures sur 16 présentent une production totale significativement supérieure pour L-I par rapport au traitement M (**Tableau 14**). Sur aucune des 4 cultures de fruits réalisées cet effet n'est significatif, contre une des 5 cultures de légumes racines alors qu'il est significatif pour 6 des 7 légumes feuilles cultivés. En regardant la production totale par année (**Tableau 15**), cette différence apparaît plus nettement à

l'exception de la 3^{ème} saison de culture. Sur les 5 saisons de cultures L-I atteint une production totale de 59,3 kg.m⁻² (soit 14,8 kg.m⁻².an⁻¹) contre 39,1 kg.m⁻² pour M (soit 9,78 kg.m⁻².an⁻¹).

- **Comparaison à un terreau** (Comparaison pour le dispositif n°1 sur 3 années de culture de L-I/L-R/M VS C et pour le dispositif n°2 de L/L-I VS C)

Au niveau du dispositif expérimental n°1, sur les trois saisons de cultures concernées (2012 à 2014), pour 4 (L-I) et 5 (L-R) cultures sur 8 réalisées, les traitements organiques ont une production supérieure à C (**Tableau 14**). Ces différences sont observées principalement sur 3 cultures feuilles et dans un cas sur la tomate pour L-R. Cela porte la production totale du traitement C sur trois années de culture à 19 kg.m⁻² (soit 6,3 kg.m⁻².an⁻¹ en moyenne) contre 27,2 kg.m⁻² (soit 9 kg.m⁻².an⁻¹ en moyenne) pour L-I sur et 32 kg.m⁻² (soit 10,7 kg.m⁻²) pour L-R (**Tableau 15**). En comparant le traitement M au C, les différences sont quasiment inexistantes. Pour 6 cultures sur 8, les traitements ont une production équivalentes et pour les deux cultures restantes, une production respectivement inférieure et supérieure. Cela confirme les résultats observés pour l'ensemble des productions avec L-R > L-I > M = C en terme de production.

Concernant le dispositif expérimental n°2, sur deux saisons de cultures, les tendances divergent légèrement. Ainsi pour les 3 cultures, en deuxième année, sur six au total, le traitement L présente une production supérieure au C. A l'inverse, pour les cultures de laitues et tomates effectués en première année, leur production est inférieure. Pour L-I, 2 cultures sur six présentent une production inférieure et supérieure au C, ces différences étant respectivement présentes durant la première et la deuxième saison de culture. A l'image de ces différences, la production totale sur les deux années de cultures est relativement peu marquée pour L, L-I et C avec respectivement 8,75 – 12,16 et 8,96 kg.m⁻² (**Tableau 15**). Néanmoins, pour l'ensemble des cultures réalisées, au niveau de la production, L-I > L = C d'un point de vu statistique.

- **Effet du vieillissement des Technosols** (comparaison pour le dispositif n°1 de L-I en année 3 et 4 et L-I_Bis en année 1 et 2)

Le **Tableau 14**, montre que, pour 3 cultures sur 8 réalisées, L-I présente une production supérieure significativement à celle de L-I_Bis. Cet effet n'est présent que sur l'une des deux premières cultures associées (le radis) et sur les deux cultures feuilles suivantes. Il n'est par contre pas présent sur les dernières cultures de légumes racines. On peut noter que la différence entre les deux traitements semble s'inverser entre la première année de culture et la deuxième (**Tableau 15**). Cet effet n'est toutefois

globalement pas significatif, avec des niveaux de productions statistiquement équivalents pour L-I et L-I_Bis (voir ci-dessus).

- **Effet de la nature des matériaux parentaux** (comparaison pour le dispositif n°1 de L-I/M VS L-R).

Sur les 5 saisons de cultures, L-R est le traitement le plus productif avec une somme de 73,5 kg.m⁻², équivalent à 18,3 kg.m⁻².an⁻¹ (**Tableau 15**). En observant le **Tableau 14**, la différence avec le traitement L-I n'est toutefois pas marquée, avec seulement 2 cultures sur les 16 réalisées où L-R présente une production supérieure à L-I., cette différence n'ayant été observée que la première année. Néanmoins, la somme des différences non significatives par culture aboutit à un différentiel de production totale important sur les 5 saisons de cultures.

La différence entre M et L-R, est-elle bien marquée avec 8 cultures sur 16 pour lesquelles L-R a une production significativement supérieure (**Tableau 14**). Au niveau du type de culture, le même patron est observé qu'entre L-I et M avec un effet systématique au niveau des légumes feuilles, absent pour les légumes fruits et présents pour 2 légumes racines sur 5. En production totale sur l'ensemble des saisons de culture, L-R dépasse largement le traitement M.

- **Effet de l'inoculation de vers** (comparaison pour le dispositif n°3 de OP VS OPE et MP VS MPE et pour le dispositif n°2 de L VS L-I).

Aucune différence significative de production n'est observée pour le dispositif expérimental n°3 (comparaisons OP vs OPE et MP vs MPE ; **Tableau 14**). Les productions totales sur une année sont proches, comprise entre 14,7 et 19,6 kg.m⁻² (**Tableau 15**).

A l'inverse, sur le dispositif expérimental n°2 pour 3 cultures sur six, la production est significativement supérieure en présence de vers (**Tableau 14**), aussi bien pour des légumes fruits que feuilles. A l'inverse, la production d'engrais verts est inférieure avec vers en dernière année.

- **Effet du type de couche squelette** (comparaison pour le dispositif n°3 de OP VS MP).

Une seule culture présente une différence significative entre une couche squelette à base briques et tuiles concassées ou de bois broyé (**Tableau 14**). La production de haricots est ainsi supérieure pour MP par rapport à OP. Un écart de près de 4 kg.m⁻² produit en un an pouvant toutefois être observé entre les deux traitements (**Tableau 15**).

Des Technosols construits à partir de produits résiduaux urbains : services écosystémiques fournis et évolution

			Poids total (kg.m ⁻²)											
		Année	Disp. exp. n°	L	L-I	L-R	M	L-I_bis	C	MP	MPE	OP	OPE	
Feuilles	Choux	2014	1		4,9 ± 1 (ab)	6,2 ± 0,7 (a)	2,9 ± 0,4 (bc)		1,9 ± 0,2 (c)					
		2016	3							6,8 ± 0,6 (a)	6,6 ± 1,3 (a)	5,2 ± 0,6 (a)	5,9 ± 1 (a)	
	Laitues	2012	1		2,7 ± 0,3 (b)	4,3 ± 0,3 (a)	0,4 ± 0,1 (c)		1,8 ± 1,4 (b)					
		2013	1		2,7 ± 0,1 (a)	2,2 ± 0,4 (a)	0,6 ± 0,1 (b)		1,4 ± 0,9 (b)					
		2013	2	1,2 ± 0,4 (b)	1,1 ± 0,3 (b)			2,1 ± 0,4 (a)						
		2014	2	2,3 ± 1 (b)	4,5 ± 0,4 (a)			0,3 ± 0,1 (c)						
		2015	1		1,5 ± 0,1 (a)	1,5 ± 0,2 (a)	0,6 ± 0,2 (c)	1 ± 0,1 (b)						
		2016	3							6,4 ± 1,8 (a)	5,9 ± 1 (a)	4,2 ± 1 (a)	5,4 ± 0,9 (a)	
	Mesclun	2015	1		0,7 ± 0,2 (a)	1,1 ± 0,2 (a)	0,2 ± 0,1 (b)	0,2 ± 0 (b)						
	Epinards	2015	3							3,4 ± 1,2 (a)	5,4 ± 0,6 (a)	4,2 ± 1 (a)	4,4 ± 0,7 (a)	
	Courgettes	2015	1		9,4 ± 2,7 (a)	13,4 ± 1,4 (a)	7 ± 1,6 (a)	7,2 ± 1,2 (a)						
	Fruits	Haricots	2014	1		7,6 ± 0,8 (a)	8,1 ± 1,8 (a)	9,1 ± 0,8 (a)		8,6 ± 1,8 (a)				
			2016	3							1,5 ± 0,2 (a)	1,7 ± 0,3 (a)	1 ± 0,4 (b)	1 ± 0,3 (b)
Tomates		2012	1		2,1 ± 0,2 (bc)	3,9 ± 0,4 (a)	2,4 ± 0,1 (ab)		1,1 ± 0,1 (c)					
		2013	1		4,8 ± 0,5 (a)	5,1 ± 0,3 (a)	4,2 ± 0,4 (a)		3,8 ± 0,5 (a)					
		2013	2	2,4 ± 0,4 (c)	3,5 ± 0,4 (b)			4,8 ± 0,3 (a)						
2014	2	1,8 ± 0,1 (a)	2 ± 0,1 (a)			1 ± 0,2 (b)								
Racines	Carottes	2016	1		12,3 ± 2,5 (ab)	17,6 ± 1,1 (a)	6,7 ± 3,5 (b)	16,9 ± 1,5 (a)						
	Oignons	2016	1		1,3 ± 0,4 (a)	1 ± 0,4 (a)	0,8 ± 0,9 (a)	0,8 ± 0,1 (a)						
		2017	1		0,7 ± 0,1 (a)	0,6 ± 0,1 (a)	0,4 ± 0,1 (a)	0,4 ± 0,1 (a)						
	Radis	2015	1		4,1 ± 0,1 (a)	4,7 ± 0,7 (a)	1,5 ± 0,2 (b)	1,9 ± 0,3 (b)						
	Ails	2017	1		2,2 ± 0,3 (a)	1,6 ± 0,5 (a)	1,4 ± 0,4 (a)	1,6 ± 0 (a)						
Engrais verts		2013	1		0,8 ± 0,2 (a)	0,6 ± 0,1 (a)	0,2 ± 0 (b)		0,1 ± 0 (b)					
		2014	1		1,7 ± 0,2 (a)	1,6 ± 0,3 (a)	0,6 ± 0,3 (b)		0,3 ± 0,2 (b)					
		2014	2	0,3 ± 0,1 (b)	0,6 ± 0,1 (a)			0,5 ± 0,1 (ab)						
		2015	2	0,7 ± 0,02 (a)	0,4 ± 0,1 (b)			0,3 ± 0,1 (b)						

Tableau 14 : Comparaison des productions en fonction des traitements. Des lettres différentes indiquent un écart significatif entre deux traitements (p-value <0,05). Les tests statistiques n'ont pas été réalisés sur les valeurs projetées de rendement mais les valeurs par bac. « Dispo. exp. » = dispositif expérimental.

Dispositif n°	Traitement	Production totale (kg.m ⁻²)				
		2012 - 2013	2013 - 2014	2014 - 2015	2015 - 2016	2016 - 2017
1	L-I	5,6 ± 0,3	9,2 ± 0,2	12,4 ± 0,6	15,7 ± 2,7	16,4 ± 1,9
	L-R	8,8 ± 0,6	8,9 ± 0,8	14,3 ± 2,1	20,7 ± 1,3	20,8 ± 1,4
	M	3 ± 0,1	5,5 ± 0,4	12 ± 1,2	9,3 ± 1,4	9,3 ± 4,2
	C	3 ± 1,4	5,5 ± 1,5	10,5 ± 1,6		
	L-I_Bis				10,3 ± 1,2	19,8 ± 1,5
2	L		3,9 ± 0,8	4,8 ± 1		
	L-I		5,2 ± 0,1	6,9 ± 0,4		
	C		7,3 ± 0,4	1,6 ± 0,3		
3	MP				18,6 ± 1,8	
	MPE				19,6 ± 2,6	
	OP				14,7 ± 1,2	
	OPE				17,3 ± 0,8	

Tableau 15 : Production totale par saison de culture et par traitement pour les différents dispositifs expérimentaux. Les données indiquent la moyenne ± l'écart-type. Les saisons de cultures pour les dispositifs n°1 et 2 sont considérées entre le mois de mars à mars de deux années. Alors qu'une année de culture pour le dispositif expérimental n°3 est considérée entre les mois de novembre et novembre de deux années.

II.3. Qualité

II.3.a. Comparaison à une norme

Les concentrations en plomb, cadmium et mercure sont inférieures aux normes européennes (EU 2011) pour tous les légumes à l'exception des épinards sur le dispositif n°3, au niveau du cadmium (**Tableau 16**). Toutefois, ce dépassement ne concerne que les analyses de la première récolte d'épinards avec des teneurs 40 fois supérieures aux autres récoltes. Par ailleurs, la teneur moyenne en mercure des mêmes épinards est équivalente à la norme avec 3 valeurs sur 6 analysés légèrement au dessus (en poids frais : 0.007, 0.007 et 0.006 mg.kg⁻¹). Des différences peuvent être observées entre les légumes fruits ou feuilles avec par exemple des teneurs entre 50 à 200 fois inférieures à la norme pour les légumes fruits concernant le cadmium contre 67 à 20 fois pour les légumes feuilles..

Les teneurs en Pb et en Cd mesurées dans cette expérimentation sont globalement inférieures aux valeurs habituellement observées dans la chaîne alimentaire en France (Etude EAT2 - ANSES 2011). Toutefois, les épinards sur le dispositif n°3 et les laitues récoltées en 2012 sur le dispositif n°1 et en 2016 sur le n°3, présentent des valeurs équivalentes à celles observées dans la chaîne alimentaire en France (ANSES 2011). A l'inverse, pour le mercure, les valeurs mesurées sur les dispositifs expérimentaux, sont supérieures à celles présentes dans le rapport, ces dernières étant quasi nulles.

	Année	Dispositif n°	Pb (mg.kg ⁻¹)			Cd (mg.kg ⁻¹)			Cu (mg.kg ⁻¹)			Zn (mg.kg ⁻¹)			Hg (mg.kg ⁻¹)		
			Moy. ± E-T	N.	A.	Moy. ± E-T	N.	A.	Moy. ± E-T	N.	A.	Moy. ± E-T	N.	A.	Moy. ± E-T	N.	A.
Feuilles	Epinards	2015	3	0,05 ± 0,01	0,3	0,08	0,4 ± 0,46	0,2	0,012	1 ± 0,2	0,66	13 ± 2	2,34	0,005 ± 0,001	0,005	0,000	
	Choux	2016	3	0,01 ± 0,01			0,003 ± 0,0008			0,2 ± 0,1		3 ± 0,4		0,0004 ± 0,0001			
	Laitues	2012	1	0,05 ± 0,006	0,3	0,08	0,01 ± 0,004	0,2	0,012	0,7 ± 0,3	0,66	6,8 ± 2,6	2,34	0,0006 ± 0,0002	0,005	0,000	
		2013	1	0,06 ± 0,02			0,008 ± 0,001			0,5 ± 0,1		5,2 ± 1,5		0,0003 ± 0,00002			
		2013	2	0,05 ± 0,01			0,009 ± 0,001			0,6 ± 0,1		5 ± 1		0,001 ± 0,0003			
		2016	3	0,07 ± 0,01			0,01 ± 0,01			0,6 ± 0,1		5 ± 1		0,001 ± 0,0003			
Fruits	Haricots	2016	3	0,01 ± 0,01	0,1	0,08	0,001 ± 0,0003	0,05	0,012	0,5 ± 0,2	0,66	3 ± 0,6	2,34	0,0003 ± 0,0001	0,005	0,000	
	Tomates	2012	1	0,01 ± 0,005	0,1	0,08	0,004 ± 0,003	0,05	0,012	1,2 ± 0,34	0,66	4,9 ± 0,7	2,34	0,0003 ± 0,0001	0,005	0,000	
		2013	1	0,03 ± 0,01			0,003 ± 0,001			1,6 ± 0,2		6 ± 0,8		0,0003 ± 0,0001			
		2013	2	0,03 ± 0,01			0,003 ± 0,001			1,8 ± 0,07		6 ± 0,8		0,0003 ± 0,0001			

Tableau 16 : Concentration en éléments traces métalliques au sein de différents légumes des dispositifs expérimentaux. Moy. = moyenne ; E-T = écart-type. N. = Norme ; la norme se réfère à une norme européenne (EU 2011). A. = ANSES; se réfère à une étude EAT2 de l'ANSES en 2011 sur la contamination de l'alimentation française (ANSES 2011). Les tests statistiques ont été réalisés par dispositif expérimental avec des analyses à deux facteurs.

La situation est plus contrastée pour Cu et Zn. Les teneurs en Cu des légumes sont quasiment toutes équivalentes, voire supérieures, à celles reportées par l'ANSES, à l'exception des choux récoltés en 2016 sur le dispositif n°3. Les teneurs en Zn sont toutes supérieures aux valeurs de l'étude EAT2 de l'ANSES.

II.3.b. Facteurs d'influence

- **Type de plante**

Sur l'ensemble des dispositifs et pour l'ensemble des éléments, un effet du type de légumes est observé ($p\text{-value} < 0,05$). Comme illustré en **Figure 52**, les légumes feuilles ont systématiquement une concentration supérieure aux légumes fruits pour tous les éléments concernés sauf pour le Cu. Ce dernier, Cu, cette relation est différente selon le dispositif : aucune différence significative n'existe pour le dispositif n°3 ; pour le dispositif n°1, les tomates présentent une concentration supérieure aux laitues et une relation inverse est observée pour le dispositif n°2.

- **Traitement**

Du fait du nombre d'analyses réalisées, l'effet traitement a uniquement pu être traité pour les dispositifs n°1 et 2. Pour le premier, un effet traitement est uniquement reporté pour le zinc avec en terme de teneur (tous légumes confondus) $M > L-I > L-R = C$. A l'inverse, un effet traitement significatif est reporté pour l'ensemble des éléments du dispositif n°2. Le traitement C présente des concentrations significativement plus élevées que L-I. Ceci est également le cas vis-à-vis du traitement L mais uniquement pour Cd et Zn.

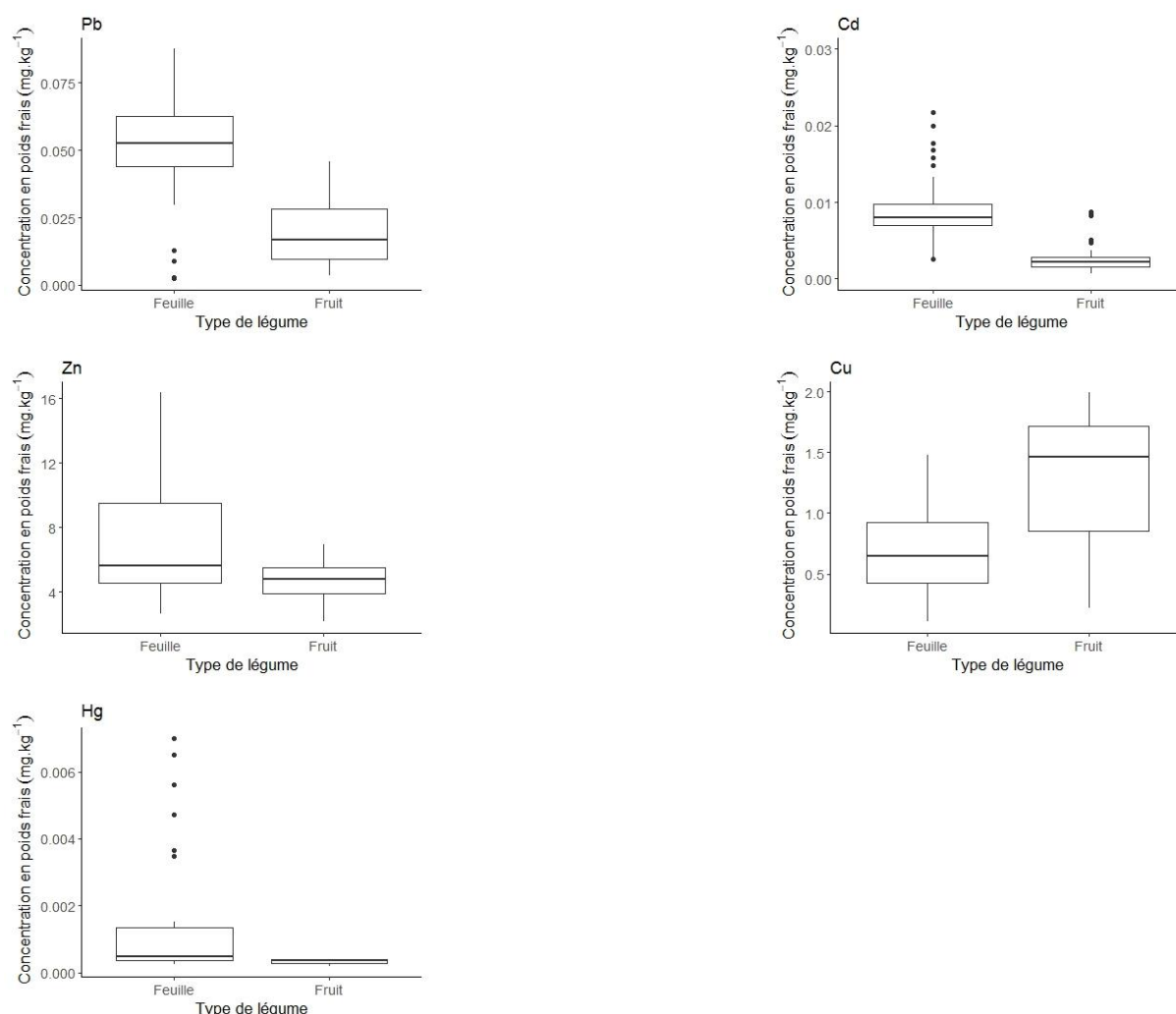


Figure 52 : Graphiques représentant en fonction du type de légume et pour l'ensemble des mesures réalisées sur les trois dispositifs expérimentaux les concentrations par type d'élément trace métallique. Sur le graphique du cadmium, les trois valeurs pour la première récolte d'épinard (autour de 0,4 mg.kg⁻¹) ont été exclues.

III. Discussion

- **Produire sur les toits**

Les rendements mesurés sur les dispositifs sont équivalents (en moyenne) à ceux de producteurs professionnels (ITAB 2017) et à ceux observés sur d'autres toits productifs (Orsini et al. 2014). Par ailleurs, dans les deux dispositifs (n°1 et 2) les rendements sur Technosol sont plus élevés que sur terreau, montrant l'intérêt de résidus urbains comme matériau constitutif de Technosol et ainsi rejoignant les résultats d'autres études (Eksi et al. 2015). Ces comparaisons doivent toutefois être maniées avec prudence. Par exemple, la comparaison avec d'autres études dans le monde est directement impactée par des climats et des itinéraires techniques différents. La validité de certaines références aux valeurs de l'ITAB peut également être discutée du fait de variétés ou de type de légume différents. Par

exemple, la production de tomates cerise dans notre cas, a été comparée à celle de tomate faute de référence adéquate.

Les différences de productions totales entre dispositifs ne peuvent être interprétées directement du fait de production de natures différentes, de conditions climatiques variant entre années et de pratiques d'irrigation différentes. Celles-ci sont néanmoins indicatrices de tendances.

La disposition des matériaux parentaux du Technosol (en couche ou en mélange), n'a à notre connaissance, jamais été testée. Nos résultats montrent une production supérieure lorsque les matériaux sont disposés en couche. Toutefois, le traitement L-I, en couche, présente deux variables le différenciant du traitement M : les vers et la structuration en couche. Rigoureusement, cette différence doit donc être interprétée comme résultante de deux facteurs. Néanmoins, une contamination en vers a eu lieu sur le dispositif n°1 dès la fin de la première année et des vers sont de fait également présents dans le traitement M. Deux hypothèses (non contradictoires/exclusives) peuvent être faites pour expliquer cet effet de la structuration en couche : (i) la survenue, plus importante, de phénomènes de faim d'azote dans le cas où les matériaux sont mélangés. Les communautés microbiennes notamment présente dans le compost, aurait du fait du mélange, une surface d'échange bois/compost plus importante et un accès à la minéralisation des nutriments présents dans le compost plus facile. Une part importante des nutriments minéralisés seraient ainsi mobilisés et immobilisés par l'activité microbienne. Néanmoins, le mélange de l'horizon supérieur et inférieur observé durant les cinq années de culture pour L-I devrait diminuer cet effet. La deuxième hypothèse est la difficulté d'ancrage des systèmes racinaires dans le traitement en mélange du fait de la présence d'élément grossier. Ainsi, sur un cycle de rotation court, les légumes auraient plus de mal à s'implanter dans le traitement M que L-I. Ceci peut-être directement relié au type de système racinaire des plantes, évoqué ci-dessous. Néanmoins, le manque de certaines mesures sur les dispositifs, ne permet pas de tester ces hypothèses.

Dans le cas d'un Technosol en couche, avec une couche fertile et une couche squelette, la nature de la couche (organique ou minérale) n'impacte pas significativement la production du Technosol. Ce constat est surprenant au vu des caractéristiques physiques et chimiques contrastées des deux couches au niveau de l'eau disponible ou du pH (résultats présentés dans le chapitre IV ; **Tableau 17**).

Pour l'ensemble des dispositifs, un effet du type de légume en interaction avec un effet traitement a été observé. Ainsi, les différences entre le traitement L-I et M a été reporté dans la plupart des cas sur des légumes feuilles. Le type de système racinaire des plantes en place, peut sans doute expliquer une partie de ces différences. Les laitues sont ainsi connues pour avoir un système racinaire moins développé que les tomates (Juvin 2014). Néanmoins, cet effet n'a été qu'indirectement traité et le manque de mesure tel que le développement racinaire n'en permet pas une interprétation poussée.

Les vers de terre peuvent affecter directement les caractéristiques physico-chimique des sols (Blouin et al. 2013) et des Technosols (Pey et al. 2013; Deeb et al. 2017). L'impact des vers a ici différé selon le dispositif, avec un impact positif sur la production pour le n°2 et neutre pour le n°3. Néanmoins, dans les deux cas, une interaction entre les facteurs traitement et culture a pu être observé. Ces résultats rejoignent ceux reportés par Deeb et al. (2017), montrant une interaction au niveau de la structure du sol entre plante et vers. Par ailleurs, la différence de résultats pourrait être attribuée au type de matière organique utilisé au sein des deux dispositifs. Ainsi, Pey et al. (2014) montrent un effet direct de la composition d'un Technosol sur l'activité et les turricules du vers *Lumbricus terrestris* (vers épi-anécique). Dans notre cas, les seuls vers ayant réussi à se reproduire sont les vers épigés et nous ne connaissons pas d'étude, sur l'effet de cette catégorie écologique de vers, sur la structure et la production alimentaire d'un sol.

La plupart des études en agriculture urbaine portent sur des durées d'études entre 1 mois et 3 ans (Chapitre I : partie 1 - **Tableau 4**) et aucune ne discute de l'effet du vieillissement des sols en place. Dans notre cas, l'âge d'un Technosol, n'a pas affecté le rendement total malgré des différences sur certaines productions. Nous n'observons pas de diminution des rendements au cours des cinq saisons successives sur le dispositif n°1. L'extrapolation de ces résultats à la durée de vie moyenne de la membrane d'une toiture (10 à 30 ans), nécessite néanmoins d'autres recherches. Cette perspective suscite par ailleurs des questions sur les itinéraires techniques à adopter pour maintenir une fertilité suffisante des Technosols sur de telles durées.

- **Qualité des produits**

La contamination des légumes produits en agriculture urbaine, à partir d'un support de culture, est un enjeu reconnu et crucial (Säumel et al. 2012). Cette contamination est influencée par différents facteurs : le climat, les caractéristiques du sol (teneur en éléments trace, pH, teneur en matière organique, texture; McBride et al. 2014), le type de plante et les organismes du sol (Alexander et al. 2006) ainsi que par l'environnement (proximité d'une route, hauteur du jardin par rapport au sol ; Vittori Antisari et al. 2015). Des auteurs ont ainsi montré (i) l'impact de la proximité d'une voie rapide ou d'industries en termes de dépôts atmosphériques (Vittori Antisari et al. 2015), (ii) le fait que beaucoup de sols urbains sont pollués, principalement pour des raisons historiques, et peuvent de fait présenter des risques de transfert sol-plantes (Säumel et al. 2012) et (iii) de l'avantage potentiel de toits productifs car les teneurs en polluants dans l'atmosphère diminuent avec la hauteur (Tong et al. 2016). Dans notre étude, à l'exception d'une récolte d'épinards sur le dispositif n°3, les teneurs en éléments traces métalliques étaient inférieures aux normes pour le plomb, le mercure et le cadmium (EU 2011). Nous avons également montré que ces teneurs étaient inférieures ou équivalentes à celles observées classiquement

dans la chaîne alimentaire à l'exception du cuivre et du zinc (ANSES 2011). Il s'agit, à notre connaissance, des premiers résultats concernant un potager en toiture sur substrat.

Nous avons, par ailleurs, montré un effet du type de plante sur leurs teneurs, les légumes feuilles présentant en général des concentrations en ETM plus élevées. Ces résultats confirment un effet du type de plante relativement bien documenté (Tremel-Schaub and Feix 2005; Murray et al. 2009). Les teneurs importantes en cadmium observées dans l'une des récoltes d'épinards ne sont pas surprenantes, cette espèce étant connue pour sa capacité à transférer cet élément, qui est, par ailleurs, l'un des plus mobiles dans le sol (John 1973). Ces résultats soulignent néanmoins l'importance du choix des plantes cultivées en agriculture urbaine vis à vis des contaminants, en évitant les espèces bio-accumulatrices. L'effet traitement observé, notamment dans le cas du terreau pour le dispositif n°2 pourrait s'expliquer par les caractéristiques du sol. Le traitement C présente ainsi un pH moins élevé que les traitements organiques, pouvant favoriser les transferts de certains ETM (Olowoyo and Lion 2016).

Nos résultats ne différencient pas les voies de transferts des polluants (eau, air et sol). Toutefois, la relative qualité de l'eau gravitaire (Meera and Mansoor Ahammed 2006) et l'utilisation d'eau du robinet en irrigation, rend la contamination en ETM par l'eau peu probable. Les fortes teneurs en cuivre et zinc observées dans les légumes ne sont pas directement préoccupantes du point de vue sanitaire, ces deux éléments étant des oligo-éléments. Néanmoins, une appréciation des risques en prenant en compte l'apport dans un bol alimentaire moyen serait intéressante. Nos résultats actuels ne permettent pas de traiter la question du temps, et de l'évolution des différentes composantes de la toiture sur la contamination des produits. Avec le temps, la contamination des produits et l'importance du transfert d'ETM peut en effet augmenter ou diminuer selon différents facteurs et processus : dépôt atmosphérique dans les Technosols, diminution de la teneur de ces derniers par lixiviation ou augmentation suite à la biodégradation des matières organiques etc. Le compost est connu pour être une source potentielle d'éléments traces métalliques dans les sols (Murray et al. 2011). Dans notre cas, les matériaux parentaux présentaient des teneurs inférieures à celles recommandées pour des supports de cultures (**Tableau 13**, AFNOR - NF U 44-551), et les pH élevés peuvent potentiellement limiter les transferts sol – plante et la biodisponibilité des ETM (Olowoyo and Lion 2016). Néanmoins, des résultats contrastés peuvent être trouvés dans la littérature au niveau des relations entre ETM et teneurs en matière organique. Par exemple, la forte proportion de matière organique dissoute de certains composts, et la capacité de ce type de matière organique à se lier avec des ETM pourraient affecter positivement ou négativement leur biodisponibilité en lien avec la biodégradation des Technosols. Le manque de connaissances actuelles à ce sujet et les enjeux qui y sont liés soulignent un besoin de recherche.

Conclusion Chapitre III

Dans ce chapitre, nous avons pu montrer, au travers d'une étude quantitative des services écosystémiques, la multi-fonctionnalité d'un modèle de toiture productive basé uniquement sur des résidus urbains. L'approche adoptée, et notamment l'étude de flux (entrant et sortant du système), a permis de mettre en évidence les services et dis-services pouvant être attendus : production de biomasse alimentaire, recyclage de déchets, rétention d'eau pluviale et de nitrates. Les Technosols mis en place ont montré des « niveaux » de services équivalents voir supérieurs aux différentes références disponibles (terreau, toiture végétalisée productive et non productive ainsi que nue). En revanche, un dis-service a pu être mis en évidence : la lixiviation de carbone. Cette perte, sans doute liée à celle d'autres éléments, nécessite d'optimiser la composition du Technosol en place et de gérer des compromis entre les services attendus. Ceci nécessite une meilleure compréhension des processus se déroulant au sein des Technosols, à l'origine des services rendus.

Par ailleurs, l'étude du service d'approvisionnement en aliments a permis de montrer qu'un Technosol construit à l'aide de résidus urbains :

- Peut avoir une fertilité physique et chimique satisfaisante au regard de la production alimentaire. Les niveaux de production sont équivalents à ceux de maraîchers et supérieurs à ceux réalisés en utilisant du terreau. Par ailleurs, le potentiel de production ne semble pas décroître au cours du temps ;
- L'agencement vertical des matériaux parentaux du Technosol affecte la production alimentaire. Ainsi, une disposition initiale en couche augmente la biomasse produite dans le temps. Toutefois, cet effet n'a pu être expliqué par manque de mesures expérimentales ;
- La macrofaune du sol semble avoir un effet réduit sur la production des systèmes de cultures et celui-ci est modulé par le type de matière organique ;
- Certains matériaux parentaux, comme le résidu de champignonnière semble présenter un intérêt agronomique en ayant un impact positif sur le niveau de production des Technosols.

Ces résultats soulignent la pertinence de systèmes de culture conçus uniquement à partir de résidus urbains tout en mettant en lumière des leviers d'optimisations de ces derniers. Par ailleurs, nos résultats soulèvent des questions concernant l'évolution temporelle des Technosols en place ainsi que l'impact de l'itinéraire technique choisi, ce dernier facteur n'ayant pas été étudié ici.



Toit d'AgroParisTech en octobre 2015 – lors de la construction du dispositif n°3. ©Baptiste Grard

Chapitre IV : Fertilité d'un Technosol productif constitué de résidus urbains

Après avoir vu dans le chapitre précédent l'intérêt de systèmes de cultures sur les toits basés sur des produits résiduaux urbains vis-à-vis des services écosystémiques, nous allons ici nous intéresser à la fertilité des Technosols productifs.

Un Technosol de toiture productive, doit remplir deux fonctions antinomiques : celle de se biodégrader progressivement pour permettre d'alimenter la plante en éléments nutritifs et celle d'avoir une vitesse de minéralisation assez lente de manière à conserver une structure relativement stable dans le temps tout en retenant au maximum les nutriments. Comme le souligne d'autres auteurs, pour le moment, très peu d'étude se sont intéressés à la fertilité des Technosols vis-à-vis de la croissance des plantes (Vidal-Beaudet et al. 2016). Nous allons ici analyser la fertilité d'un Technosol reposant uniquement sur sa biodegradation pour fournir des nutriments aux plantes.

“Designing fertile Technosols for rooftop agriculture: a trade-off towards biodegradation”

*Baptiste Grard, Alexandre Barrier-Guillot, Nastaran Manouchehri, Nathalie Frascaria-
Lacoste et Claire Chenu*

Statut de l'article : Non soumis.

Key words : Technosol, Urban agriculture, urban stream, fertility, green roof.

Introduction

As green infrastructures, the many forms of urban agriculture are an opportunity for cities inhabitants to practice and produce fresh food while generating a diversity of ecosystem services (Lin et al. 2015). Interest in urban agriculture has increased in the scientific literature since a couple of years, with articles focusing on three main topics : (i) the different functions of urban agriculture and the ecosystem services provided (Lin et al. 2015; Aerts et al. 2016; Goldstein et al. 2016; Orsini et al. 2015), (ii) the potential for food production and the adequate design of cultural systems (Grard et al. 2015; Whittinghill et al. 2013; Orsini et al. 2014; Sanyé-Mengual et al. 2015), (iii) the raising concern

regarding potential contamination of urban agriculture products (Säumel et al. 2012; Antisari et al. 2015; Pennisi et al. 2016) and (iv) the typology of stakeholders (Thomaier et al. 2014; Specht and Sanyé-Mengual 2015; Specht et al. 2015). While most urban agriculture projects are on rooftops (47 of the 73 urban agriculture projects referenced by Thomaier et al. 2014) and use soil-based growing system (51 of 73 urban agriculture projects, referenced by Thomaier et al., 2014), very few articles focus on the properties of soils used, their contribution to production and their evolution.

Classically, green roofs are divided in two categories: extensive systems (2/3 of the green roofs in the United States as reported by Tabares-Velasco and Srebric 2009) and intensive systems. Extensive green roofs are characterized by a thin layer of growing media (<15cm), low succulent vegetation, low maintenance and irrigation needs (Tabares-Velasco and Srebric 2009). On the other hand intensive systems typically use deeper growing media (>15cm), require higher maintenance and exhibit a higher diversity of plants. Generally, non-productive extensive and intensive systems are developed on coarse draining materials such as pozzolana mixed with a small portion of potting soil resulting in low organic matter content (e.g. FLL guidelines; FLL 2008). This guidance aims to maximize environmental benefits from green roofs while minimizing the weight load and detrimental environmental effects such as nutrient leaching. Mineral materials such as perlite, volcanic pumice, crushed bricks, scoriae or pozzolana are usually used for non-productive rooftop mixed with organic matter (peat or compost; Nagase and Dunnett 2011).

Productive green roofs, (i.e. green roofs producing edible biomass) can be classified as intensive systems. They have some common constraints to non-productive intensive green roofs (i.e., high maintenance requirements, deep growing media and potential heavy load), and are distinct from extensive green roofs by the type of plants and their needs (in terms of nutrients) and maintenance requirements. In addition, vegetables production on green roofs induce higher needs of nutrients, and water to reach significant levels of production. Appropriate choice of the growing media can help meeting these requirements.

Depending on the field of study or the research purpose, many terms are used to name the growing media for plants, i.e., materials on which plants are grown, where the roots develop and that fulfil plants needs in terms of nutrients, air and water. In horticulture the terms “substrate” (Ingelmo et al. 1998), “rooting medium” (Raviv et al. 1998) or “growing medium” (Olle et al. 2012) are used. In green roof literature, the terms “substrate” (Nagase and Dunnett 2011), “growing medium” (Graceson et al. 2014b) or “green roof media” (Olszewski and Young 2011) or even but rarely “Technosol” (Ondoño et al. 2014) are used, whereas in soil science the terms “Technosol” or “constructed Technosol” (Séré et al. 2010) are commonly used to name a soil “whose properties and function are dominated by technical human activity as evidenced by either a substantial presence of artefacts, or an impermeable constructed geomembrane, or technic hard rock” as defined by Rossiter (2007). We chose here to

employ the term Technosol as the purpose of green roof design is to build an equivalent of soil in terms of functions in pluri-annual perspective (>10 years) which differentiates these Technosols from classical growing media used in horticulture with a short term purpose.

Using local recycled materials as constituent of Technosol or other constitutive elements of green roofs could lessen the impact of constructions on the environment as it is an alternative to their disposal to landfill and may have a lower cost. Surprisingly, few studies are devoted to recycled materials as reported by (Vijayaraghavan 2016). Vila et al. (2012), demonstrated that rubber crumbs could be efficiently used to replace pozzolana as latter confirmed by (Rincón et al. 2014) through an LCA analysis. Moreover a large variety of materials are available from mineral to organic wastes with interesting and complementary agronomic properties (nutrients content, physical stability etc.) as shown by Rokia et al. (2014) and Bates et al. (2015). The SWOT analysis performed by Raviv (2013) regarding compost use in horticulture outlines the advantages (price, nutrient supply, removal of soil-borne disease, recycling of wastes) and disadvantages (heterogeneity, potential high salinity and pH, poor physical properties, phytotoxicity). However, composts and other waste-derived products have seldom been studied in the context of green roofs which differs in terms of constraints from professional horticulture (climate, evolution, management, goals etc.). When mixing green waste compost with crushed tile or brick the bulk density decreased while the water holding capacity increased (Graceson et al. 2014a). Papafotiou et al. (2013) in Eksi et al. (2015) show that incorporating compost in green roof substrates with soils and perlite results in greater water retention and plant growth. Nagase and Dunnett (2011), suggest that the optimal organic matter content in extensive green roof is circa 10% w/w rather than the 4-8% currently recommended in guidelines (FLL 2008) in terms of plant growth. Crushed bricks and clay pellets may improve water retention characteristics, hence plant growth and allow to grow more diverse plants on extensive green roof system (Bates et al. 2015; Molineux et al. 2015).

Soil fertility encompasses different functions: (i) to provide sufficient anchorage for plant roots, to fulfill the plant needs (ii) for air with sufficient air-filled porosity and (iii) for water with sufficient water holding capacity, (iv) to provide sufficient nutrients and (v) to provide a habitat for beneficial biota for plants. In addition Technosol are expected not to be a source of contaminants for plants (e.g. heavy metals). To meet plant nutrients requirement producers have two main options, with distinct environmental consequences: (i) to use mineral fertilizers that require fossil fuel consumption or mining and can lead to nutrients leaching (Berndtsson et al. 2009) or (ii) to use organic matter providing nutrients by cation exchange (K, Mg..) and mineralization (N, P, ...) that may also lead to nutrient leaching but promotes recycling of organic wastes. Biodegradation is then a key process controlling nutrient availability in organic wastes based Technosols.

This study aimed to evaluate the fertility of Technosols based on recycled urban wastes used for vegetables production on a rooftop. We focused on four urban wastes as Technosol constituents: spent

mushroom substrate, biowaste compost, shredded wood and crushed tiles and bricks. We evaluated soil fertility using several criteria (i) soil chemical and physical characteristics related to root growth and nutrient acquisition, (ii) roots exploration of the substrate and (iii) nutrients stock evolution during a first cropping season. Earthworms inoculation impact was also considered as worms have been shown to influence soil fertility indirectly via their effect on biomass production (van Groenigen et al. 2014) and soil ecosystem services (Blouin et al. 2013). We hypothesized that (i) productive and fertile green roof Technosol could be made only from urban wastes and that (ii) differences would be observed among treatments (using crushed bricks and tiles or shredded wood, because of the properties of these materials and with or without earthworms). However if nutrients provision to the plant is based on the biodegradation and mineralization of the organic substrate, then the substrate should loose mass with time, which may induce changes in its physical properties (porosity, water and air availability). A trade-off has then to be managed between properties negatively affected and positively affected by biodegradation. We aimed to analyse this trade-off.

I. Materials and methods

I.1. Experimental site and set-up

The study took place in a Parisian rooftop of 861m² (48°50'23.6"N 2°20'52.4"E) between November 2015 and November 2016. The climate of Paris is oceanic, with a mean rainfall during the experimental year of 620.6mm, a mean temperature of 13.5°C [min: -4.3°C; max: 36.8°C] and a mean solar radiation of 72.3 W.m⁻².

The experimental trials consisted of 24 plots of 0.50m² (inside perimeter: 71cm * 71cm) and 40cm height in wooden boxes. Plots were positioned distant of at least 50cm and placed above pallets, i.e. 37cm above the roof ground (see **Figure 53-a**), with a randomized block design. Each treatment had six replicates; three were undisturbed during the whole experiment while the other three were destructively sampled during the experimental year (see below for soil sampling). Yields were measured on undisturbed replicates.

I.2. Technosol parent materials

Four different urban wastes were used as parental materials: (a) shredded wood mainly obtained from tree pruning and commercially produced by BioYvelinesServices©; (b) a mix of crushed tiles and bricks; (c) a biowaste compost made by Veolia under NF U 44-051 and (d) a substrate made from spent coffee grounds after being used to grow mushrooms (*Pleurotus Ostreatus*) by the firm Laboiteàchampignons©.

I.3. Plot design

The design of our experiment follows three main principles (Grard et al. 2015) :

1. To be transposable to people without specific agricultural skills and with limited economic resources, in order to mimic a rooftop community garden;
2. To use only local urban wastes as substrates to contribute to the urban metabolism as defined by Barles (2009);
3. To avoid the use of fertilizers and chemical pesticides in order to limit the consumption of fossil fuel and natural resources and the contamination of food products and the ecosystem.

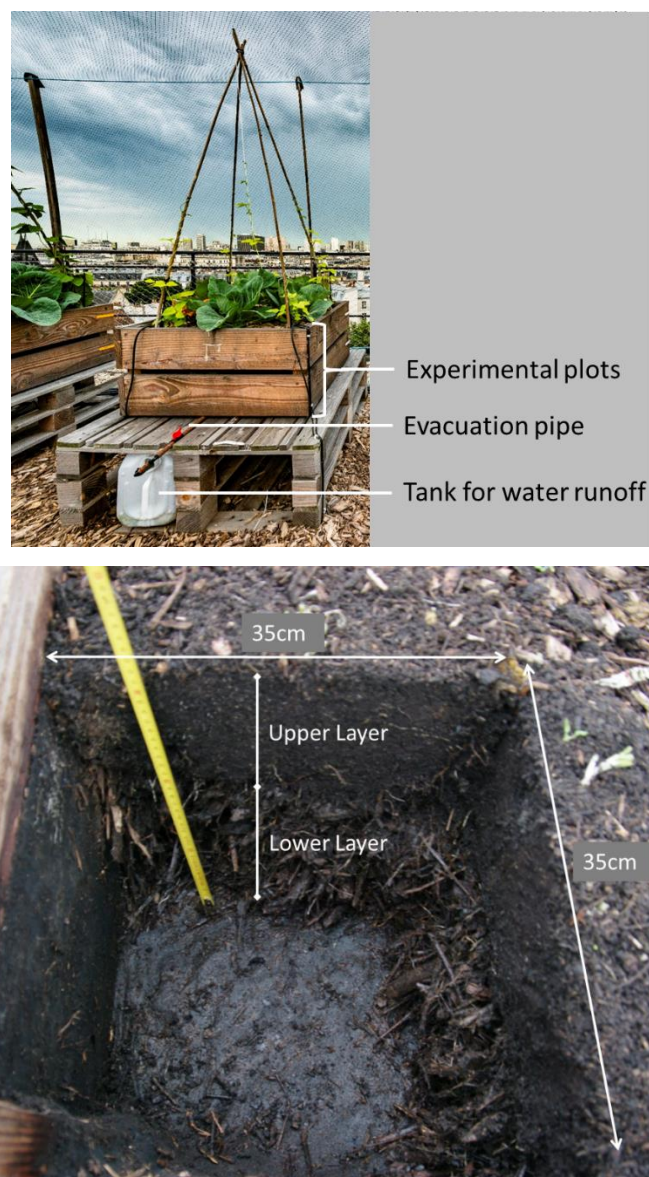


Figure 53 (a) – left: Picture of the experimental trial on the rooftop AgroParisTech in 06-22-2016. © MairiedeParis. (b) – right: Soil profile from experimental plot [O - WP] in 7th of November 2016 (after one growing year). ©Baptiste Grard

The plots were divided in five layers: two main layers corresponding to our soil profiles and two technical layers plus one vegetation layer. As shown on (**Figure 54-b**) from down to top:

(i) a **drainage layer** [technical layer] made of crushed tiles and bricks. This layer is designed to avoid stagnant water in the bottom part of the experimental boxes;

(ii) a filter layer made of polyester **geotextile** (120g.m^{-2}) [technical layer] to avoid fine particles ($>70\mu\text{m}$) to be washed from the Technosol;

(iii) a **Technosol skeleton layer** of 15 cm height [soil profile] which has the function to store water but also allow the drainage of water in excess to ensure aeration for roots. We compared two available materials: crushed tiles and bricks or shredded wood.

(iv) a **Technosol nutritive layer** of 15 cm height [soil profile] which has the function to fulfil plant needs for nutrients and water. We used a mix of biowaste compost with spent mushroom substrate (60/40 v/v).

Two types of experimental plots were built on October 14th 2015, either with an organic skeleton layer, i.e. shredded wood (treatments [O]) or with a mineral skeleton layer, i.e. crushed tiles and bricks (treatments [M]). Both treatments have an upper layer with the mix and exhibit two modalities: one with plants [OP or MP] and one with plants and inoculated earthworms [OPE or MPE].

Once filled, experimental plots were left almost one month to allow settlement. Plants were introduced in November 2015 11th. Earthworms were inoculated the same days in [OPE] and [MPE] with 20g per box equivalent to 33-41 individuals of *Eisenia Fetida*, an epigeic earthworm.

As shown on (**Figure 54-b**), two types of irrigation were installed: spray and drip irrigation. Both were filled with tap water and drip irrigation was mostly used (spray were turned on only during a short period of time for beans germination. Irrigation was used from May to October and irrigation time was manually set up. A possible lack of irrigation was observed during July and August 2016 through yellow and dried leaves of beans and cabbage.

I.4. Technosol sampling

Soil samples were taken at different times: prior to experimentation for the analysis of parental material and after 1 month, 3, 6 and 12 months of experimentation. At each sampling a surface area of $35\text{cm} \times 35\text{cm}$ was defined to extract the soil. We divided the soil profile in two horizons: an upper and a lower layer based on the initial vertical Technosol organization and in-situ observation (the upper layer was defined by the first emergence of shredded wood or crushed tiles and bricks from the lower layer)

(**Figure 54-a**). First an undistributed soil cylinder (10cm*12cm) was sampled from middle of the upper layer. Then the rest of the upper layer was sampled separately for observation and analysis and the procedure was repeated for the second layer.

An observation of the roots distribution was performed along the soil profile on one of the walls of the 35cm*35cm*30 cm excavated volume using a 10*16cm grid. The grid was composed of 56 cells of 1cm² and each cell with a root was quoted 1; cells without root were quoted 0. Based on this data, the percentage of root occurrence was calculated as:

$$\% \text{ of root occurrence} = \frac{\text{nb of cells with roots}}{\text{nb of cells}} * 100$$

The Technosol height was directly measured: a flat wood stick was placed in the diagonal of each plot then the height between the surface of the measured layer and the wood stick was measured. Total height was the average of 10 replicate measurement points and layer height the average of 4 replicate measurements, as the soil sampling area was smaller (see above **Figure 53**).

I.5. Soil analysis

Once collected, soil samples were air dried for at least two weeks at 40°C and samples were entirely crushed to pass at 2mm. Then, there were send for analysis to the soil laboratory of INRA Arras (for CaCO₃, organic C, total nitrogen, P₂O₅, Fe, K and Mn contents, pH_{water}, EC, and CEC). CaCO₃, was determined using NF ISO 10693, CEC – NF X 31-130; organic carbon content (dry combustion by heating at 1000°C with O₂) - NF ISO 10694; electrical conductivity (1/25 m/v ; 25°C) – NF ISO 11265; Fe (EDTA 1/10 m/v) – NF X 31-120 using an ICP-AES; K – NF X 31-147, Mn (1/10, m/v) internal method DIV-1754); pH_{water} (ratio soil/solution = 1/5 v/v) - NF ISO 10390, P₂O₅ (1/20 m/v) – NF ISO 11263 and total nitrogen (dry combustion by heating at 1000°C with O₂) - NF ISO 13878.

In parallel, bulk density was measured on the sampled cores according to NF EN 13041. To determine water retention and porosity, the undisturbed cores were saturated with water for 24h and then placed on a suction table to equilibrate at -0.1; -1.58; -3.16; -5; -10 kPa and on a pressure plate apparatus at -31.6; -100; -316 and -1000kPa.

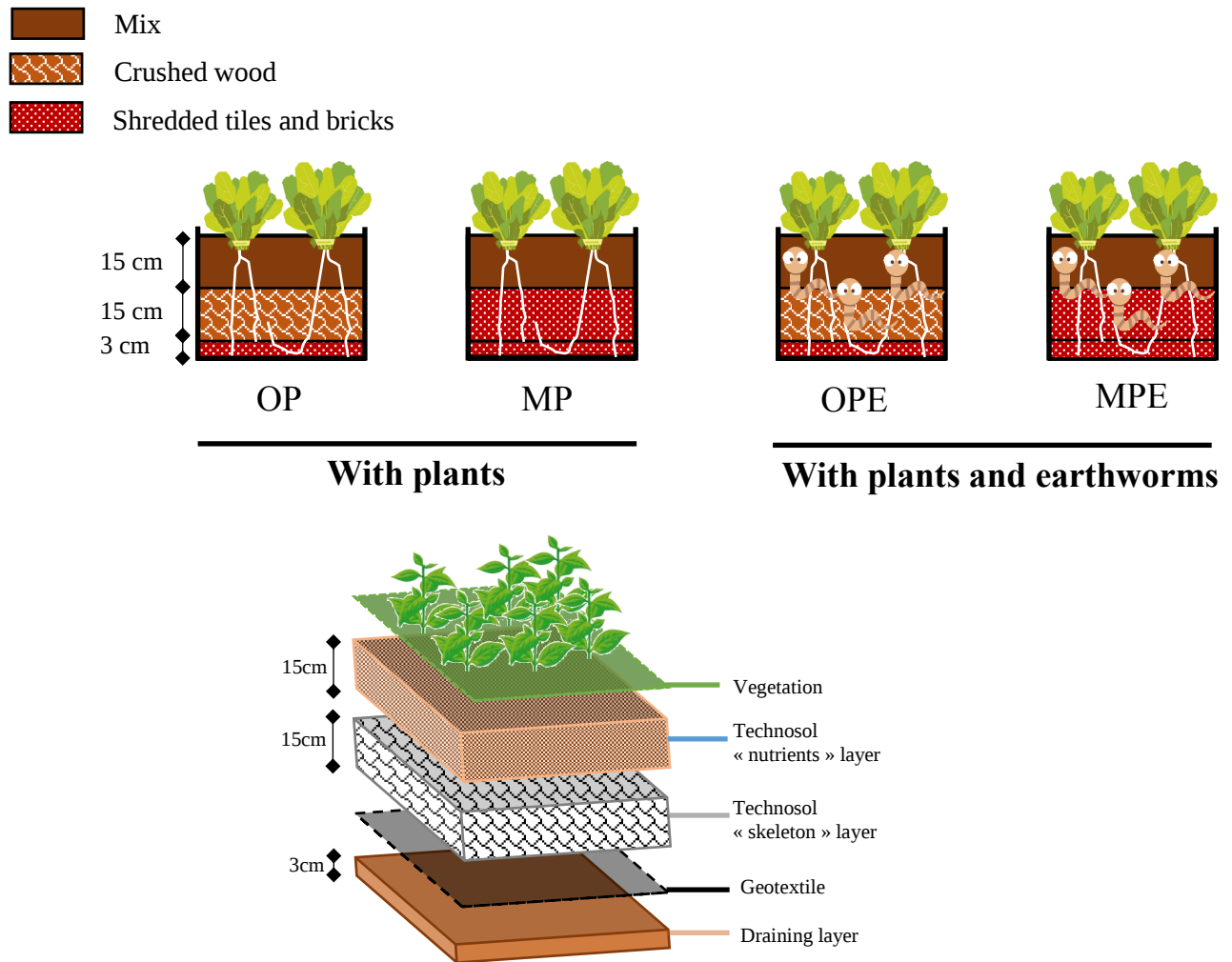


Figure 54 (a) – right: Experimental treatments: **[OP]**: Organic with Plants; **[MP]**: Mineral with Plants; **[OPE]**: Organic with Plants and Earthworms; **[MPE]**: Mineral with Plants and Earthworms. BC: Biowaste compost and SGM: Spent coffee grounds with mycelium. (b) – left: Diagram of the structure of one experimental plots with the different layers.

Soil physical parameters were calculated using the following formulae:

- **Bulk density** (g.cm^{-3}): $D_b = \frac{D_m}{V_c}$

With: D_b = sample dry mass (g) and V_c = volume of the cylinder (cm^3)

- **Maximum Water Holding Capacity** ($\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$): $WHC_{pF1} = \frac{m_w}{V_s}$

With: m_w = mass of water at pF1 (g) and V_s = volume of sample at pF1 (cm^3)

- **Air-filled porosity** ($\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$): $AFP_{pF1} = 1 - WHC_{pF1} - V_{sol.}$

With: WHC_{pF1} = water holding capacity at pF1 ($\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$) and $V_{sol.}$ = volume of solid at pF1 (cm^3)

- **Total porosity** ($\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$): $\delta = 1 - \frac{\rho_a}{\rho_r}$

With: ρ_a = bulk density (g.cm⁻³) and ρ_r = solid density (g.cm⁻³).

- **Water index at pF1 :** $Wi_{pF1} = \frac{B_d * V_{sol}}{Ms_{pF1}} * MW_{pF1}$

With: Wi_{pF1} = Water index at pF₁ for a known volume of solid of 1 cm⁻³ (cm⁻³); MW_{pF1} = Mass of water at pF₁ (g) ; Ms_{pF1} = Sample mass at pF₁ (g) ; B_d = Bulk density (g.cm⁻³) and V_{sol} = Volume of solid defined as 1cm⁻³ here.

- **Void index at pF1 :** $Vi_{pF1} = \frac{B_d * V_s}{Ms_{pF1}} * V_s * AC_{pF1}$

With : Vi_{pF1} = Void index at pF₁ for a known volume of solid of 1 cm⁻³ (cm⁻³); V_s = Volume of sample at pF₁ (cm⁻³); AC_{pF1} = Air content at pF₁ (%of volume); $MW_{pF1} \Leftrightarrow Ms_{pF1}$ = Sample mass at pF₁ (g) ; B_d = Bulk density (g.cm⁻³) and V_{sol} = Volume of solid define as 1cm⁻³ here.

- **Available water [soil] :** $AW_{pF2-4} = Wc_{pF2} - Wc_{pF4}$

With : AW_{pF2-4} = available water for soil between pF₂ and 4; Wc_{pF2} = Water content by mass at pF₂ and Wc_{pF4} = Water content by mass at pF₄. These values (pF 2 and 4) are commonly used for soils

- **Available water [Substrate] :** $AW_{pF1-2} = Wc_{pF1} - Wc_{pF2}$

With: AW_{pF1-2} = available water for soil between pF₁ and 2; Wc_{pF1} = Water content by mass at pF₁ and Wc_{pF2} = Water content by mass at pF₂. These pF values (1 and 2) are commonly used in horticulture for substrates in pots

- **Macroporosity**

○ **> 300 μ m** $P_{>300\mu m} = Vi_{pF1}$

With: $P_{>300\mu m}$ = Volume of pores > 300 μ m dia for a solid volume of 1cm⁻³ (cm⁻³) and Vi_{pF1} = Void index at pF₁ (cm⁻³)

○ **300 - 9.5 μ m** $P_{300-9.5\mu m} = Wi_{pF1} - Wi_{pF2.5}$

With: $P_{300-9.5\mu m}$ = Volume of pores between 300-9.5 μ m (cm⁻³) for a solid volume of 1cm⁻³ and Wi_{pF1} = Water index at pF₁ (cm⁻³) for a solid volume of 1cm⁻³ and $Wi_{pF2.5}$ = Water index at pF_{2.5} (cm⁻³) for a solid volume of 1cm⁻³.

- **Microporosity**

○ **9.5 - 0.3 μ m** $P_{9.5-0.3\mu m} = Wi_{pF2.5} - Wi_{pF4}$

With: $P_{9.5-0.3\mu m}$ = Volume of pores between 9.5-0.3 μ m (cm⁻³) for a solid volume of 1cm⁻³ and $Wi_{pF2.5}$ = Water index at pF_{2.5} (cm⁻³) for a solid volume of 1cm⁻³ and Wi_{pF4} = Water index at pF₄ (cm⁻³) for a solid volume of 1cm⁻³.

○ $< 0.3 \mu\text{m}$

$$P_{<0.3\mu\text{m}} = Wi_{pF4}$$

With: $P_{<0.3\mu\text{m}}$ = Volume of pores $< 0.3\mu\text{m}$ (cm^3) for a solid volume of 1cm^3 and Wi_{pF4} = Water index at pF4 (cm^3) for a solid volume of 1cm^3 .

Four trace metals (Cd, Pb, Cu and Zn) currently found in polluted urban garden soils were analysed in the parent materials. A Polarized Zeeman Atomic Absorption spectrophotometer model Z5000 (HITACHI) was used for ETAAS (Electro thermal Atomic Absorption Spectrometry) to determine Cd, Pb and Cu and for FAAS (Flame Atomic Absorption Spectrometry) to determine Zn. All measurements were performed on triplicate samples. .

I.6. Nitrogen mineralization

Once air dried, parental materials (except crushed tiles and bricks) were sieved at 8mm to retrieve larger particles. Deionized H_2O was added to each dried sample (circa 50g of dry samples for shredded wood and 30g of dry samples for the mix) to reach pF1.7 (12.4 g.g^{-1} for shredded wood against 1.18 g.g^{-1} for the mix). Once at pF1.7, samples were incubated in 2L vials at 20°C for 239 days. Triplicates were incubated for parental material and destructive sampling was performed at 9 dates (0, 7, 14, 28, 42, 56, 70, 176 and 239 days). The water level was adjusted weekly and the atmosphere renewed permanently as the vial was left open. To estimate the equivalence between laboratory and field experiments, degrees days are use: 239days at 20°C correspond to 4775 cumulative degree day equivalent to almost one field year (the period between November 11th 2015 and 2016 correspond to 4952 cumulative degree day).

At each sampling date 50g of fresh shredded wood and 30g of fresh mix were placed in a bottle with 100 or 200ml of KCl [1M] and shaken for 2 hours. Samples were then directly filtered (with a fiberglass filter) at $1.2\mu\text{m}$ and stored at -20°C before mineral nitrogen analysis. Concentrations of N-NH_4^+ and N-NO_3^- were analysed by colorimetry on a continuous flow (Skalar Analytical, Breda, the Netherlands).

I.7. Nutrient stock calculation

Nutrients stocks were calculated as follow:

$$\text{Stock of } x = C_{xUL} * M_{UL} + C_{xLL} * M_{LL}$$

With: Stock of x = stock of nutrient x in Technosol, i.e. total N or P_2O_5 or K in kg per experimental plot; C_{xUL} = concentration of the element x in the Upper Layer in g.kg^{-1} ; M_{UL} = mass of the Upper Layer in kg; C_{xLL} = concentration of the element x in the Lower Layer in g.kg^{-1} and M_{LL} = mass of the Lower Layer in kg.

With: $M_{ULorLL} = Db_{ULorLL} * V_{ULorLL}$

With: M_{ULorLL} = mass of the Upper Layer or the Lower Layer in g.kg⁻¹; Db_{ULorLL} = bulk density of the Upper Layer or the Lower Layer in g.cm⁻³ and V_{ULorLL} = the volume of the Upper Layer or the Lower Layer in cm⁻³.

And: $V_{ULorLL} = H_{ULorLL} * 71 * 71$

With: V_{ULorLL} = the volume of the Upper Layer or the Lower Layer in cm⁻³; H_{ULorLL} = Height of the Upper Layer or the Lower Layer and 71*71cm correspond to the internal dimension of the experimental plots.

The layer height is calculated based on height measurement of the total Technosol and of the upper layer. The measure corresponds to the height between the top of the wooden plots and the first emergence of below layer. Height of the lower layer is measured when sampling soil layer by layer.

Specific calculation regarding mineralized N:

$$Stock\ of\ N_{min} = C_{NUL} * M_{UL} * N_{minUL} + C_{NLL} * M_{LL} * N_{minLL}$$

With: Stock of N_{min} = stock of potential mineralized N in Technosol, in kg per experimental plot; C_{NUL} = concentration of total N in the Upper Layer in g.kg⁻¹; M_{UL} = mass of the Upper Layer in kg; N_{minUP} = % of N potentially mineralized for the mix; C_{NLL} = concentration of total N in the Lower Layer in g.kg⁻¹; M_{LL} = mass of the Lower Layer in kg and N_{minLL} = % of N potentially mineralized for crushed wood.

I.8. Plant material

The cultural succession was designed focusing on vegetables that could be productive on small surfaces and with a no-return time of 4 years of the same family of vegetables. Young transplants of Spinach (*Spinacia oleracea*) were planted November 2015 and harvested 4 times. Transplants of cabbage (*Brassica oleracea* var. *capitata*) were planted in May 2016 in association with seeded beans (*Phaseolus vulgaris* var. *Helda*) in May 2016 and then at the end of June 2016. Cabbages were harvested August 30th 2016. Young lettuces (*Lactuca sativa*) were then transplanted in association with beans until the

end of October. Growing vegetables were harvested once reaching estimated acceptable commercializing size.

I.9. Abundance of earthworms

At sampling, earthworms were manually sorted (during at least 2 minutes) from the excavated layer, counted and weighed.

I.10. Statistical analysis

Statistical analyses were performed using R software (R-3.1.1). Each treatments with three replicates for each were compared using an analysis of variance after ensuring the normality of the data with a Shapiro test. A multiple comparison of means was determined by the post-hoc Tukey test. When the normality of data was not respected, a Kruskal Wallis test followed by a post-hoc Nemenyi test was applied. A significance level of $p\text{-value} < 0.05$ was used for each test.

II. **Results**

II.1. Technosol characteristics

Materials for the upper layer and the lower skeleton layer were well differentiated by the PCA analysis (see **Figure 55**). The main differences (first axis: 50.92% of variability) were due to nutrients and physical characteristics (CEC, P_2O_5 , N, Mn and bulk density). The shredded wood clearly differentiated on the second axis (22.02% of variability), in relation with its $CaCO_3$ content.

In terms of physical properties, the upper layer mix exhibited high water retention capacity and low bulk density at T0 and after one year (**Tableau 17-a**). The porosity of this mix was characterized by a high macro-porosity (both $> 300\mu m$ and $300 - 9.5\mu m$) and micro-porosity ($< 0.3\mu m$) (**Tableau 17-a**). The upper layer mix had at all dates a lower bulk density than crushed tiles and bricks and higher than shredded wood and retained more water than lower layers. The lower layers differed for bulk density (0.14 g.cm^{-3} for shredded woods compared to 1.07 g.cm^{-3} for crushed tiles and bricks), available water (both for soil and substrate expressions) which were higher for shredded wood than for crushed tiles and bricks. Finally, both materials exhibited a bimodal porosity with high macro-porosity ($> 300\mu m$) and high micro-porosity ($< 0.3\mu m$) (**Tableau 17-a**).

Des Technosols construits à partir de produits résiduaux urbains : services écosystémiques fournis et évolution

(a)	Characteristic	Dry bulk density	Maximum WHC (Water Holding Capacity)	Air-Filled Porosity (at max. WHC)	Total porosity	Available water [soil] pF2-4	Available water [substrate] pF1-2	For a volume of solid of 1cm ⁻³			
								Macro-porosity		Micro-porosity	
								>300 µm	300-9,5µm	9,5-0,3µm	<0,3 µm
								cm ⁻³	cm ⁻³	cm ⁻³	cm ⁻³
Upper layer	Mix	0,37 ± 0,02 (c)	0,68 ± 0,007 (a)	0,14 ± 0,0001 (f)	0,80 ± 0,001 (c)	144,7 ± 15,0 (a)	226,6 ± 14,0 (a)	0,79 ± 0,04 (ef)	1,62 ± 0,05 (a)	0,51 ± 0,12 (a)	1,65 ± 0,18 (b)
	OP	0,32 ± 0,01 (c)	0,56 ± 0,006 (cd)	0,28 ± 0,006 (d)	0,83 ± 0,007 (b)	111,0 ± 3,6 (b)	251,0 ± 48,9 (a)	1,69 ± 0,04 (d)	1,84 ± 0,04 (a)	0,23 ± 0,04 (bc)	1,39 ± 0,04 (c)
	OPE	0,31 ± 0,04 (c)	0,54 ± 0,005 (d)	0,29 ± 0,007 (d)	0,83 ± 0,002 (b)	111,1 ± 15,54(b)	190,7 ± 70,5 (ab)	1,73 ± 0,04 (d)	1,41 ± 0,04 (a)	0,31 ± 0,04 (b)	1,48 ± 0,04 (bc)
	MP	0,36 ± 0,05 (c)	0,63 ± 0,005 (ab)	0,19 ± 0,004 (ef)	0,8 ± 0,003 (bc)	106,3 ± 11,3 (b)	263,4 ± 75,6 (a)	1,07 ± 0,04 (de)	1,86 ± 0,04 (a)	0,25 ± 0,04 (b)	1,39 ± 0,04 (c)
	MPE	0,34 ± 0,01 (c)	0,54 ± 0,005 (d)	0,28 ± 0,004 (d)	0,81 ± 0,006 (bc)	114,1 ± 28,0 (b)	197,7 ± 83,6 (ab)	1,61 ± 0,04 (d)	1,49 ± 0,04 (a)	0,29 ± 0,04 (b)	1,33 ± 0,04 (c)
Lower layer	Crushed tiles and bricks	1,07 ± 0,03 (ab)	0,12 ± 0,003 (h)	0,27 ± 0,0002 (d)	0,62 ± 0,001 (de)	6,9 ± 1,5 (d)	5,2 ± 1,6 (d)	0,45 ± 0,03 (ef)	0,04 ± 0 (d)	0,03 ± 0 (e)	0,12 ± 0 (d)
	MP	1,13 ± 0,02 (a)	0,14 ± 0,006 (h)	0,24 ± 0,002 (de)	0,60 ± 0,009 (e)	11,3 ± 0,4 (d)	10,3 ± 2,9 (d)	0,39 ± 0,04 (f)	0,09 ± 0,04 (cd)	0,04 ± 0,04 (de)	0,1 ± 0,04 (d)
	MPE	1 ± 0,1 (b)	0,16 ± 0,004 (gh)	0,26 ± 0,003 (de)	0,64 ± 0,004 (d)	13,0 ± 3,9 (d)	15,4 ± 8,1 (d)	0,45 ± 0,04 (ef)	0,12 ± 0,04 (cd)	0,05 ± 0,04 (de)	0,11 ± 0,04 (d)
	Shredded wood	0,17 ± 0,03 (d)	0,20 ± 0,005 (g)	0,71 ± 0,0001 (a)	0,88 ± 0,002 (a)	51,4 ± 14,3 (c)	69,0 ± 17,7 (cd)	5,92 ± 0,67 (a)	0,26 ± 0,07 (bcd)	0,13 ± 0,03 (cd)	1,27 ± 0,13 (c)
	OP	0,14 ± 0,02 (d)	0,31 ± 0,004 (f)	0,57 ± 0,004 (b)	0,90 ± 0,001 (a)	105,1 ± 21,9 (b)	112,3 ± 12,0 (c)	5,1 ± 0,04 (b)	0,54 ± 0,04 (bc)	0,25 ± 0,04 (b)	1,97 ± 0,04 (a)
	OPE	0,16 ± 0,03 (d)	0,38 ± 0,007 (e)	0,47 ± 0,008 (c)	0,88 ± 0,002 (a)	101,8 ± 17,6 (b)	143,1 ± 34,1 (bc)	3,04 ± 0,04 (c)	0,65 ± 0,04 (b)	0,23 ± 0,04 (b)	1,6 ± 0,04 (b)

Des Technosols construits à partir de produits résiduaux urbains : services écosystémiques fournis et évolution

(b)	Characteristic	pH	CaCO ₃ total	Electrical conductivity	Cation Exchange capacity	Organic Matter Content	C:N ratio	Total N	N min (N-NO ₃ + N-NH ₄)	P Olsen	Potassium total	Mn	Fe
	Unit		mg.kg ⁻¹	mS.cm ⁻¹	cmol.kg ⁻¹	g.kg ⁻¹	-	g.kg ⁻¹	g.kg ⁻¹	g.kg ⁻¹	g.kg ⁻¹	mg.kg ⁻¹	mg.kg ⁻¹
Upper layer	Mix	8 ± 0,2 (d)	33,3 ± 7,2 (c)	1,45 ± 0,03 (a)	33,5 ± 5,8 (d)	531 ± 9,5 (d)	12,1 ± 0,4	25,5 ± 0,5 (b)		1,59 ± 0,04 (a)	1,92 ± 0,04 (a)	40,7 ± 0,9 (a)	2026,6 ± 92,3 (a)
	OP	8,1 ± 0,1 (cd)	78,3 ± 4,4 (a)	0,34 ± 0,07 (c)	53,0 ± 7,2 (ab)	478,3 ± 10,2 (e)	10,0 ± 0,3	26,9 ± 1,3 (a)	0,058 ± 0,028	0,95 ± 0,04 (b)	1,34 ± 0,12 (b)	40,8 ± 1,3 (a)	1470 ± 65,5 (d)
	OPE	8,1 ± 0,1 (cd)	69,4 ± 12 (a)	0,36 ± 0,03 (c)	45,3 ± 5,1 (c)	467 ± 23,8 (e)	10,3 ± 0,5	25,5 ± 0,4 (b)	0,114 ± 0,044	0,95 ± 0,13 (b)	1,38 ± 0,09 (b)	40,6 ± 1,1 (a)	1756,6 ± 140,48(b)
	MP	8,1 ± 0,1 (cd)	65,9 ± 3,1 (ab)	0,33 ± 0,05 (c)	56,0 ± 7,3 (a)	476 ± 3,5 (e)	10,0 ± 0,2	26,5 ± 0,4 (ab)	0,05 ± 0,0091	0,9 ± 0,12 (b)	1,31 ± 0,05 (b)	40,6 ± 1,7 (a)	1516,6 ± 72,3 (cd)
	MPE	8,1 ± 0,1 (cd)	67,7 ± 7,8 (a)	0,34 ± 0,04 (c)	49,6 ± 4,8 (abc)	464,7 ± 15,0 (e)	10,1 ± 0,1	26,6 ± 0,4 (ab)	0,065 ± 0,0276	0,86 ± 0,21 (bc)	1,34 ± 0,04 (b)	40,6 ± 2,5 (a)	1673,3 ± 185,0 (bc)
Lower layer	Crushed tiles and bricks	10,4 ± 0,2(a)	54,1 ± 3,6 (b)	0,06 ± 0,01 (d)	2,0 ± 0,9 (f)	8,0 ± 1,5 (f)	105,1 ± 10,9	0,1 ± 0,0 (f)		0,02 ± 0 (f)	0,88 ± 0,03 (c)	7,5 ± 0,9 (e)	718,3 ± 33,0 (f)
	MP	10,3 ± 0,2 (ab)	70,8 ± 3,1 (a)	0,09 ± 0,03 (d)	1,4 ± 0,2 (f)	16,2 ± 1,8 (f)	21,3 ± 1,4	0,3 ± 0,0 (f)	0,003 ± 0,0026	0,02 ± 0 (f)	0,91 ± 0,02 (c)	9,9 ± 0,7 (e)	998 ± 169,7 (e)
	MPE	10,1 ± 0,2 (b)	73,4 ± 15,6 (a)	0,08 ± 0 (d)	1,41 ± 0,1 (f)	18,8 ± 1,4 (f)	18,9 ± 4,3	0,5 ± 0,2 (f)	0,003 ± 0,0022	0,03 ± 0,01 (f)	0,9 ± 0,02 (c)	8,9 ± 0,3 (e)	764,3 ± 49,9 (f)
	Shredded wood	6,9 ± 0,1 (e)	1,8 ± 0,6 (e)	0,42 ± 0,07 (bc)	17,4 ± 1,7 (e)	813,7 ± 10,5 (a)	94,5 ± 11,7	5,0 ± 0,6 (e)		0,41 ± 0,03 (e)	0,58 ± 0,1 (e)	14 ± 2,4 (d)	273,3 ± 33,1 (g)
	OP	8,2 ± 0,2 (cd)	16,5 ± 8,4 (d)	0,5 ± 0,16 (b)	37,2 ± 2,2 (d)	829 ± 38,7 (b)	36,8 ± 5,6	12 ± 1,4 (d)	0,004 ± 0,0049	0,59 ± 0,05 (d)	0,73 ± 0,18 (d)	22,7 ± 1,6 (c)	665,3 ± 132,8 (f)
	OPE	8,3 ± 0,1 (c)	29,1 ± 2,4 (cd)	0,49 ± 0,02 (b)	47,0 ± 2,0 (bc)	754,3 ± 13,9 (c)	24,7 ± 1,9	16,2 ± 1,0 (c)	0,027 ± 0,0162	0,71 ± 0,09 (cd)	0,91 ± 0,08 (c)	29,2 ± 2,3 (b)	1086,6 ± 130,5 (e)

Tableau 17 (a): Physical characteristics of the parent materials (T0) and of the Technosol after one year. **(b) :** Chemical characteristics of the parent materials (T0) and of the Technosol after one year.

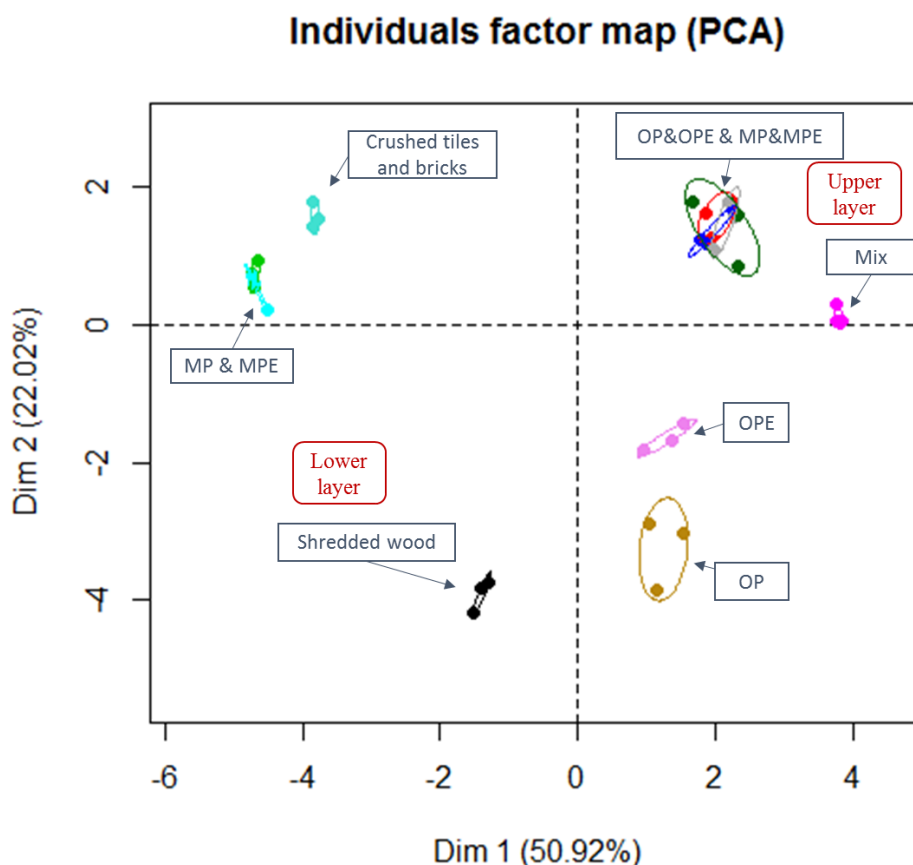


Figure 55 : Principal component analysis of physical and chemical Technosol characteristics. $n = 3$, data used: bulk density, pH, CaCO_3 , K, Fe, P_2O_5 , Mn, N and organic carbon contents, CEC, electrical conductivity, porosity, water and void indexes at pF₁.

Regarding chemical parameters, the mix exhibited alkaline pH (**Tableau 17-b**) as well as the shredded wood lower layer. The mineral lower layer had a very alkaline pH (> 10), in relation to that of its parent material. The upper layer mix had high organic matter contents, with C/N ratio close to 10. Sharp differences were observed between the two materials of the lower layer: shredded wood having higher organic matter content (813.67 g.kg^{-1}), than the crushed tiles and bricks (7.96 g.kg^{-1}). C/N ratio were of the lower layers were initially very high and all above 18.85 after one year. The mix showed high nutrients contents both at T0 and after one year (**Tableau 17-b**), much higher than that of lower layers. Lower layers of shredded wood had higher nutrient contents, EC and CEC and lower CaCO_3 content than mineral lower layers.

The properties of the upper and lower layers evolved in one year when compared to parent materials. There was a significant decrease of organic matter content, C/N ratio, Fe, CaCO_3tot , EC, P_2O_5 , K in the upper layers, whatever the treatment (see **Tableau 17**). Regarding physical characteristics, the upper layer exhibited a stable total porosity, a significant increase of the air filled porosity at pF1 and a decrease of WHC except for MP. In parallel, an increase in macro-porosity ($>300\mu\text{m}$) and a decrease of micro-porosity ($9.5\text{-}0.3\mu\text{m}$ and $<0.3\mu\text{m}$) was observed. Concerning the lower layers, CaCO_3 contents increased

in both materials and pH became basic for both materials, the C/N ratio largely decreased, while contrasted trends were observed for other characteristics. Almost all nutrients contents increased over time for the shredded wood while they did not change for crushed tiles and bricks. Total porosity of the lower layers did not evolve significantly in one year (except for MPE with a slight increase). Air-filled porosity and WHC remain stable for crushed tiles and bricks while in shredded wood layers observed respectively air-filled porosity slightly decreased and WHC slightly increased. Porosity evolved differently in upper and lower layers of O treatments: macro-porosity ($>300\mu\text{m}$) increased in all upper layers and decreased in lower layers. Micro-porosity ($9.5\text{-}0.3$ and $<0.3\mu\text{m}$) decreased in all upper layers (except for OPE $<0.3\mu\text{m}$) but increased in OP and OPE lower layers ($9.5\text{-}0.3$ and $<0.3\mu\text{m}$). The porosity of MP and MPE lower layers did not change over time. The effect of worms on chemical or physical parameters of the different layers of Technosols was very small if any. Micro-porosity ($<0.3\mu\text{m}$) and macro-porosity ($>300\mu\text{m}$) and OC contents were slightly smaller with earthworms (**Tableau 17-a**).

II.2. Root profile

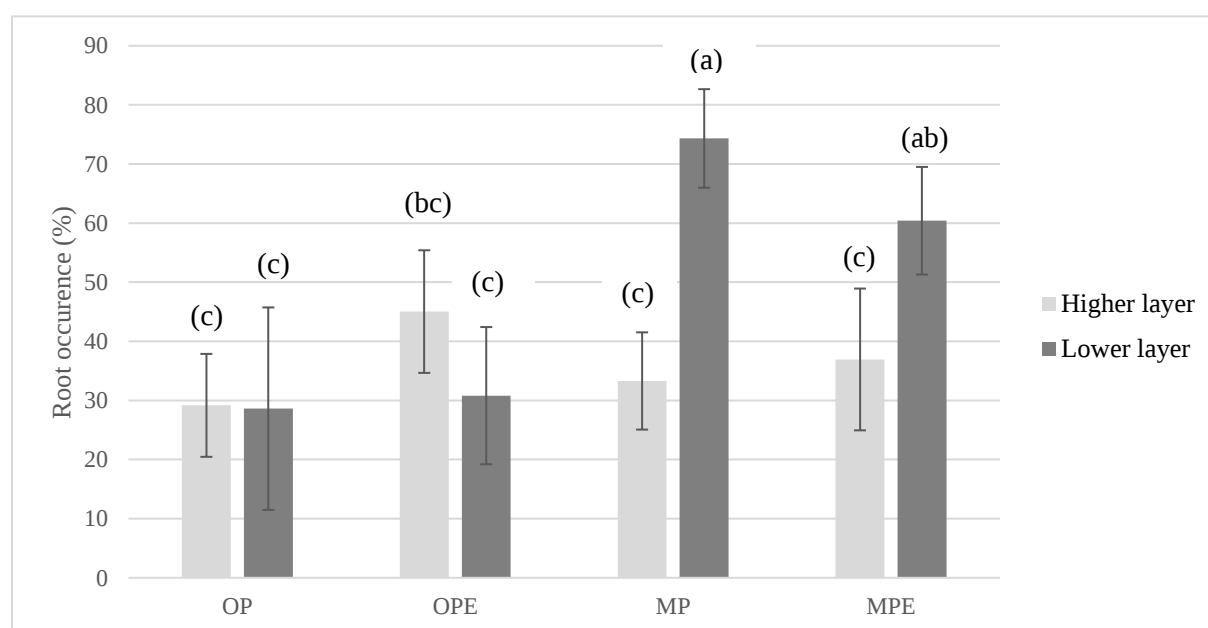


Figure 56: Root occurrence after one year of production.

Roots occurrence (**Figure 56**) did not differ in the upper layers between treatments. In the lower layers, root occurrence was higher in crushed tiles and bricks compared to shredded wood. No signs of root necrosis were observed.

II.3. Nitrogen mineralization

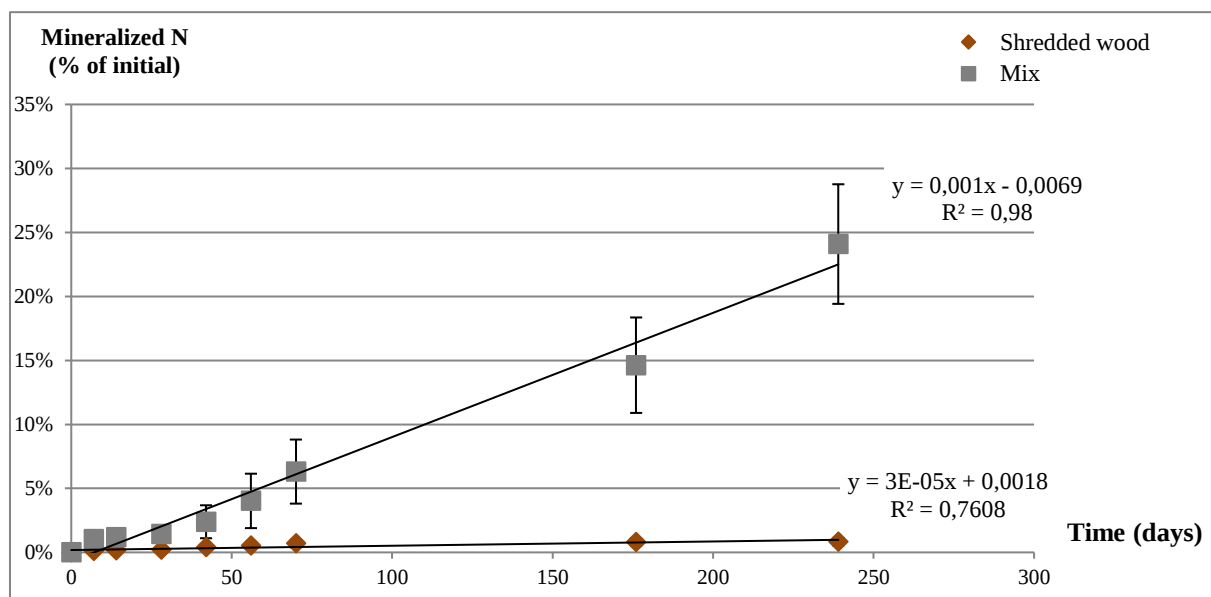


Figure 57 : Nitrogen mineralization kinetics of the Technosols parent materials.

In 239 days of incubation, which is equivalent to a field year in our climatic conditions (see above I.6), shredded wood released 0.048 ± 0.017 g of N kg^{-1} dry matter corresponding to 0.83% of its initial N content (**Figure 57**) while the upper layer mix, released 6.1 ± 1.2 g of N per kg^{-1} dry matter, i.e. nearly 25% of its N stock.

II.4. Nutrients stocks

		Total N	Potentially mineralized N in 1st year	Available P (P ₂ O ₅ Olsen)	Total K
		kg.m ⁻²	kg.m ⁻²	kg.m ⁻²	kg.m ⁻²
Cultural annual needs (ITAB 2017)		0.053	0.053	0.026	0.091
OP	T0	1,69 ± 0,13	0,36 ± 0,04	0,11 ± 0,01	1,34 ± 0,09
	1 year	1,44 ± 0,03		0,06 ± 0,005	0,78 ± 0,13
OPE	T0	1,64 ± 0,06	0,35 ± 0,02	0,11 ± 0,004	1,3 ± 0,04
	1 year	1,41 ± 0,06		0,06 ± 0,01	0,8 ± 0,1
MP	T0	1,72 ± 0,2	0,41 ± 0,05	0,11 ± 0,01	2,84 ± 0,19
	1 year	1,23 ± 0,15		0,04 ± 0,01	2,26 ± 0,25
MPE	T0	1,46 ± 0,18	0,35 ± 0,04	0,09 ± 0,01	2,63 ± 0,08
	1 year	1,23 ± 0,1		0,04 ± 0,002	2,02 ± 0,08

Tableau 18 : Nutrient reserves in the Technosol compared to estimated cultural annual needs of plants

Regarding total nutrients, all treatments had the same initial stock of nutrients except K stocks which were higher in crushed tiles and bricks layers and the MPE treatment which had slightly lower stock for all nutrients considered (**Tableau 18**). Stocks of nutrients were overwhelmingly present in the upper layers, which represented for example respectively 89% of the total N and 86% total K stock of O treatment and 99% of the total N and 97% of total K in M treatment at T0. In one year the stocks of elements decreased, in average 31% for K (with a higher loss for O treatments: 42% vs 20% for M) and 19% for nitrogen.

Only a fraction of total nutrients was estimated to be available i.e. circa 21-24% of N during the 1st year, when considering N mineralized in the laboratory as a proxy for available N (**Figure 57**). Due to still missing data, we will only consider potentially mineralized N and available P₂O₅. Over time available P decreased in average by 50%, higher loss were observed for M treatments with in average 60% against 45% for O. When potentially available stocks of nutrients were compared to potential nutrients exports by the vegetables (ITAB 2017), they were in average (all treatments) 2.8 times higher for N and 3 times higher for P. Consequently total stocks of nutrients were even higher compared to estimated annual exports by plants.

Estimated nutrients exports by plants (using ITAB references (ITAB 2017); **Tableau 18**) represented in average 20% of the mass loss for N, 48% for P₂O₅Olsen and 16% for total K with small variations among treatments. Only 14% of the estimated quantity of nitrogen available through mineralization during the first year was necessary for plant requirement, when comparing to ITAB references (ITAB 2017).

II.5. Earthworms abundance

The inoculated populations developed raising in terms of individual numbers by 5 and 11 folds respectively for M and O. After 1 year, earthworm population reach 188 ± 176 individual (adults + juvenile) for MPE against 418 ± 213 individuals for OPE.

III. Discussion

III.1. Technosols fertility

Overall the constructed Technosols appeared fertile: they allowed a satisfying growth of the vegetables in terms of yields (**Tableau 14**) with no visual sign of nutrient deficiency. Roots colonized the two layers, showing no sign of necrosis and the Technosols contained stocks of potentially available nutrients much higher than vegetable needs or exports over one year (**Tableau 18**).

The properties of the Technosols can be compared to that of external references. The search of partial or total substitutes for peat has led to a significant body of literature defining the optimal range of characteristics for a growing media in horticulture (Hartz et al. 1996; Abad et al. 2001; Raviv 2005; van der Gaag et al. 2007). The upper layers of our Technosols exhibited physical characteristics in the range of optimal values proposed by Abad et al. (2001), in terms of bulk density (ref.: $<0.4\text{g.cm}^{-3}$), water holding capacity (ref.: 55-70% vol.), air-filled porosity (ref.: 20-30% vol.) and total porosity (ref.: $>85\%\text{vol.}$). However, chemical characteristics of the upper layer were not in the optimal range of Abad et al. (2001), with higher pHs (ref.: 5.3-6.5), lower organic contents (ref.: $>80\%$) and lower C/N ratio (ref.: 15-20), except for electrical conductivity of the upper layer after one year (optimal range $\leq 0.5\text{mS.cm}^{-1}$). Nevertheless, other reference values could be found in the literature regarding for instance EC $[0.76-4.0]\text{ms.cm}^{-1}$ from Burnett et al. (2016). The lower layers of our Technosol exhibited higher pH and C/N ratio than this reference, but optimal electrical conductivity. While for physical parameters, shredded wood was in the optimal range for dry bulk density, air-filled porosity and total porosity (Abad et al. 2001) it had a too low water retention capacity and the crushed tiles and bricks layer did not have optimal physical characteristics, except air-filled porosity. This comparison highlights the complementary of the materials used in our upper and lower layer, i.e. as nutritive and skeleton layers. The present Technosols present favourable characteristics when considered as a whole (assembly of both layers) except for the too high pH and for the initial value of electrical conductivity of the upper layer. However, as other reference values with a larger range exist, the notion of non optimal value could be discussed.

Another set of references comes from green roofs professionals (Kazemi and Mohorko 2017), with the FLL (Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau) Guidelines (FLL 2008), that recommend to use substrates with given characteristics. Regarding these criteria, the upper layers were within acceptable values for physical parameters ($\text{WHC} \geq 45\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$; $\text{AFP} \geq 10\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$), for pH (pH $[6 - 8.5]$, total potassium ($\text{K}_{\text{tot}} [0.97-1.95\text{g.kg}^{-1}]$) but were too rich in organic matter and nitrogen (organic matter content $[124-251\text{g.kg}^{-1}]$; total N $[0.11-0.22\text{g.kg}^{-1}]$). Crushed tiles and bricks exhibited optimal characteristics for these references except for WHC and pH that are respectively too low and high. Shredded wood was below required values for WHC and too rich in organic matter and nitrogen. That higher layer and shredded wood were too rich in organic matter compared to the green roof substrate references is not surprising as non-productive green roofs are usually planted with small succulent plants that have small nutrient needs. Furthermore high organic matter contents could lead to substrate shrinkage and leaching of nutrients in the runoff (Rowe et al. 2006). There is thus a mismatch between this two repositories (horticulture VS green roof guidelines) and our productive rooftop system. That can be explained by contrasted conditions and objectives: achieving a high biomass production of short-term cropping with limited substrate volume, using mineral fertilizers and irrigation for

horticulture on the one hand (horticulture), allowing a low biomass permanent plant cover with no management operations in the case of green roofs on the other hand. In our case the objectives were both to allow for a high biomass production and minimize inputs (no mineral fertilizers). This explains why we selected a compost with a low C/N ratio for example.

Compost are known to be a potential source of trace metal elements (Murray et al. 2011), However, the biowaste compost and the spent mushroom substrate used in this experiment exhibited trace metal contents well below the standards for potting media (AFNOR - NF U 44-551) and in addition, the high pH in the Technosols is expected to limit trace metal elements mobility and bioavailability (Olowoyo and Lion 2016). Nevertheless, contrasted results could be found regarding relationship between heavy metals mobility and organic matter. The high portion of dissolved organic matter observed in the mix (data not shown), known for its high binding capacity with any metal ion (Stevenson 1994 in (Murray et al. 2011)), could affect positively or negatively trace metal element availability. This aspect requires more research effort in the future.

We choose here to build our Technosols in two layers in order to separate the functions expected from each of them: an upper nutrient and water providing layer and a lower aeration and anchoring layer. Indeed, the upper layer was very rich in nutrients and acted as a water reserve, while still being well aerated (**Tableau 17**). For both treatments, lower layers played a significant role as draining materials, with shredded wood exhibiting higher retention rate, air-filled porosity and total porosity than crushed tiles and bricks. Nehls et al. (2012) demonstrated the potential of bricks to store and deliver water as they observed roots entering the bricks and measured of 0.19 to 0.42 cm³.cm⁻³ water holding capacity at pF1, i.e. higher values than our crushed tiles and bricks (0.12 cm³.cm⁻³). They also demonstrated the weak impact of brick to soil chemical characteristics due to their low abundance in fine sized constituents. Benito et al. (2006) showed that shredded wood were appropriate growth substrates when mixed with nutrients richer materials as they exhibit high aeration rate and decompose slowly. However, in our case, the higher percentage of air-filled porosity in the shredded wood layer compared to crushed tiles and bricks did not seem to impact yield indicators. The high rate of organic matter of the upper layer could be one explanation of this lack of effect of the skeleton layer on yields as well as the relatively short time of experimentation. In fact, plants might mostly, as shown in our table comparing plant nutrient needs vs stocks, find enough nutrients – air – and water in the upper layer. The initial physical characteristics of the different layers of the Technosols were mainly preserved during the first year.

Earthworms are known to affect biodegradation of organic matter and soil structure (Blouin et al. 2013; van Groenigen et al. 2014). Here we observed no effect of the earthworms on either characteristic measured, while the populations increased over time. This lack of effect could be attributed to the ecological type of earthworms, as epigeic earthworms were used here. These earthworms, that inhabit litters and composts, fragment organic matter particles and may thus indirectly modify the pore size

distribution, but have no burrowing effect. The absence of effect could also be explained by the abundance of organic matter at their disposal and the low duration of the experiment, so that they could not process much of the available organic matter.

III.2. Constructed Technosols made of organic wastes for food production

Measured yields (see chapter III – partie 2) were equivalent to that of French vegetables producers (ITAB 2017) as well as to rooftop productions based on soil (Orsini et al. 2014), which can be explained by the high chemical and physical fertility of the Technosols. Our results show the interest of using urban waste as a component of Technosol (Eksi et al. 2015; Grard et al. 2015).

Surprisingly, we found no differences in yields between treatments while the lower skeleton layers had contrasted chemical and physical properties between crushed tiles and bricks and shredded wood (see **Tableau 17** & **Tableau 18**). The low available water content and the alkaline pH (pH >10) of crushed tiles and bricks did not seem to impact the vegetables growth as reported in other cases (Ampim et al. 2010). However, the low water retention was compensated by a frequent irrigation. Moreover, roots were observed to colonize extensively all layers and materials. The higher root density in the M treatment compared to the O could be due either to a methodological bias (difficulty to count roots in coarse material) or to a more important exploration of crushed tiles and bricks layer due to a lack of water. The very favourable properties of the upper layer providing air, water and nutrients could also explain the little influence of the nature of the lower layer on yields.

III.3. Conceiving fertile technosols for low input agriculture: managing the trade-off of biodegradation

Valorizing waste has been more and more recognized as a suitable and feasible solution for greening cities (Yilmaz et al. 2016). Our results suggest as feasible the idea that soil fertility could be achieved, based only on urban waste. In this study, we hypothesized that high yields of a variety of vegetables could be obtained by using Technosols constructed from cities wastes, without using any mineral fertilizer input. The challenge was then to provide a physically favourable environment for plant roots and provide nutrients (N, P, K) in sufficient amounts for vegetable growth during several cropping cycles. In this case, the provision of nutrients is ensured by the biodegradation and mineralisation of the organic matter of the Technosol while the maintenance of the initially favourable physical properties (high porosity, high air-filled porosity at maximum WHC, high available water content) requires that the properties and the arrangement of organic particles is somehow maintained over time, i.e. a priori

that they are not biodegraded. There is thus a trade-off between functions expected on the organic matter, either positively affected by their biodegradation or negatively affected by it.

The mineralization kinetics of N measured in vitro suggest an important biodegradation of the upper layers over one year. Plants growth and nutrients stock evaluation showed that the amounts of initial total or available nutrients were not limiting. The measured losses of N, P, K from the initial stocks were much higher than potential exports, showing that the provision of nutrients was ensured, by biodegradation (N, P) and by ionic exchanges (K), which could be also linked to the biodegradation of organic matter with high CEC. However, physical properties were only marginally affected by one year of cultivation. Our results suggest consequent loss of nutrients that could be associated either with three major processes: (i) nutrients leaching, (ii) plants uptake or (iii) volatilization for nitrogen only. Those process are either due to biodegradation and/or chemical weathering of parental materials. As the loss of nutrient elements was much higher than exports, we hypothesize that there were losses by denitrification (N) or leaching (N, P, K).

While the trade-off between provision of nutrients by biodegradation and maintenance of physical properties in spite of biodegradation seems to be achieved, another trade-off was revealed: between provision of nutrients by biodegradation and losses of water which could potentially generate water eutrofication. If function such as air or water depollution are not expected at first from productive green roof as it could be expected from non-productive green roof (Li and Babcock 2014; Wang et al. 2017). The primary objective of non-water quality depletion from green roof installation remains a key issue. Then, the management of this second trade-off is crucial. This trade-off should be at the center of Technosol design for productive green roof. Nevertheless, to optimize this trade-off and reduce nutrients leaching, Technosol composition and structuration should be adapt. Different levers to manage it, among parameter or technical choice, could be distinguish:

- Nature of the organic matter in the upper layer: utilise a less biodegradable organic matter. More mature composts could be used
- Abundance of the organic matter in the upper layer : mix the nutrient layer with inert constituents (e.g. bricks), make a thinner upper layer (e.g. 10 cm)
- Recycle the leaching solutions by pumping them and irrigating the technosols with them.

Article conclusion

Designing productive Technosol is a challenge that stand among trade off understanding and equilibrium. We evaluated the benefits and limits of using urban waste to build up productive Technosols, and showed (i) the feasibility of this type of design and (ii) a major challenge regarding the trade-off between biodegradation, plant needs and potential nutrient leaching. We showed a small evolution of physical fertility parameters coupled despite an important biodegradation that caused an important leaching. Four potential levers could to diminish this leaching: the nature and quantity of the organic matter used and more generally the nature of the parental materials, the type and density of plants employed and cropping practices as summarized in **Figure 58**. A specific research effort is needed to manage the identified trade-offs when using large quantities of organic matter. Finally, we have seen in this study that the classical standard for green roof or horticultural substrate, i.e. classical green roof mix or potting soil are not well suited to the specific constraints of productive rooftop. A research effort is needed to define appropriate standard for productive green roof Technosol.

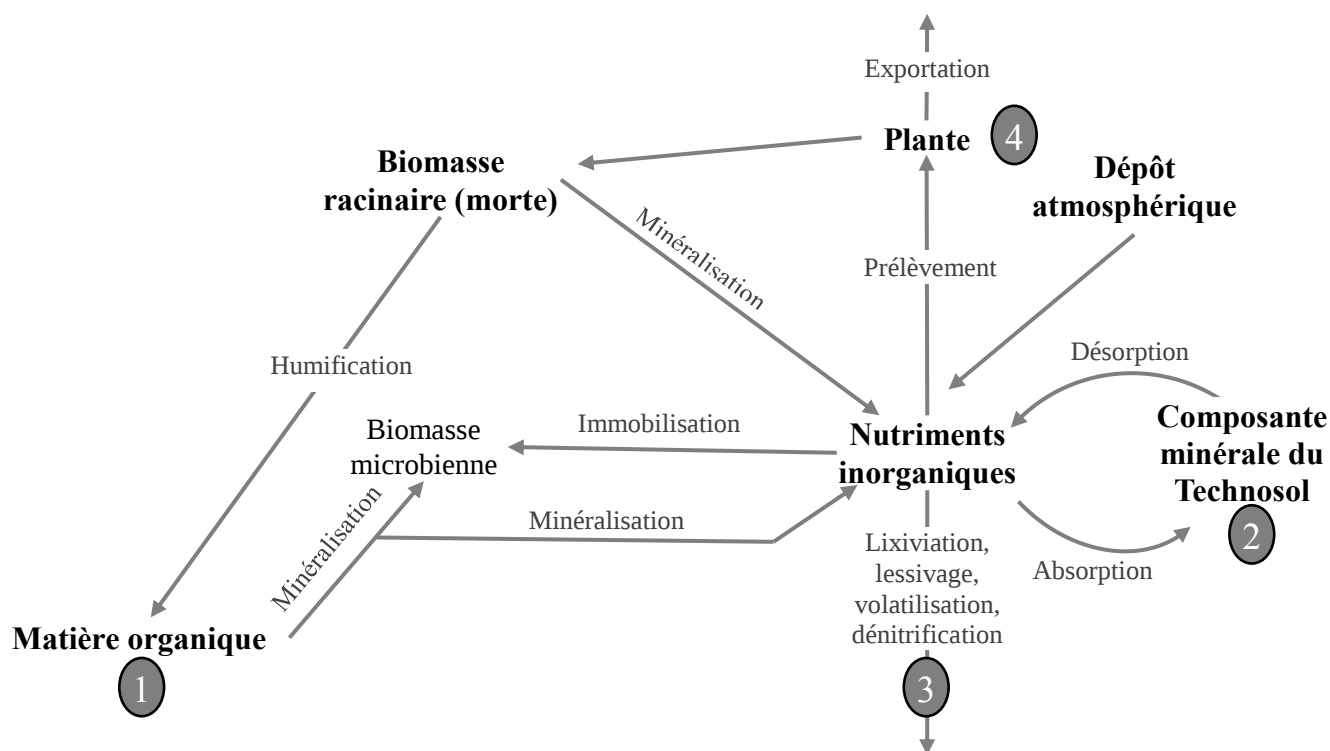


Figure 58 : Modèle conceptuel du devenir des nutriments au sein d'un Technosol productif. Issu et modifié à partir de Myers et al. (1994).

Conclusion Chapitre IV

Comme nous avons pu le voir au sein de ce chapitre, la nature de la couche squelette des Technosols (organique ou minérale) et/ou la présence de vers de terre n'ont eu qu'un faible impact sur ses caractéristiques physiques et chimiques et donc sa fertilité. Au cours de la première année la fertilité des Technosols semble maintenue : la porosité des Technosols évolue peu –la fertilité physique est donc stable, et d'un point de vue chimique les stocks de nutriments ont baissé mais l'importance des stocks initiaux, permet néanmoins de conserver une fertilité chimique adéquate pour la deuxième année.

Nos résultats ont souligné l'existence d'un double compromis, au sein du Technosol, du point de vue la fertilité. Le premier compromis se situe entre biodégradation/minéralisation nécessaire à l'alimentation minérale des plantes et maintien des propriétés physiques favorables à la croissance des plantes. Cette double exigence apparaît satisfaite durant cette première année. Néanmoins, l'existence d'un deuxième compromis, entre biodégradation/minéralisation et lixiviation interroge sur la durabilité des Technosols en place. En effet, cette lixiviation, bien qu'ayant peu d'effet sur les stocks de nutriments au cours de la première année, est une source de pollution des eaux. De manière à optimiser ce deuxième compromis nous avons, en discussion de ce chapitre, proposé un certain nombre de leviers d'action.



Bois broyé, compost de déchets verts et résidus de champignonnière. ©Esther Sanyé-Mengual.

Chapitre V : Pédogénèse d'un jeune Technosol

Le sol est un milieu dynamique en trois dimensions dont l'évolution est régie par de nombreux facteurs. Nous venons de décrire et analyser la fertilité d'un Technosol, laquelle devrait être influencée par l'évolution du Technosol. Par ailleurs, étudier la pédogénèse d'un Technosol, c'est mieux comprendre les mécanismes qui régissent son fonctionnement, prédire son évolution et permettre d'améliorer sa conception. C'est pourquoi dans cette deuxième partie, nous analyserons plusieurs processus pédogénétiques à l'oeuvre lors de la première année d'un Technosol.

Cette partie visera à répondre aux questions suivantes :

- Durant la première année d'implantation, comment des Technosols formés à partir de matériaux riches en matière organique évoluent-ils ? Quels processus de pédogénèse peut-on observer et quelle est leur importance relative?
- Quel est le bilan carbone au sein du Technosol durant la première année d'implantation?
- Quel est l'impact des matériaux parentaux ou des plantes cultivées sur les premières étapes de pédogénèse ?

Introduction

Les sols urbains font l'objet d'une attention récente et croissante, en particulier pour les services écosystémiques rendus (Morel et al. 2014). Ces sols sont regroupés dans la catégorie des SUTMA (Soil of Urban, Industrial, Traffic, Mining and Military Areas) depuis la création d'un groupe de travail éponyme en 1998 (Rossiter 2007). Les propriétés des SUTMA sont avant tout marquées par l'impact de l'homme sur leurs évolutions et structures. Ils se caractérisent ainsi par une forte hétérogénéité au sein du profil lié pour partie à la présence d'artéfacts grossiers (i.e. matériel construit ou substantiellement modifié par l'homme lors d'activité industriel ou artisanal), un pH élevé dû à la présence de matériaux alcalins et des taux de matières organiques voire de contaminants élevés (De Kimpe and Morel 2000; Joimel et al. 2016).

Depuis 2006, la notion de Technosol a été introduite et reconnue au sein de la classification internationale des sols WRB. Cette catégorie regroupe l'ensemble des sols dont les propriétés sont dominées et issues pour tout ou partie de l'activité humaine et dont les matériaux sont d'origine technogénique (i.e : processus ou substance créée par la technologie humaine) (Rossiter 2007; IUSS Working Group WRB 2014). Un Technosol est défini soit par (i) la présence de plus de 20% (en volume ou poids moyen) d'artéfacts dans les 100 premiers centimètres du sol, soit (2) la présence d'une

membrane presque continue de type géo-membrane ; soit (3) la présence de matériaux techniques durs. Parmi les Technosols, les sols construits résultent de l'apport délibéré de matériaux ou artefacts, assemblés dans l'objectif de recréer la ou les fonctions attendues. Différents qualificatifs sont utilisés pour les Technosols (Ekranic, Linic, Urbic etc.). Cette terminologie est très peu employée dans le domaine des toitures végétalisées, où les Technosols pourraient être qualifiés d'Isolatic Technosol (Bouzouidja et al. 2016). Ce qualificatif souligne la présence d'un matériau technique à la base du Technosol (i.e. une géo-membrane), ainsi que l'origine technique des matériaux parentaux (IUSS Working Group WRB 2014).

Les Technosols construits contribuent au recyclage de différents déchets, notamment urbains, et de leurs nutriments dans des contextes très variés. L'assemblage de matériaux recyclés pour reconstituer un sol fonctionnel (au regard de son usage) est ainsi exploré dans le domaine des plantations d'arbres en villes (Grosbellet et al. 2011), de la restauration de sols ou de sites pollués (Camps Arbestain et al. 2008; Séré et al. 2010) ou de l'utilisation de sédiments dragués (Macía et al. 2014). La conception d'un Technosol construit repose sur trois éléments clés : (i) le choix des matériaux, (ii) l'agencement des matériaux et (iii) l'évolution dans le temps de ces derniers au regard des fonctions attendues. Des problèmes environnementaux, liés à la création du sol, peuvent-être évités si le type de matériaux et leurs mélanges sont adaptés au contexte et à l'objectif du sol recréé.

Dans le cas d'une toiture végétalisée, si de nombreuses études concernent les matériaux potentiellement utilisables (Friedrich 2008; Berretta et al. 2014; Young et al. 2014; Stovin et al. 2015; Ondono et al. 2016; Krawczyk et al. 2017), peu d'études portent sur l'utilisation de matériaux recyclés en tant que Technosol (Molineux et al. 2009; Eksi et al. 2015; Bates et al. 2015) et encore moins en regardant leur utilisation pour une toiture productive (Eksi et al. 2015; Grard et al. 2015). Par ailleurs, bien que la pratique des mélanges de différents matériaux au sein d'un substrat soit courante, très peu d'études traitent de la question de l'agencement et de la proportion des différents matériaux (Nagase and Dunnett 2011; Eksi et al. 2015). Le même constat peut-être fait concernant la réalisation de Technosols construits (Rokia et al. 2014) et des supports de culture pour toitures potagères d'autant plus, qu'une toiture productive se différencie d'une toiture végétalisée non productive sur deux points essentiels (i) le type de plantes cultivées et (ii) l'entretien de la toiture.

Tout comme les autres Technosols (Séré et al. 2010; Huot et al. 2015; Leguédois et al. 2016), les substrats de toitures végétalisées, constitués de matériaux en déséquilibre avec leur environnement, pourraient subir d'importants et rapides processus de pédogénèse conduisant à une évolution de leurs propriétés physiques et chimiques. Pourtant, rares sont les études sur ce sujet. La plupart se concentrent sur l'implantation de la végétation (Bates et al. 2015) en considérant que les fonctions attendues de la toiture perdureront dans le temps indépendamment de l'évolution du substrat (Bouzouidja et al. 2016). Les quelques études apportant des informations sur la pédogénèse de substrat de toitures végétalisées

(Schrader and Böning 2006; Speak et al. 2013; De-ville et al. 2015; Bouzouidja et al. 2016; De-Ville et al. 2017) montrent des évolutions rapides et très diverses. Ainsi, Schrader et Böning (2006) observent une acidification du sol en parallèle d'une augmentation des teneurs en matière organique et azote au cours du temps. Bouzouidja et al. (2016) observent quant à eux, une diminution des teneurs en carbone organique. Au niveau physique, De-Ville et al. (2017), notent une diminution de la taille des particules du substrat engendrant une augmentation de la capacité de rétention en eau au cours du temps. Ces quelques études montrent bien l'existence d'une évolution au cours du temps des substrats en place pouvant impacter les fonctions rendues (De-ville et al. 2015).

La compréhension de l'évolution d'un Technosol au regard du choix des matériaux et des facteurs environnementaux est un élément clé pour comprendre l'impact qu'il peut avoir sur son environnement (et réciproquement), et participe à accroître nos connaissances et compréhensions des sols en général. Au sein des Technosols, les processus observés sont en général les mêmes qu'au sein d'un sol "naturel" mais vont différer par leurs intensités, leurs cinétiques et leurs combinaisons (Huot et al. 2015). D'un point de vue général, cinq facteurs de pédogénèse sont classiquement reconnus: le climat, la topographie, les matériaux parentaux, le temps et les organismes (Samouëlian and Cornu 2008). Des discussions récentes ont suggéré d'y ajouter un sixième : l'homme (Dudal 2005), ce qui paraît particulièrement approprié dans le cas de Technosol construit. Dans le cas de sols construits, des études, portant sur un ou plusieurs facteurs de pédogénèse, ont pu montrer l'influence que peut y avoir la faune du sol (Pey et al. 2013) ou les plantes (Deeb et al. 2017).

Bien que les études sur la pédogénèse des Technosols restent peu nombreuses, différentes phases de pédogénèse ont pu être observées (Séré et al. 2010; Grosbellet et al. 2011). Grosbellet et al. (2011) ont ainsi observé que l'essentiel des évolutions de la matière organique et de structuration se déroulait durant la première année, en lien avec le processus de biodégradation. De la même manière, Séré et al. (2010) après 30 mois d'évolution d'un Technosol construit, notent la différenciation de deux phases de pédogénèse : une première phase marquée par des changements physiques et chimiques importants (compaction, lixiviation d'éléments minéraux solubles), et une seconde phase dont les processus de pédogénèse sont similaires à ceux observés au sein d'un sol naturel (i.e. décarbonatation, agrégation, etc.).

Cette étude se focalise sur la première année d'évolution d'un Technosol construit d'une toiture productive. En s'appuyant sur un dispositif expérimental, l'étude vise à décrire différents processus de pédogénèse précoce et l'impact de deux facteurs (présence de plantes et de vers de terre) sur ceux-ci. Nous faisons l'hypothèse que la nature des matériaux parentaux va engendrer une différenciation dans l'évolution des Technosols et que parmi les processus de pédogénèse possibles, quatre seront à l'œuvre et seront donc étudiés : (i) la biodégradation des matières organiques, (ii) le réarrangement structural, (iii) le transfert d'éléments et de particules au sein du profil et hors du profil par – lessivage et (iv)

lixiviation. Pour cela nous avons caractérisé la biodégradabilité des matériaux utilisés pour construire ces Technosols, mesuré l'évolution du volume total et du volume de différentes classes de taille de pores au sein des Technosols, et établi un bilan de masse global et pour les éléments majeurs C et N.

I. Matériels et méthodes



Figure 59 : Photographie, d'une partie des bacs expérimentaux sur le toit d'AgroParisTech « Bertrand Ney » en août 2016. ©BaptisteGrard

I.1. Site expérimental

L'expérimentation a été effectuée durant un an entre novembre 2015 et 2016 sur la toiture expérimentale « Bertrand Ney » de l'école AgroParisTech (16 rue Claude Bernard, 75005 Paris ; 48°50'24.4"N, 2°20'54.5"E ; **Figure 59**). Le dispositif expérimental fait partie du projet de recherche T4P²³ (Toit Parisien Productif Projet Pilote) visant à étudier les sols de toitures végétalisées productives constituées uniquement de déchets urbains. Le climat est océanique avec une température annuelle moyenne de l'air de 13.49°C (minimum = - 4,3°C ; maximum = 36,8°C), rayonnement solaire moyen

²³ <http://www.agroparistech.fr/T4P-un-Projet-de-recherche-innovant-pour-des-Toits-Parisiens-Productifs.html>

114,5 W.m⁻², humidité de l'air = 72,3% et pluie totale : 657,6 mm (données issues de la station Campbell CR1000 en place sur la toiture).

Le dispositif expérimental est constitué de 36 bacs de culture de 80*80 cm (dimension interne : 71*71 cm). Les bacs sont constitués de planches de bois assemblées à la main, chaque bac a été surélevé à l'aide de palette de manière à placer un réservoir de collecte des eaux de percolation sous ce dernier. La partie basse de chaque bac est équipée d'une membrane en coutchoucs EPDM trouée par un tuyau d'évacuation pour les eaux de percolation. L'organisation de l'ensemble du dispositif est représentée sur la **Figure 60** (a et b).

Les bacs ont été construits durant l'été 2015, remplis avec leurs matériaux parentaux en octobre et laissés jusqu'au 11 novembre 2015 (date officiel du début de l'expérimentation) pour une première humectation et réorganisation avec l'eau de pluie. Les bacs sont espacés de 50 cm. Le dispositif est constitué de 6 traitements (explicité ci-dessous ; voir **Figure 61**) comprenant au temps initial six répliquats. Ces six répliquats sont regroupés par trois dans deux zones chacune soumise selon une répartition aléatoire (voir plan du dispositif expérimental ; **Figure 29**).

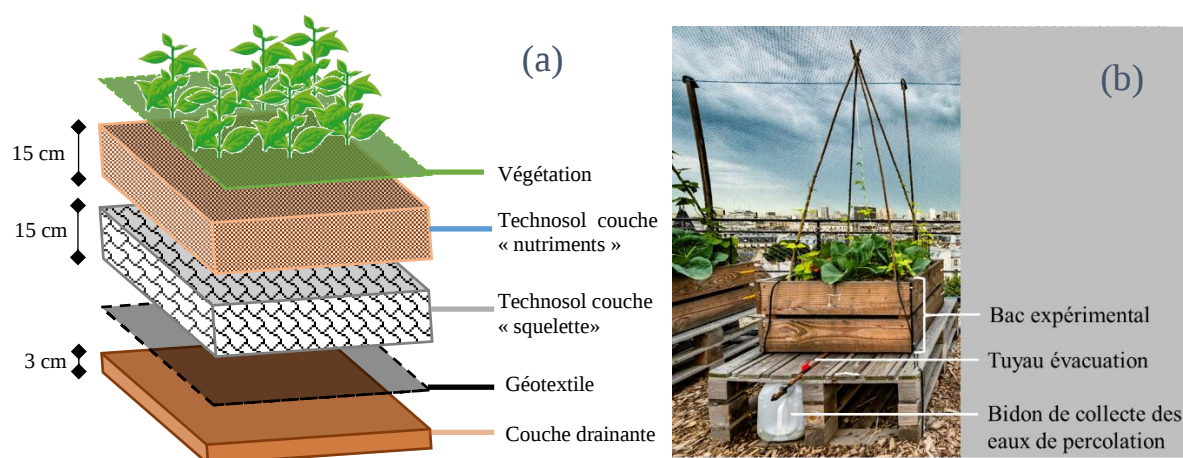


Figure 60 : Schéma d'un bac expérimental ; (a) : vue extérieure et (b) : vue intérieure éclatée des couches le constituant.

I.2. Modèle de Technosol et traitements expérimentaux

I.2.a. Modèle de Technosol

Comme présenté au sein de la **Figure 60 (b)**, les Technosols mis en place sont organisés de deux couches constitutives avec de bas en haut : une couche « squelette » constituée soit de bois broyé soit de briques et tuiles concassées ainsi que d'une couche dite nutritive composée d'un mélange de compost de bio-déchets et de résidus de champignonnière (respectivement 60/40 v/v). Les bacs expérimentaux

sont par ailleurs équipés de 4 couches techniques, de bas en haut, une membrane imperméable en caoutchouc EPDM, une couche de drainage, constituée de briques et tuiles concassées, une couche filtre constituée de géotextile (120 g.m⁻² et diamètre de fuite < 70 µm) et une couche « d'irrigation » avec un système d'aspersion et de goutte à goutte. Dans la suite de cet article, le terme d'horizon sera préféré à celui de couche au vu de l'objectif de l'étude.

I.2.b. Traitements expérimentaux

Six traitements ont été mis en place au sein du dispositif expérimental (**Figure 61**):

- **O** et **M** : 2 traitements sans plante avec un horizon squelette constitué de bois broyé [**O**] ou de briques et tuiles concassées [**M**] ;
- **OP** et **MP** : 2 traitements avec plantes avec un horizon squelette constitué de bois broyé [**OP**] ou de briques et tuiles concassées [**MP**] ;
- **OPE** et **MPE** : 2 traitements avec plantes et inoculé en vers de terre épigés avec un horizon squelette constitué de bois broyé [**OPE**] ou de briques et tuiles concassées [**MPE**].

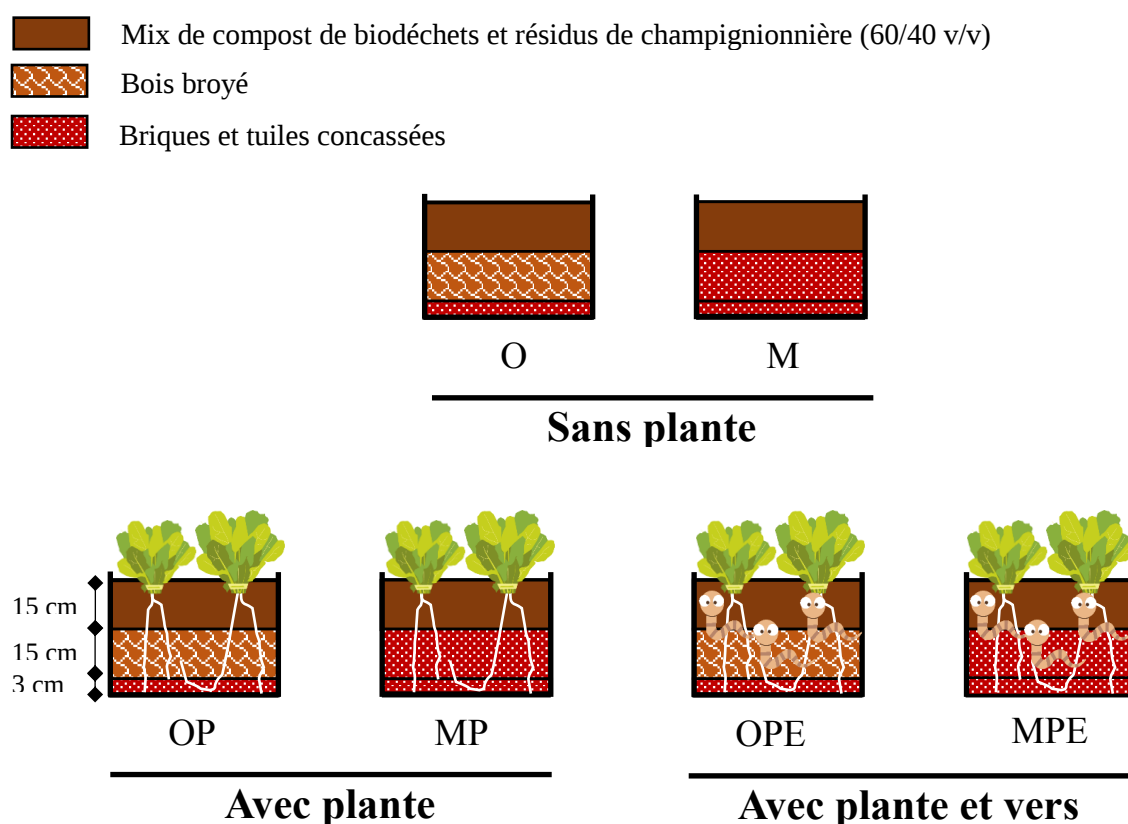


Figure 61 : Schéma des différents traitements expérimentaux mis en place au sein de l'expérimentation n°3.

I.3. Rotation de cultures et irrigation

I.3.a. Rotation de cultures

Durant l'année d'expérimentation, la rotation de cultures visait à favoriser l'association de plantes complémentaires, au niveau racinaire et/ou du développement spatial et/ou en terme de besoins nutritifs (**Figure 62**). Les densités de cultures pratiquées étaient: épinards ⇔ 16 pieds par bac, choux cabus ⇔ 4 pieds par bac, haricots grimpants : ⇔ 5 * 3 pieds par bac et laitues ⇔ 9 pieds par bac.

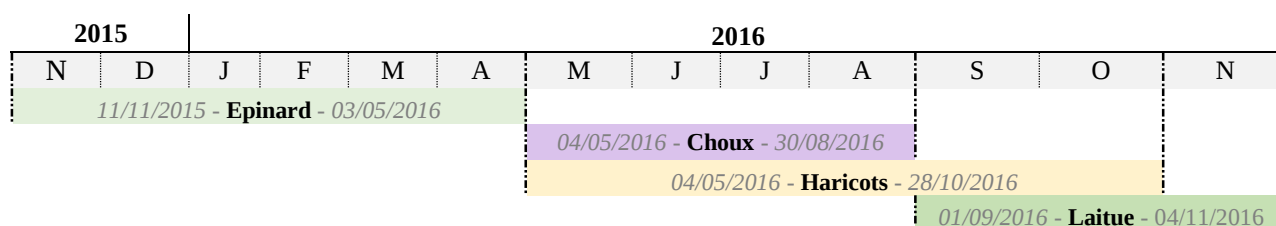


Figure 62 : Calendrier de cultures de l'expérimentation n°3 entre novembre 2015 et 2016.

I.3.b. Entretien des cultures

Après récolte, les racines des plantes ont été laissées sur place. Une opération de binage (profondeur ~10 cm) sur l'ensemble du bac a uniquement été effectuée entre la culture d'épinards et de choux. Les choux et haricots ont été paillés par apport de plaquettes forestières (20-40 mm).

Des attaques de ravageurs ont pu être observées sur les épinards (pucerons), les choux ou haricots (pucerons) ou les laitues (limaces). Pour limiter ces attaques, des traitements au savon noir ont été réalisés sur les choux et du ferramol® a été mis sur les bacs lors de la culture de salade. Les haricots ont été l'une des cultures qui a eu le plus de mal à s'implanter avec des phénomènes d'assèchement et de jaunissement observés, sans doute liés à une irrigation insuffisante durant l'été 2016.

I.3.c. Irrigation

Comme indiqué en **Figure 60 (b)**, deux systèmes d'irrigations constitués de 4 asperseurs à 90° et d'un système de goutte à goutte, ont été installés. Le système d'irrigation a été mis en marche du 04/05/2016 au 24/10/2016 et tous les bacs ont reçu la même quantité d'eau durant cette période. Le système d'irrigation étant connecté au circuit d'eau potable et connecté à un programmeur (X-core) permettant de ne le déclencher qu'entre 19h et 8h du matin (l'arrosage a uniquement été réalisé la nuit) se coupant lors d'épisode de pluie. Toutefois, la décision des temps d'irrigation étant réalisée manuellement, certains débordements des bacs dans les réservoirs prévus pour les eaux de percolation ont pu être associés à une sur-irrigation.



Figure 63 : En haut à gauche, bac d'épinards en mars 2016 ; en haut à droite : choux en association avec des haricots en juillet 2016 ; en bas : laitues en association avec des haricots en septembre 2016. ©Baptiste Grard et Charlène Zahir.

I.4. Processus et mesures réalisées

Pour faciliter la compréhension, les mesures et méthodes utilisées vont être présentées par processus de pédogénèse étudiée.

I.4.a. Biodégradation

I.4.a.i Analyse élémentaire

Les échantillons de Technosol prélevés (voir la partie matériel et méthode de cette thèse [Chapitre II] pour la description des prélèvements) ont été séchés à 40°C et envoyés pour analyse au laboratoire des sols INRA d'Arras²⁴. Les méthodes suivantes ont été utilisées :

- C organique : en g.kg⁻¹ ; NF ISO 10694
- Azote total : en g.kg⁻¹ ; Méthode INRA interne

I.4.a.ii Minéralisation du carbone

Des cinétiques de minéralisation du carbone ont été établies en laboratoire sur les matériaux parentaux, les mélanges et le bois broyé. Les incubations se sont déroulées en conditions contrôlées durant 239 jours à 20°C et avec une humidité du matériau ajusté hebdomadairement à pF1,7. Les matériaux parentaux utilisés pour cette manipulation ont été préalablement séchés à l'étuve pendant 6 jours à 40°C, puis tamisés à 5 mm. Les refus du tamis 5 mm ont été broyés à 8 mm, puis ajoutées à la fraction < 5 mm. Cette décision a été prise en considérant que, si l'ensemble de l'échantillon avait été broyé directement à 8 mm, des particules de tailles inférieures à 8 mm auraient pu être broyées plus finement, faussant ainsi la granulométrie initiale. Les masses suivantes : résidus de champignonnière ⇔ 10 g sec ; mélange compost et résidus de champignonnière ⇔ 15 g sec par échantillon; compost de bio-déchets ⇔ 25 g sec et bois broyé ⇔ 25 g sec ; ont été placées dans un tube PVC avec une coupelle plastique à sa base et disposées dans un bocal en verre de 2L fermé et équipé d'un septum permettant la mesure. Chaque échantillon a été répliqué 4 fois,

Le CO₂ dégagé a été dosé par micro-chromatographie à phase gazeuse (micro GC 490) à 46 dates échelonnées entre 1 et 239 jours. Après chaque mesure, chaque bocal a été ouvert, pendant au moins 5 min afin de renouveler son atmosphère avant que l'humidité soit vérifiée et un ajout d'eau distillée réalisé si nécessaire pour maintenir l'échantillon à pF1,7 avant ré-incubation.

La quantité de carbone minéralisée est obtenue par le calcul suivant :

$$C_m = \frac{C_{ech.} * 10^{-6} * V_b. * M[C]}{M[GazParfait] * m_{ech.sec}}$$

Avec, C_m. = quantité de C minéralisé par kg de matériau sec (g.kg⁻¹) ; C_{éch.} = concentration en CO₂ dans l'atmosphère du bocal avec l'échantillon (ppm) ; V_{b.} = volume du bocal (2l dans notre cas) ;

²⁴ <https://www6.npc.inra.fr/las>

$M[C]$ = masse molaire du C de 12 g.mole^{-1} ; $M[\text{GazParfait}]$ = volume molaire des gaz parfaits à 20°C , soit $24,055 \text{ L.mole}^{-1}$ et $m_{\text{ech.sec}}$ = masse du matériau sec.

I.4.a.iii Indice de stabilité de la matière organique

Une analyse biochimique des matériaux parentaux a été réalisée selon la méthode Van Soest (Norme AFNOR XP U44-162) à l'aide d'un extracteur de fibres FOSS, Fibertec 1020. L'échantillon a subi plusieurs attaques d'acides et de solvants permettant de différencier:

- les composés solubles dans l'eau ($SOLU_{\text{eau}}$) ;
- les composés organiques insolubles dans le détergent neutre (NDF_{org}). 100ml de détergent est ajouté à l'échantillon et porté à ébullition ;
- les composés organiques insolubles dans le détergent acide (ADF_{org}). 100ml de solution acide est ajouté avec l'échantillon et porté à ébullition ;
- la lignine dite sulfurique (ADL_{org}). De l'acide sulfurique à 72% est introduite au sein de l'échantillon.

Les durées précises et les modalités des attaques successives sont détaillées au sein de la norme. Entre chaque attaque, l'échantillon est rincé à l'eau bouillante voir à l'acétone de manière à stopper celle-ci. Après ces attaques, les échantillons sont séchés à $103^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ pendant au moins 16 h puis pesés pour obtention des masses. Les échantillons sont ensuite placés dans un four à combustion à $480^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ durant 6h avant d'être refroidis et à nouveau pesés. Les différentes fractions $SOLU_{\text{eau}}$, NDF_{org} , ADF_{org} et ADL_{org} sont ensuite obtenues par différences de masses.

Les quantités relatives aux différentes fractions sont ensuite déduites par les calculs suivants :

$$SOL_{\text{eau}} = 100 - SOLU_{\text{eau}}$$

$$SOL_{NDF} = SOLU_{\text{eau}} - NDF_{\text{org}}$$

$$HEM = NDF_{\text{org}} - ADF_{\text{org}}$$

$$CEL = ADF_{\text{org}} - ADL_{\text{org}}$$

$$LIC = ADL_{\text{org}}$$

Avec :

- SOL : composés organiques solubles, exprimé en g.100g^{-1} de m.o ;
- CEL : approximation de la cellulose, exprimé en g.100g^{-1} de m.o ;
- HEM : approximation de la cellulose, exprimé en g.100g^{-1} de m.o ;

- LIC : somme des lignines et des cutines, exprimé en g.100g^{-1} de m.o.

L'Indice de Stabilité de la Matière Organique (ISMO – norme XP U 44-162) exprime le pourcentage de matière organique potentiellement résistante à la dégradation. Plus l'ISMO est élevé, plus la valeur amendante du produit organique est élevée. L'ISMO est exprimé en $\%C_{\text{organique}}$ de la matière organique selon la formule suivante :

$$ISMO = 44,5 + 0,5 * SOL - 0,2 * CEL + 0,7 * LIC - 2,3 * Cm3$$

Avec :

- SOL : composés organiques solubles, exprimé en g.100g^{-1} de m.o ;

- CEL : approximation de la cellulose, exprimé en g.100g^{-1} de m.o ;

- LIC : somme des lignines et des cutines, exprimé en g.100g^{-1} de m.o ;

- Cm3 est la proportion de C de la matière organique exogène minéralisée après 3 jours d'incubation (XPU 44 163) exprimée en $\%C_{\text{organique}}$ de la matière organiques exogènes. Dans notre cas, suite à un problème de manipulation, la proportion du carbone minéralisé en 3 jours d'incubation, a été estimée à partir de nos incubations en laboratoire à 20°C avec un Q10 de 2. Ce qui donne : $Cm3_{\text{mélange}} = (1,46 \pm 0,19) * 2$ et $Cm3_{\text{boisbroyé}} = (0,23 \pm 0,03) * 2$.

I.4.b. Réarrangement structural

I.4.b.i Épaisseur des Technosols

Les mesures d'épaisseurs des Technosols ont été réalisées à l'aide d'une barre horizontale placée sur une diagonale de chaque bac, afin de mesurer la distance entre le bas de cette barre et la surface du Technosol (voir Chapitre II - **Figure 37**). Les bacs ont ainsi été mesurés à vide puis couche par couche lors de l'installation et durant les périodes de prélèvements. La mesure d'épaisseur totale comporte 10 points espacés de 10 cm chacun ; celle de l'épaisseur d'une couche lors d'un prélèvement est réalisé sur 4 points de mesures. L'existence d'une couche a été déterminée par son homogénéité. Pour exemple, l'épaisseur d'un horizon supérieur composé de compost s'arrêtait lorsque des bouts de bois broyés (correspondant à la couche inférieure) étaient visibles. Au niveau des couches inférieures, l'épaisseur des couches a également été déterminée selon ce critère et donc la présence de matériau seul ou en mélange sur tout ou partie de son profil.

Au bout de 6 mois, lors de l'installation du paillis, l'épaisseur de cette couche a été mesurée. Pour simplifier les calculs, l'hypothèse (basée sur des observations) que cette couche ne s'était pas décomposée durant les 6 mois suivants a été faite. Son épaisseur (à six mois) a donc été retirée lors des

calculs d'épaisseurs de Technosol au bout d'un an. Par ailleurs, les épaisseurs initiales de Technosol entre le traitement O et M sont différentes, liées à des phénomènes de décompactions des matériaux et notamment du bois lors de leur installation dans les bacs. De ce fait, les résultats ne sont pas exprimés en cm mais en proportion des épaisseurs initiales des Technosols à T0, selon la formule suivante :

$$H_p = \frac{Ht_x}{Ht_0}$$

Avec : H_p = proportion de l'épaisseur initiale en % ; Ht_x = épaisseur du technosol ou de la couche au temps x en cm et Ht_0 = épaisseur totale du Technosol à T0 en cm.

I.4.b.ii Tassement

- Masse volumique apparente

A partir d'un échantillon de Technosol non perturbé et par couche (voir partie matériel et méthode de la thèse pour plus de détails), la masse volumique apparente est déterminée selon la formule suivante :

$$\rho_a = \frac{m_{\text{éch.frais}} - m_{\text{eau}}}{V_{\text{éch.}}}$$

Equation - Calcul de la masse volumique apparente d'un échantillon.

Avec, MVA = masse volumique apparente (g.cm^{-3}) ; $m_{\text{éch.frais}}$ = Masse de l'échantillon frais (g); m_{eau} = masse d'eau au sein de l'échantillon (g) ; $V_{\text{éch.}}$ = volume de l'échantillon (correspondant à celui du cylindre ; cm^3).

- Espace poral

A partir des courbes de rétention d'eau établies, le volume de huit classes de taille de pores a été déterminé et exprimé par unité de volume de solide, soit en indice de vide.

○ > 300µm	$P_{>300\mu m} = Vi_{pF1}$
○ 300 - 95µm	$P_{300-95\mu m} = Wi_{pF1} - Wi_{pF1.5}$
○ 95 - 30µm	$P_{95-30\mu m} = Wi_{pF1.5} - Wi_{pF2}$
○ 30 - 9,5µm	$P_{30-9,5\mu m} = Wi_{pF2} - Wi_{pF2.5}$
○ 9,5 - 3µm	$P_{9,5-3\mu m} = Wi_{pF2.5} - Wi_{pF3}$
○ 3 - 0,95µm	$P_{3-0,95\mu m} = Wi_{pF3} - Wi_{pF3.5}$
○ 0,95 - 0,3µm	$P_{0,95-0,3\mu m} = Wi_{pF3.5} - Wi_{pF4}$

○ $< 0,3\mu\text{m}$

$$P_{<0,3\mu\text{m}} = Wi_{pF4}$$

Avec : $P_{x\mu\text{m}}$ = volume de pores entre $x\mu\text{m}$ pour un volume de solide d' 1cm^3 ($\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$) et Wi_{pFy} = indice d'eau à pF_y (cm^3) pour un volume de solide d' 1cm^3 et Wi_{pFz} = indice d'eau à pF_z (cm^3) pour un volume de solide d' 1cm^3 . Avec x = classe de pores concernés, $y = pF$ correspondant à la borne supérieure et $z = pF$ correspondant à la borne inférieure de la classe.

Calcul de l'indice d'eau pF_x :
$$Wi_{pFx} = \frac{\rho_a * V_{sol}}{Ms_{pFx}} * MW_{pFx}$$

Avec : Wi_{pFx} = indice d'eau au pF_x pour un volume de solide connu d' 1cm^3 ($\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$); MW_{pF1} = masse d'eau à $pF1$ (g) ; Ms_{pF1} = masse de l'échantillon à $pF1$ (g) ; ρ_a = masse volumique apparente ($\text{g}.\text{cm}^{-3}$) et V_{sol} = volume de solide définit ici à 1cm^3 .

Calcul de l'indice de vide à pF_1 :
$$Vi_{pF1} = \frac{\rho_a * V_s}{Ms_{pF1}} * AC_{pF1}$$

Avec : Vi_{pF1} = indice de vide à pF_1 pour un volume de solide connu d' 1cm^3 ($\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$); V_s = volume de l'échantillon à $pF1$ (cm^3); AC_{pF1} = teneur en air à $pF1$ (% of volume); Ms_{pF1} = masse de l'échantillon à $pF1$ (g) ; ρ_a = masse volumique apparente ($\text{g}.\text{cm}^{-3}$) et V_{sol} = volume de solide définit ici à 1cm^3 .

- **Calcul de la porosité totale** ($\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$):
$$\delta = 1 - \frac{\rho_a}{\rho_r}$$

Avec: ρ_a = densité apparente ($\text{g}.\text{cm}^{-3}$) and ρ_r = masse volumique réelle du solide ($\text{g}.\text{cm}^{-3}$).

I.4.c. Lixiviation et lessivage

I.4.c.i Volume d'eau perdu

L'installation de bidons collectant les eaux de percolations (voir **Figure 60 (a)**) a permis la quantification du volume d'eau non retenue par le Technosol ou son horizon drainant. Le protocole de mesure est détaillé au sein de la partie matériel et méthode de ce manuscrit (Chapitre II – partie 2).

I.4.c.ii Perte en azote minéral et carbone dissous

A chaque événement de débordement d'un bac, deux échantillons d'eau de percolation ont été collectés. Ceux-ci ont ensuite été filtrés à $1,2\mu\text{m}$ à l'aide de filtres en fibre de verre puis analysés pour leurs teneurs en azote minéral et carbone dissous. L'ensemble de ces mesures et des protocoles suivis est détaillé au sein de la partie matériel et méthode de ce manuscrit (Chapitre II – partie 2). Il est toutefois

important de noter que les résultats d'analyses pour le carbone contiennent à la fois de la matière organique dissoute et particulaire (particules < 1,2 μm).

I.4.d. Fractionnement granulométrique de particules

L'analyse des distributions granulométriques de particules a été réalisée en suivant le protocole de la norme NF X 31-516 (à l'exception de la partie densimétrique, non réalisée) sur les matériaux parentaux et mélanges, avec une séparation à 5 mm, 2 mm, 0,2 mm and 0,05 mm (voir la partie matériel et méthode de ce manuscrit - Chapitre II: partie 2) de cette thèse.

I.5. Bilan massique d'éléments majeurs

Les éléments présents initialement au sein du Technosol sont susceptibles d'être dissipés par (i) assimilation par les plantes (N, P, K), (ii) minéralisation et dissipation par voie atmosphérique (C-CO₂) par biodégradation et minéralisation de la matière organique, N par dénitrification ou volatilisation d'ammoniaque, (iii) transfert hors du profil avec l'eau percolée par lessivage (C, N, P, K) et lixiviation (C, N, K). La **Figure 64** représente l'ensemble des flux entrants et sortants à l'échelle d'un Technosol.

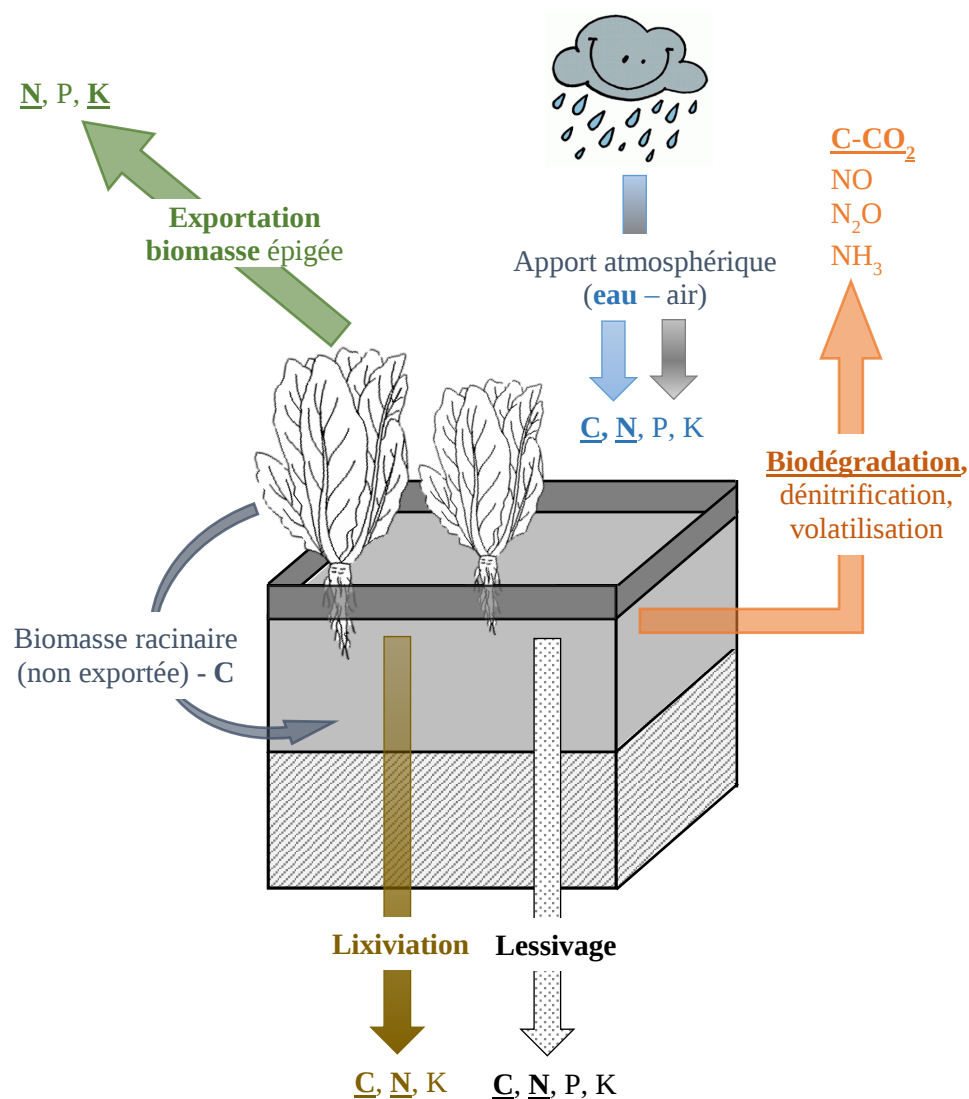


Figure 64 : Représentation des flux entrants et sortants à l'échelle du Technosol. L'épaisseur des flèches n'est pas corrélée avec l'importance des flux. Les éléments en gras et soulignés font l'objet soit d'une quantification directe soit d'une estimation dans le cadre de cette étude.

Calcul des exportations par les plantes

Les quantités d'éléments exportés par les cultures ont été estimées pour deux macro-nutriments majeurs (N et K). Les valeurs utilisées sont issues d'un guide d'aide à la production en maraîchage, réalisé par l'institut technique de l'agriculture biologique (ITAB 2017). Le **Tableau 19** récapitule l'ensemble de ces valeurs et leurs calculs à l'échelle d'un bac.

		MP	MPE	OP	OPE
Epinards	Rendement (kg.m ⁻²)	3,4	5,4	4,2	4,4
	N (kg.m ⁻²)	0,01	0,02	0,02	0,02
	K (kg.m ⁻²)	0,02	0,04	0,03	0,03
Têtes de choux	Rendement (kg.m ⁻²)	6,8	6,6	5,2	5,9
	N (kg.m ⁻²)	0,02	0,01	0,01	0,01
	K (kg.m ⁻²)	0,02	0,02	0,01	0,02
Haricots	Rendement (kg.m ⁻²)	1,5	1,7	1	1
	N (kg.m ⁻²)	0,01	0,01	0,004	0,004
	K (kg.m ⁻²)	0,01	0,01	0,004	0,004
Laitues	Rendement (kg.m ⁻²)	6,4	5,9	4,2	5,4
	N (kg.m ⁻²)	0,01	0,01	0,01	0,01
	K (kg.m ⁻²)	0,02	0,02	0,01	0,02
Exportation annuelle (Σ des cultures)	N (kg.bac ⁻¹)	0,02	0,03	0,02	0,02
	P (kg.bac ⁻¹)	0,03	0,04	0,03	0,03
	N et K (kg.bac ⁻¹)	0,05	0,06	0,05	0,05

Tableau 19 : Détails des calculs des exportations estimées par les cultures en N et K. Les chiffres de rendements sont issus des résultats expérimentaux de ce dispositif.

I.5.a. Calcul des bilans

I.5.a.i En masse

L'ensemble des calculs est détaillé ci-dessous.

Détails des formules :

- Masse d'un Technosol $M_T = M_{H.sup.} + M_{H.inf.}$

Avec : M_T = masse totale du Technosol en kg ; $M_{H.sup.}$ = masse de l'horizon supérieur en kg et $M_{H.inf.}$ = masse de l'horizon inférieur en kg.

$$M_{H.sup./inf.} = MVA_{H.sup./inf.} * V_{H.sup./inf.} * 10^{-3}$$

Avec : $M_{H.sup./inf.}$ = masse de l'horizon supérieur ou inférieur en kg ; $MVA_{H.sup./inf.}$ = masse volumique apparente de l'horizon supérieur ou inférieur en g.cm⁻³ et $V_{H.sup./inf.}$ = volume de l'horizon supérieur ou inférieur en cm³.

$$V_{H.sup./inf.} = H_{H.sup./inf.} * 71 * 71$$

Avec : $V_{H.sup./inf.}$ = volume de l'horizon supérieur ou inférieur en cm^3 ; $H_{H.sup./inf.}$ = épaisseur de l'horizon supérieur ou inférieur en cm et $71*71cm$ représentant les dimensions internes (largeur*longueur) du Technosol dans le bac.

- % de pertes $\%perte_{t,x} = 1 - \frac{M_{t,x}}{M_{t0}}$

Avec : $\%perte_{t,x}$ = pourcentage de pertes entre $T0$ et le temps Tx ; $M_{t,x}$ = masse totale ou d'un horizon à un temps x et M_{t0} = même masse à $T0$.

Concernant les pertes par lixiviation de carbone, de manière à estimer les pertes totales en matière organique dissoute dans l'eau, les valeurs obtenues ont été multipliées par 2. La même opération a été réalisée concernant les pertes par minéralisation.

I.5.a.ii Par élément

- Calcul de la masse d'un élément par couche :

$$M_x = [x]_{H.sup./inf.} * M_{H.sup./inf.} * 10^{-3}$$

Avec : M_x = masse de l'élément x en kg (x = carbone organique ou azote total ou potassium total); $[x]_{H.sup./inf.}$ = teneur de l'élément x au sein de l'horizon supérieur ou inférieur où la teneur a été mesurée en $g.100g^{-1}$ et $M_{H.sup./inf.}$ = masse de l'horizon supérieur ou inférieur où la teneur de l'élément x a été mesurée.

La teneur en potassium total a été mesurée au sein du laboratoire des sols d'INRA d'Arras suivant la norme NF EN ISO 111885.

I.6. Analyses statistiques des données

Tous les tests statistiques ont été réalisés sous R, version 3.3.2. Les comparaisons de résultats ont principalement été réalisées avec des tests Anova (I et II) quand les données étaient normales. La normalité était vérifiée par le test de Shapiro et l'homocédasticité par le test de Levene. Les résultats de ces deux tests étaient acceptés si les valeurs de p-value étaient supérieures à 5%. Lorsque l'une des deux conditions n'était pas respectée (normalité ou homoscedasticité), le test non-paramétrique de Kruskal-Wallis a été utilisé.

II. Résultats

II.1. Evolution des matières organiques

II.1.a. Biodégradabilité des matériaux

- ISMO

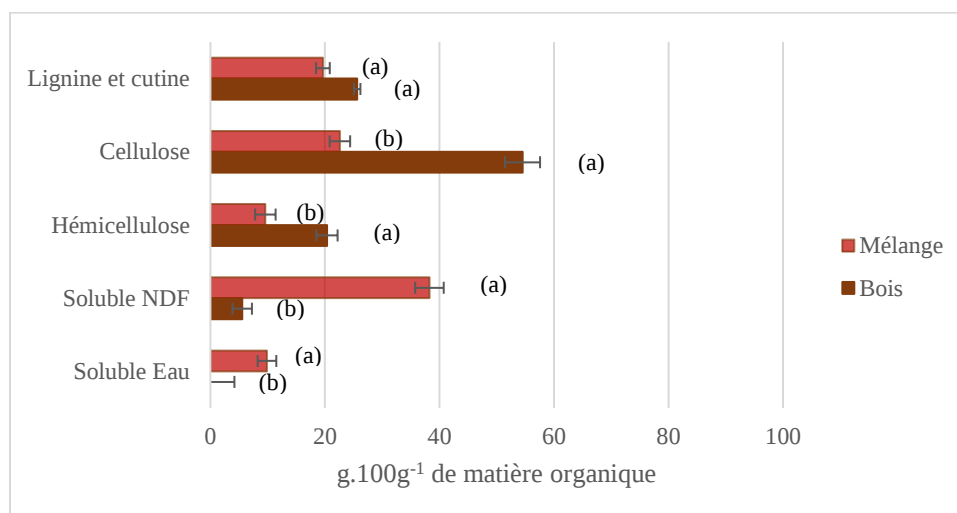


Figure 65 : Résultats du fractionnement biochimique de la matière organique par la technique Van Soest. Les tests statistiques ont été réalisés par fraction, des lettres différentes indiquent des différences significatives.

La composition biochimique du bois broyé et du mélange sont bien différenciés. La cellulose est le constituant majoritaire du bois broyé avec plus de 54 g.100g⁻¹ de matière organique (**Figure 65**), suivi ensuite des lignines et de l'hémicellulose, l'ensemble des fractions solubles représentant moins de 6 g.100g⁻¹ de matière organique. A l'inverse, pour le mélange, l'ensemble des fractions solubles représente 48 g.100g⁻¹ de matière organique. La cellulose et la somme des LIC (lignines et cutines) sont présents autour de 20 g.100g⁻¹ de matière organique contre moins de 10 g.100g⁻¹ de matière organique pour l'hémicellulose.

Calcul de l'ISMO :

- Bois broyé : ISMO = 50,2 ± 2,7
- Mélange : ISMO = 71,1 ± 1,5.

- Cinétique de minéralisation in-situ

Les deux matériaux organiques se minéralisent rapidement, perdant en 239 jours, presque 17% de la quantité initiale carbone pour le mélange et 24 % pour le bois broyé. Alors que le mélange suit une courbe d'allure classique (la vitesse de minéralisation diminue au cours du temps, la minéralisation du carbone du bois broyé a une allure sigmoïde (**Figure 66**).

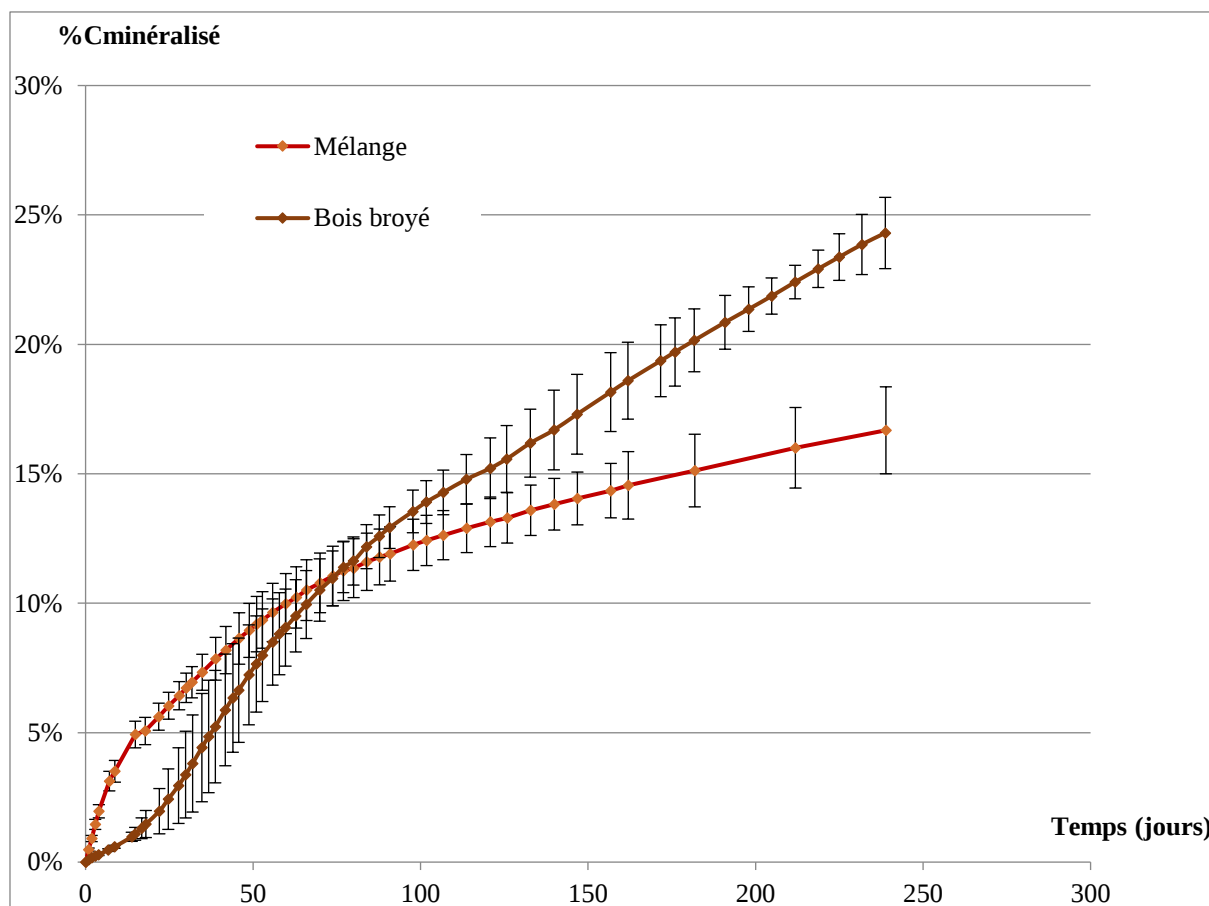


Figure 66 : % du stock initial de carbone minéralisé au sein des matériaux parentaux lors d’une incubation à 20°C en laboratoire de 239jours.

II.1.b. *Evolution in-situ des matières organiques*

- $C_{\text{organique}}/N_{\text{total}}$

	Temps	Traitement	$C_{\text{organique}}/N_{\text{total}}$
Horizon supérieur	T0	Mélange	12,1 ± 0,4 (ef)
	T+1an	O	9,7 ± 0,2 (f)
		OP	10 ± 0,3 (f)
		OPE	10,3 ± 0,5 (f)
		M	9,4 ± 0,2 (f)
		MP	10 ± 0,2 (f)
		MPE	10,1 ± 0,2 (f)
Horizon inférieur	T0	Briques et tuiles concassées	105,1 ± 10,9 (a)
	T+1an	M	21,2 ± 1,9 (d)
		MP	21,3 ± 1,4 (d)
		MPE	18,9 ± 4,3 (de)
	T0	Bois broyé	94,5 ± 11,7 (b)
	T+1an	O	40 ± 6,2 (c)
		OP	36,8 ± 5,6 (c)
		OPE	24,7 ± 1,9 (d)

Tableau 20 : Evolution du C/N entre T0 et T+1an. Des lettres différentes indiquent des différences significatives (p-value < 0,05).

Les C/N des matériaux sont bien différenciés avec des valeurs particulièrement élevées (> 90) pour le mélange de briques et tuiles concassées ainsi que le bois broyé (**Tableau 20**). Aucune évolution significative du C/N n'est reportée pour l'horizon supérieur malgré une légère diminution de celui-ci. A l'inverse, une forte diminution des C/N des horizons inférieurs est observée. Le C/N des briques et tuiles concassées passe ainsi de 105 à une valeur moyenne de 20,5 et le bois broyé passe de 94,5 à 33,9. Le C/N de l'horizon inférieur OPE est significativement plus faible que celui de OP ou O.

- **Capacité d'échange cationique**

Les matériaux parentaux présentent des CEC bien différenciés avec Mélange > Bois > Briques et tuiles (**Tableau 21**). Durant la première année, la CEC augmente pour l'ensemble des traitements et horizons à l'exception des horizons inférieurs à base de bois.

		Capacité d'échange cationique	
		Temps	Traitement
		cmol.kg ⁻¹	
Horizon supérieur	T0	Mélange	33,5 ± 5,8 (d)
	T+1an	O	54,5 ± 7,2 (ab)
		OP	53,0 ± 7,2 (ab)
		OPE	45,3 ± 5,1 (c)
		M	49,5 ± 6,1 (abc)
		MP	56,0 ± 7,3 (a)
		MPE	49,6 ± 4,8 (abc)
Horizon inférieur	T0	Brique et tuile	2,0 ± 0,9 (f)
	T+1an	M	1 ± 0,2 (f)
		MP	1,4 ± 0,2 (f)
		MPE	1,4 ± 0,1 (f)
	T0	Bois broyé	17,4 ± 1,7 (e)
	T+1an	O	38,2 ± 2,3 (d)
		OP	37,2 ± 2,2 (d)
OPE		47,0 ± 2,0 (bc)	

Tableau 21 : Evolution de la capacité d'échange cationique des Technosols durant la première année. Les lettres indiquent des différences significatives.

II.2. Evolution structurale

II.2.a. Epaisseur des couches du Technosol

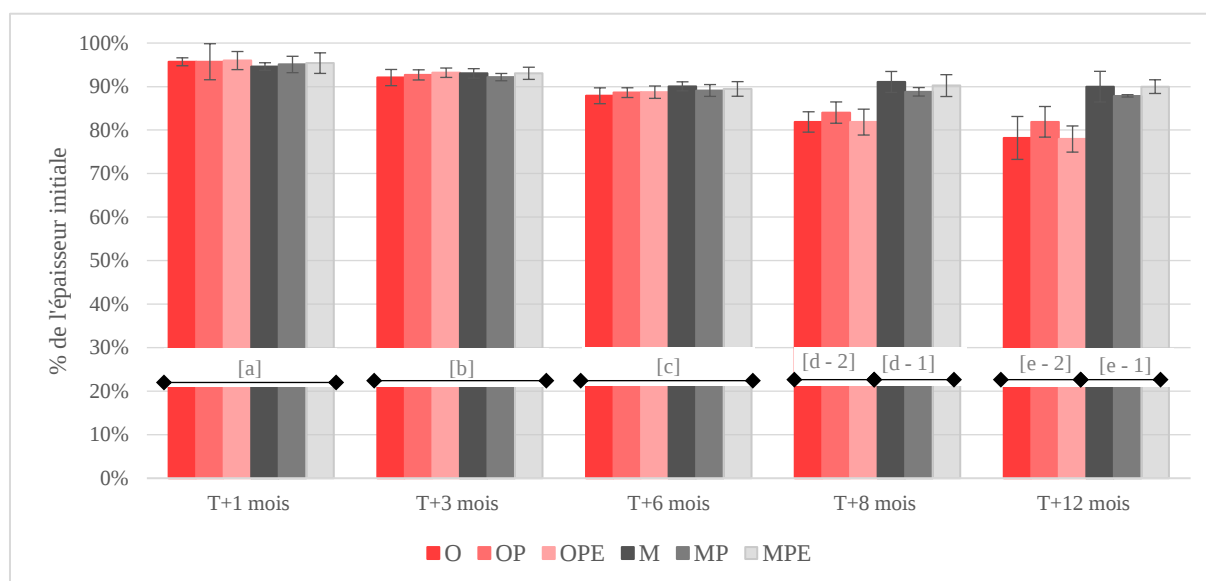


Figure 67 : Evolution de l'épaisseur totale des Technosols en % de l'épaisseur initiale en fonction du traitement et du temps. Les lettres ou chiffres représentent la comparaison statistique des données. Les lettres correspondent à la comparaison entre les mois, tandis que les chiffres portent sur la comparaison entre traitement. Lorsque les lettres ou chiffres sont différents, la différence est significative.

L'épaisseur totale des technosols diminue progressivement au cours du temps, dès le premier mois après l'implantation (**Figure 67**), (effet très significatif du temps : $p\text{-value} < 2e-16$), chaque période de mesure étant différente significativement des autres). L'interaction des facteurs temps et traitement est-elle aussi significative ($p\text{-value} = 5,75e-13$): après les six premiers mois, une différenciation entre les traitements O (O, OP et OPE) et M (M, MP et MPE) à T+8mois et T+12mois est visible. L'effet traitement est significatif ($p\text{-value} = 7,24e-15$) uniquement lorsque l'on compare le type d'horizon inférieur. Les Technosols, avec un horizon inférieur en bois broyé, s'effondrent ainsi plus que ceux constitués du mélange de briques et de tuiles concassées. La présence de plantes ou de vers associés n'affecte pas de manière significative l'effondrement des Technosols durant les 12 premiers mois.

L'effondrement moyen pour l'ensemble des traitements est de 5% au premier mois pour atteindre de manière non linéaire 11% au sixième mois. L'effet du type d'horizon inférieur entraîne ensuite une nette différenciation avec à 12 mois, les traitements O – OP – OPE autour de 21% d'effondrement tandis que les traitements M – MP – MPE sont toujours à 11% d'effondrement moyen.

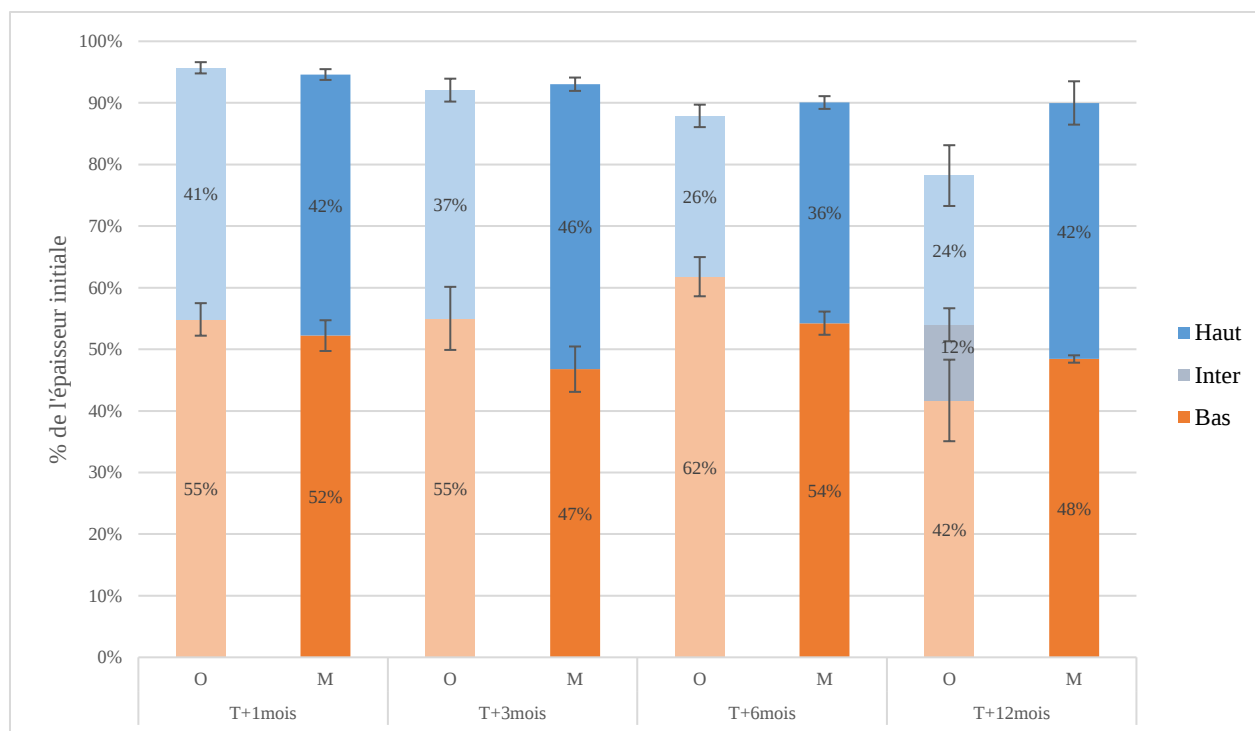


Figure 68 : Evolution de l'épaisseur par horizon pour deux traitements sans plante en fonction du temps.

La **Figure 68**, ne présente que deux traitements sans plante avec un horizon inférieur différent, les différences avec les autres traitements n'étant pas significatives. Au sein des traitements O – OP et OPE apparaît d'un horizon intermédiaire entre 6 et 12 mois (**Figure 68**). Par ailleurs, l'évolution des profils est, comme pour l'effondrement total, différenciée selon le type d'horizon inférieur. L'horizon en briques se tasse peu au cours du temps, l'effondrement étant dû à l'horizon supérieure. Dans le cas du bois broyé, l'effondrement observé se fait aussi principalement dans la couche supérieure qui passe de 41% à 24% de l'épaisseur totale initiale, et la création d'un horizon intermédiaire semble principalement résulter de son mélange avec l'horizon inférieur.

II.2.b. Porosité

		T0	T+1mois	T+3mois	T+6mois	T+1an
H. sup.	M	0,38 ± 0,02 (c)	0,33 ± 0,02 (cde)	0,38 ± 0,02 (c)	0,35 ± 0,04 (cde)	0,33 ± 0,01 (cde)
	MP	0,38 ± 0,02 (c)	0,37 ± 0,01 (cd)	0,34 ± 0,05 (cde)	0,35 ± 0,02 (cde)	0,36 ± 0,05 (cde)
	MPE	0,38 ± 0,02 (c)	0,35 ± 0,03 (cde)	0,34 ± 0,03 (cde)	0,37 ± 0,02 (cd)	0,34 ± 0,01 (cde)
	O	0,38 ± 0,02 (c)	0,34 ± 0,04 (cde)	0,32 ± 0,01 (ef)	0,35 ± 0,03 (cde)	0,32 ± 0,02 (ef)
	OP	0,38 ± 0,02 (c)	0,33 ± 0,01 (cdef)	0,32 ± 0,03 (def)	0,38 ± 0,03 (c)	0,32 ± 0,01 (ef)
	OPE	0,38 ± 0,02 (c)	0,31 ± 0,03 (ef)	0,28 ± 0,04 (f)	0,34 ± 0,03 (cde)	0,31 ± 0,04 (ef)
H. int.	O					0,19 ± 0,02 (ghij)
	OP					0,23 ± 0,02 (g)
	OPE					0,22 ± 0,03 (gh)
H. inf.	M	1,11 ± 0,03 (ab)	1,13 ± 0,05 (a)	1,12 ± 0,03 (a)	1,12 ± 0,03 (a)	1,15 ± 0,05 (a)
	MP	1,11 ± 0,03 (ab)	1,13 ± 0,02 (a)	1,14 ± 0,04 (a)	1,11 ± 0,06 (a)	1,13 ± 0,02 (a)
	MPE	1,11 ± 0,03 (ab)	1,14 ± 0,03 (a)	1,12 ± 0,1 (a)	1,11 ± 0,03 (ab)	1,06 ± 0,05 (b)
	O	0,17 ± 0,03 (hijk)	0,2 ± 0,09 (ghi)	0,13 ± 0,02 (k)	0,14 ± 0,03 (jk)	0,13 ± 0,01 (k)
	OP	0,17 ± 0,03 (hijk)	0,15 ± 0,04 (ijk)	0,14 ± 0,02 (k)	0,14 ± 0,02 (jk)	0,14 ± 0,02 (k)
	OPE	0,17 ± 0,03 (hijk)	0,14 ± 0,02 (k)	0,13 ± 0,02 (k)	0,13 ± 0 (k)	0,16 ± 0,02 (ijk)

Tableau 22 : Evolution des masses volumiques apparentes en fonction des traitements, du temps et de l'horizon. Abréviations : H. inf. = horizon inférieur ; H. int. = horizon intermédiaire et H. sup. = horizon supérieur. Les tests statistiques ont été réalisés à la fois pour l'ensemble des dates et des traitements. Deux lettres différentes indiquent une différence significative.

A T0, les masses volumiques des matériaux parentaux sont bien différenciées (**Tableau 22**). Le mélange de briques et de tuiles possède une MVA largement supérieure à celle du mélange, elle-même supérieure au bois broyé. La présence de plantes ou de vers au sein d'un même horizon n'affecte pas les masses volumiques apparentes, hormis l'horizon inférieur de briques et tuiles concassées en présence de vers (MPE < M & MP) au bout d'un an. La masse volumique apparente reste constante au cours de cette première année, seul l'horizon inférieur MPE présente une valeur de MVA plus faible au bout d'un an, tout comme M pour l'horizon supérieur.

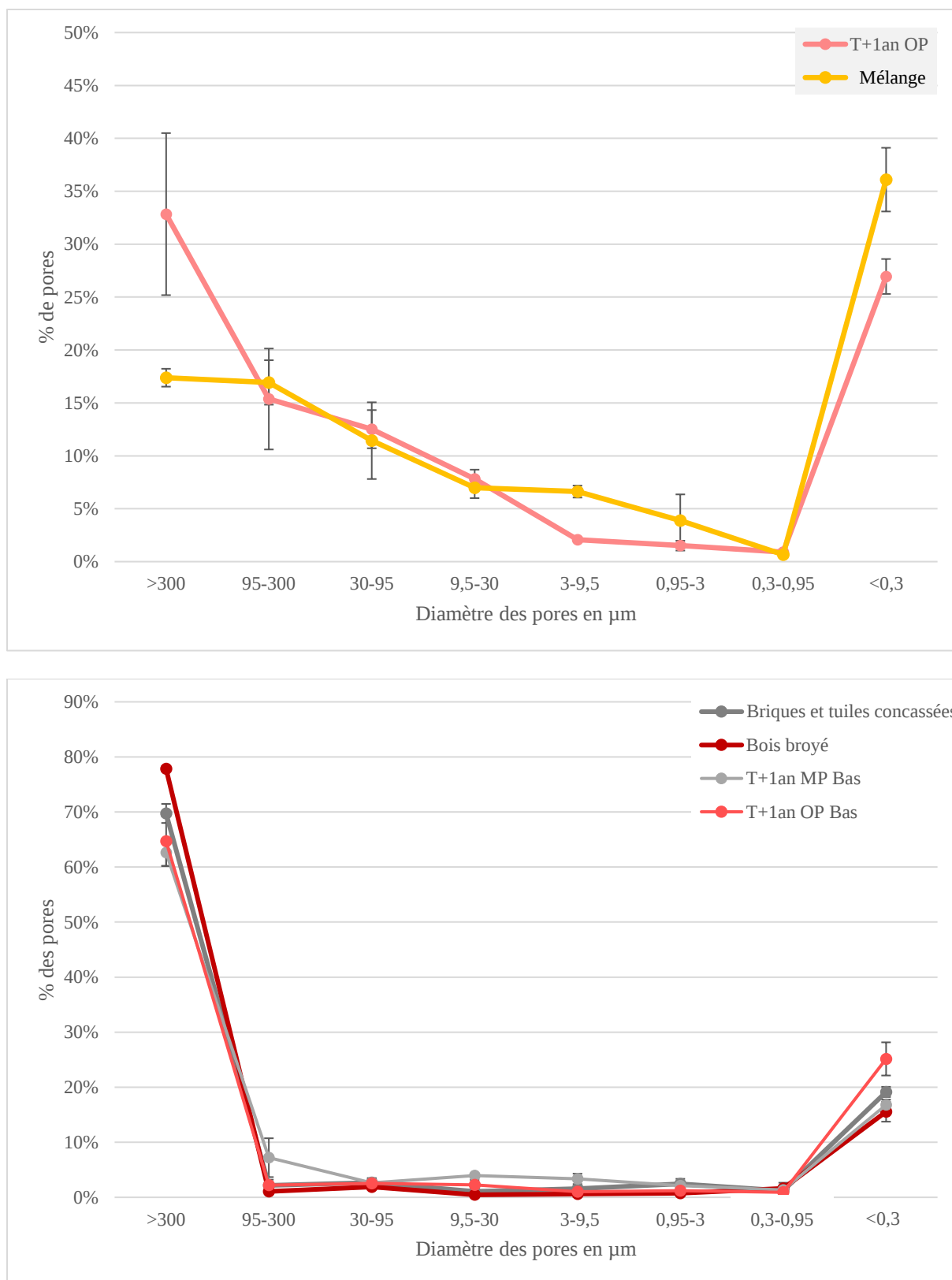


Figure 69 : Distribution des volumes des différentes classes de taille de pores, matériaux parentaux et horizons.

Le **Tableau 23** et la **Figure 69**, montrent une nette différenciation des matériaux parentaux du point de vue de leur espace poral. En volume total par cm^3 de solide, le bois broyé présente un volume de pores 11,7 et 1,6 fois supérieur respectivement aux de briques et de tuiles et au mélange. Les répartitions entre les classes porales sont également bien dissemblables. Les briques et tuiles concassées et le bois broyé présentent des distributions bimodales très marquées avec respectivement 70 et 78% de leurs volume poral correspondant à des pores $> 300\mu\text{m}$, et 19 et 16% correspondant à des pores $< 0,3\mu\text{m}$. Toutes les classes de pores intermédiaires représentent moins de 3% de la porosité. Le mélange organique présente une porosité également bimodale, mais répartie sur un nombre plus important de classe de pores. Les pores $< 0,3\mu\text{m}$ représentent ainsi 36% de sa porosité et les classes $> 300\mu\text{m}$, 95 - 300 et 30 - 95 μm respectivement 17, 17 et 11% du volume poral.

Si la porosité totale de l'horizon supérieur des Technosols n'est pas différente de celle du matériau parental, les pores les plus grossiers ($> 300 \mu\text{m}$) deviennent plus abondants que dans le matériau parental supérieur avec des différences d'évolution pour 4 classes. Au niveau des classes 300 - 95 μm et 9,5 - 3 μm , les traitements sans plante (O et M) se différencient des autres avec dans le premier cas, une baisse alors que le volume reste constant pour les autres traitements ; et dans le deuxième cas, une diminution plus importante pour O et M. Sur les autres fractions ($> 300 \mu\text{m}$ et 0,3 – 0,95 μm) aucune tendance claire ne semble se dégager.

Pour les horizons inférieurs, le volume total de pores n'évolue pas significativement, durant la première année, par rapport aux matériaux parentaux, hormis l'horizon inférieur du traitement OPE pour lequel une perte de porosité est observée. Dans les horizons inférieurs à base de bois broyé le volume des pores les plus grands ($> 300\mu\text{m}$) et des pores 0,95 – 0,3 μm diminue au cours du temps, au bénéfice de pores plus petits (300 - 95 μm et $< 0,3\mu\text{m}$).

La présence de vers ou de plantes ne modifie pas la porosité de l'horizon inférieur du traitement M, ni celle du traitement bois broyé à l'exception du traitement OPE avec des pores $> 300\mu\text{m}$ ou $< 0,3\mu\text{m}$ présentant des volumes plus faibles. L'inoculation avec des vers ne modifie pas la porosité de l'horizon supérieur, mais la présence de plantes conduit à des volumes plus importants de pores 300- 95 μm et moindres de pores 9,5 - 3 & 3 - 0,95 μm .

			Pores de transmission		Pores stockage						
			>300	95-300	30-95	9,5-30	3-9,5	0,95-3	0,3-0,95	<0,3	Vol, poral total
Horizon supérieur	T0	Mélange	0,79 ± 0,04 (ghij)	0,78 ± 0,11 (ab)	0,52 ± 0,16 (abc)	0,32 ± 0,05 (abcd)	0,3 ± 0,02 (a)	0,18 ± 0,11 (abc)	0,03 ± 0,01 (def)	1,65 ± 0,18 (bcd)	4,57 ± 0,12 (fgh)
	T1an	M	1,38 ± 0,16 (defg)	0,34 ± 0 (ef)	0,54 ± 0,03 (ab)	0,45 ± 0,02 (a)	0,21 ± 0,01 (b)	0,2 ± 0,02 (a)	0,07 ± 0,01 (bcd)	1,39 ± 0,11 (de)	4,58 ± 0,15 (fgh)
		MP	1,07 ± 0,24 (defghi)	0,93 ± 0,22 (a)	0,57 ± 0,22 (a)	0,35 ± 0,1 (abc)	0,12 ± 0,04 (cde)	0,08 ± 0,04 (cdef)	0,05 ± 0,01 (bcde)	1,39 ± 0,02 (de)	4,57 ± 0,42 (fgh)
		MPE	1,61 ± 0,16 (def)	0,63 ± 0,32 (bcd)	0,51 ± 0,17 (abc)	0,36 ± 0,1 (abc)	0,12 ± 0,04 (cde)	0,1 ± 0,01 (abcdef)	0,07 ± 0,02 (bcd)	1,33 ± 0,09 (de)	4,72 ± 0,49 (fgh)
		O	1,2 ± 0,3 (defg)	0,34 ± 0,15 (ef)	0,47 ± 0,14 (abcd)	0,4 ± 0,04 (ab)	0,18 ± 0,07 (b)	0,2 ± 0,05 (a)	0,09 ± 0,02 (ab)	1,59 ± 0,12 (cd)	4,47 ± 0,59 (fgh)
		OP	1,69 ± 0,41 (de)	0,79 ± 0,24 (ab)	0,64 ± 0,08 (a)	0,4 ± 0,04 (ab)	0,11 ± 0,01 (def)	0,08 ± 0,02 (cdef)	0,05 ± 0,01 (cdef)	1,39 ± 0,09 (de)	5,15 ± 0,1 (def)
		OPE	1,73 ± 0,63 (d)	0,61 ± 0,26 (bcd)	0,48 ± 0,19 (abcd)	0,32 ± 0,15 (abcd)	0,13 ± 0,03 (cde)	0,11 ± 0,01 (abcdef)	0,08 ± 0,03 (bc)	1,48 ± 0,23 (cde)	4,93 ± 0,84 (efg)
Horizon inférieur	T0	Tuiles	0,45 ± 0,03 (hij)	0,01 ± 0,01 (h)	0,02 ± 0,004 (g)	0,01 ± 0,01 (gh)	0,01 ± 0,0001 (i)	0,02 ± 0,002 (ef)	0,01 ± 0,002 (ef)	0,12 ± 0,001 (f)	0,64 ± 0,03 (i)
	T1an	M	0,31 ± 0,15 (j)	0,04 ± 0,03 (h)	0,02 ± 0,02 (g)	0,02 ± 0,005 (fgh)	0,02 ± 0,01 (ghi)	0,01 ± 0,01 (f)	0,01 ± 0,003 (ef)	0,1 ± 0,01 (f)	0,54 ± 0,13 (i)
		MP	0,39 ± 0,04 (ij)	0,04 ± 0,02 (h)	0,02 ± 0,01 (g)	0,02 ± 0,0004 (fgh)	0,02 ± 0,01 (ghi)	0,01 ± 0,01 (f)	0,01 ± 0,002 (ef)	0,1 ± 0,01 (f)	0,62 ± 0,03 (i)
		MPE	0,45 ± 0,05 (hij)	0,07 ± 0,05 (gh)	0,02 ± 0,02 (g)	0,03 ± 0,02 (efgh)	0,02 ± 0,01 (ghi)	0,02 ± 0,01 (ef)	0,01 ± 0,01 (f)	0,11 ± 0,003 (f)	0,72 ± 0,04 (i)
	T0	Bois	5,92 ± 0,67 (a)	0,08 ± 0,04 (gh)	0,14 ± 0,04 (efg)	0,04 ± 0,02 (efgh)	0,05 ± 0,06 (fghi)	0,05 ± 0,03 (def)	0,13 ± 0,09 (a)	1,17 ± 0,09 (e)	7,48 ± 0,83 (a)
	T1an	O	5,12 ± 0,45 (b)	0,14 ± 0,05 (fgh)	0,19 ± 0,05 (efg)	0,27 ± 0,14 (cdefg)	0,11 ± 0,01 (efg)	0,17 ± 0,11 (bcdef)	0,04 ± 0,02 (bcd)	1,76 ± 0,12 (ab)	7,8 ± 0,69 (a)
		OP	5,1 ± 0,78 (b)	0,17 ± 0,01 (fgh)	0,2 ± 0,03 (efg)	0,17 ± 0,06 (cdefg)	0,08 ± 0,01 (efg)	0,09 ± 0,03 (bcdef)	0,07 ± 0,04 (bcd)	1,97 ± 0,19 (ab)	7,85 ± 0,73 (a)
OPE		3,04 ± 0,14 (c)	0,3 ± 0,2 (efg)	0,17 ± 0,09 (efg)	0,18 ± 0,1 (cdefg)	0,08 ± 0,01 (efgh)	0,08 ± 0,04 (cdef)	0,08 ± 0,03 (bc)	1,6 ± 0,11 (cd)	5,52 ± 0,25 (cde)	

Tableau 23 : Evolution par classe de pores de leurs volumes en fonction du traitement. Valeur en cm³.cm⁻³ de solide. Les tests statistiques ont été réalisés au sein d’une même classe de pores. Deux lettres différentes indiquent une différence significative.

II.3. Lessivage et lixiviation

II.3.a. Drainage

	O	OP	OPE	M	MP	MPE
Volume total percolé (l)	332 ± 19 (a)	162 ± 22 (b)	164 ± 14 (b)	360 ± 30 (a)	161 ± 10 (b)	143 ± 9 (b)

Tableau 24 : Volume total percolé issu des bacs expérimentaux après un an. Les lettres différentes montrent des différences significatives.

Ce volume est presque deux fois plus important en l'absence de plante mais ne se différencie pas selon la nature de la couche inférieure, ni la présence de vers (**Tableau 24**).

II.3.b. Lixiviation et lessivage de l'azote minéral

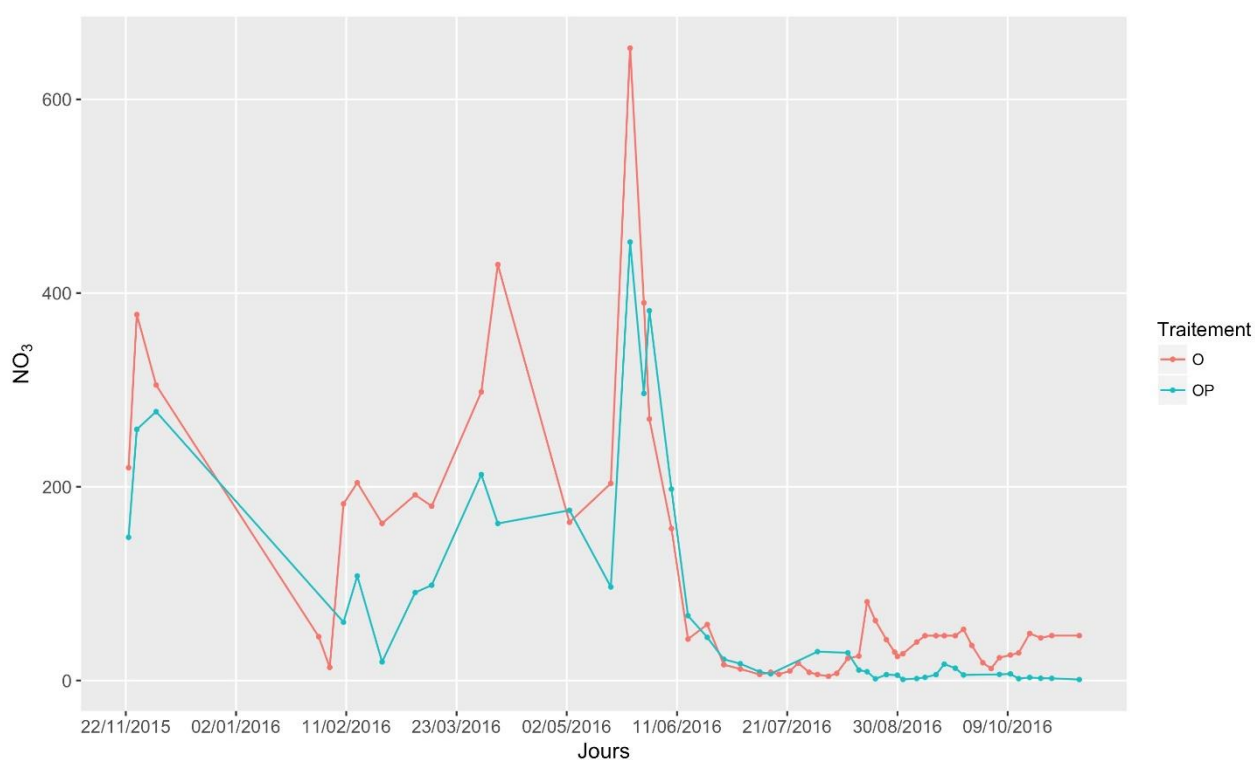


Figure 70 : Concentrations en nitrates dans les eaux de percolation d'un bac en fonction du temps (mg.l⁻¹).

II.3.c. *Lixiviation de carbone*

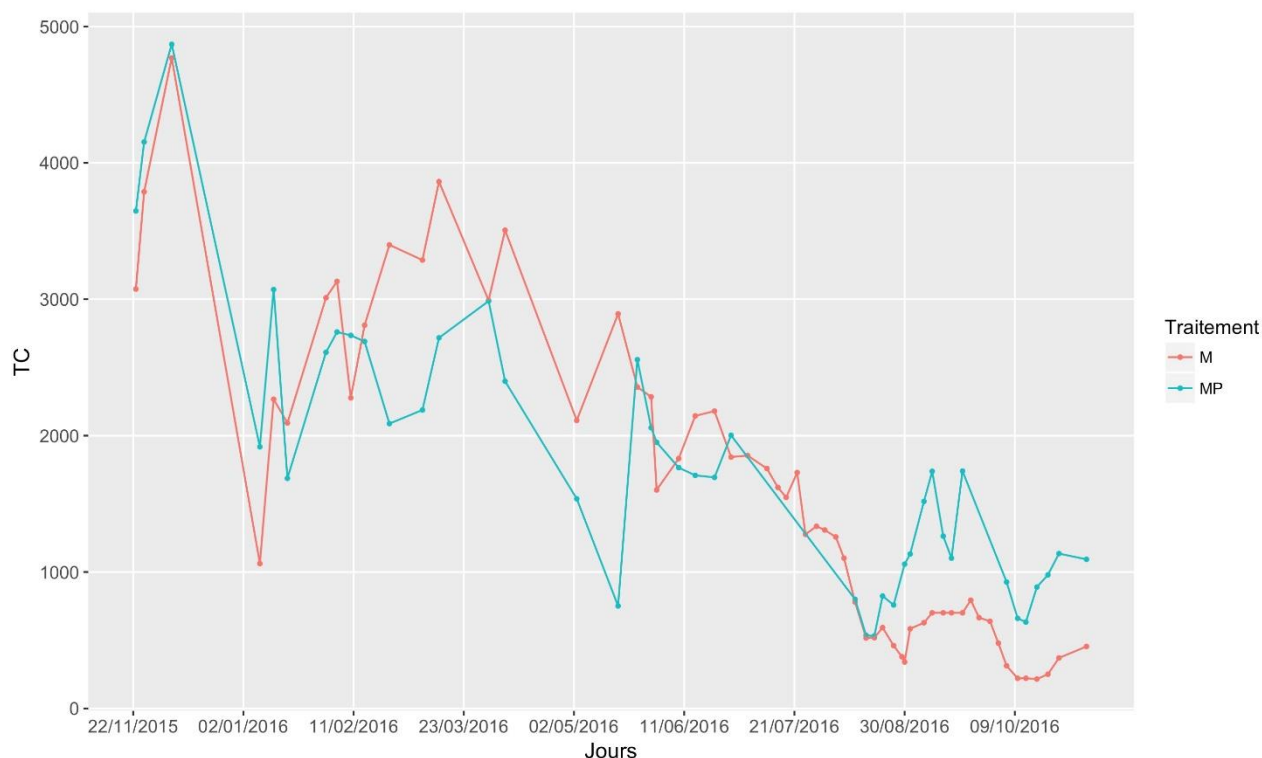


Figure 71 : Concentration en carbone total dissous à l'échelle d'un bac en fonction du traitement et du temps exprimés en mg.l^{-1} .

	[NO₃] Moyenne pondérée mg.l^{-1}	[NH₄] Moyenne pondérée mg.l^{-1}	Nmin Total g.bac^{-1}	[C] Moyenne pondérée mg.l^{-1}	C Total g.bac^{-1}
O	116,1 ± 59 (a)	2,2 ± 1,6 (a)	41,5 (b)	1439 ± 154 (de)	478,0 (a)
OP	160,2 ± 175,1 (a)	1,9 ± 0,004 (a)	24,7 (b)	2253,8 ± 308,2 (a)	362,7 (bc)
OPE	112,7 ± 42,9 (a)	2,2 ± 0,5 (a)	18,9 (b)	2095,7 ± 174,4 (ab)	343,4 (cd)
M	223,6 ± 38,8 (a)	3,1 ± 0,6 (a)	80,4 (a)	1172,9 ± 140 (e)	420,7 (ab)
MP	293,5 ± 124,2 (a)	3,4 ± 0,7 (a)	47,0 (b)	1667,6 ± 69,4 (cd)	269,1 (de)
MPE	231,1 ± 118,1 (a)	2,8 ± 1,3 (a)	33,8 (b)	1831,5 ± 221,6 (bc)	262,4 (e)

Tableau 25 : Perte en carbone et azote en fonction du traitement après un an d'expérimentation. Des lettres non identiques indiquent une différence significative.

Comme le montre le **Tableau 25**, seul le traitement sans plante M se différencie des autres traitements avec une perte d'azote minéral plus importante. Cette tendance est la même pour le Technosol O en comparaison à OP et OPE mais la différence n'est pas significative. Les pertes de carbone sont

significativement plus élevées sans plante (M et O), alors que la concentration moyenne des percolats est inférieure. Au niveau des pertes de carbone, les traitements O et M avec plantes ou avec plantes et vers, se différencient en revanche nettement. Ainsi la concentration en carbone est plus élevée pour OP que pour MP, de même que pour OPE en comparaison à MPE. Ces différences se retrouvent d'un point de vue massique.

En un an, les pertes d'azote minéral sont à 96% composées de nitrate – nitrite sur l'ensemble des traitements. Il s'agit donc de lixiviation. L'ordre de grandeur est le même concernant le carbone avec 91% des pertes sous forme organique. Ces pertes ont lieu précocement, tel que l'on peut le voir sur les **Figure 70** et **Figure 71**. Ainsi, au bout de 7mois, 86% en moyenne des pertes d'azote minéral ont eu lieu et 64% des pertes en carbone.

II.3.d. Autres indicateurs de lixiviation

		Temps	Traitement	CaCO ₃ total mg.kg ⁻¹	Conductivité électrique mS.cm ⁻¹
Horizon supérieur	T0		Mélange	33,3 ± 7,2 (c)	1,45 ± 0,03 (a)
			O	79,8 ± 8,3 (a)	0,29 ± 0,03 (c)
			OP	78,3 ± 4,4 (a)	0,34 ± 0,07 (c)
	T+1an		OPE	69,4 ± 12 (a)	0,36 ± 0,03 (c)
			M	75,6 ± 2,3 (a)	0,31 ± 0,03 (c)
			MP	65,9 ± 3,1 (ab)	0,33 ± 0,05 (c)
			MPE	67,7 ± 7,8 (a)	0,34 ± 0,04 (c)
Horizon inférieur	T0		Briques et tuiles	54,1 ± 3,6 (b)	0,06 ± 0,01 (d)
			M	70,4 ± 15,8 (a)	0,07 ± 0,006 (d)
			MP	70,8 ± 3,1 (a)	0,09 ± 0,03 (d)
	T+1an		MPE	73,4 ± 15,6 (a)	0,08 ± 0 (d)
			Bois broyé	1,8 ± 0,6 (e)	0,4 ± 0,07 (bc)
			O	15,9 ± 1,1 (d)	0,4 ± 0,03 (b)
	T+1an		OP	16,5 ± 8,4 (d)	0,5 ± 0,16 (b)
			OPE	29,1 ± 2,4 (cd)	0,49 ± 0,02 (b)

Tableau 26 : Evolution des caractéristiques chimiques des Technosols durant la première année. Les lettres indiquent des différences significatives par variable.

Initialement, les matériaux parentaux présentent des teneurs en CaCO_3 bien différenciés avec briques et tuiles > mélange > bois. Il en est de même avec la conductivité électrique où les briques présente systématiquement les valeurs les plus faibles et le mélange les plus élevés. Durant la première année, les horizons supérieurs et inférieurs montrent les mêmes tendances d'évolution vis à vis du CaCO_3 avec une augmentation des teneurs (**Tableau 26**). A l'inverse, une importante baisse de la conductivité électrique est observée pour l'horizon supérieur tandis que celle-ci reste constante pour l'horizon inférieur. L'augmentation de teneur en CaCO_3 , se traduit par une augmentation de stock pour les deux horizons, tous traitements confondus. L'ampleur de l'augmentation varie toutefois selon les traitements, ainsi pour l'horizon inférieur, on observe une augmentation par 7 du stock pour O, OP et OPE contre 1,6 pour M, MP et MPE. Les stocks en CaCO_3 des horizons supérieurs augmentent eux de 1,2 à 1,9 fois par rapport aux stocks initiaux pour l'ensemble des traitements.

II.4. Lessivage

	Temps	Traitement	% de masse				
			>5mm	[5mm-2mm]	[2mm-0,2mm]	[0,2mm-0,05mm]	<0,05mm
Horizon supérieur	T0	Mélange	2,7 ± 2,07 (c)	6,2 ± 0,6 (cde)	31,9 ± 4,2 (a)	15,3 ± 2,7 (c)	43,9 ± 4,9 (cd)
	T+6mois	O	2,1 ± 1,7 (c)	6,5 ± 0,8 (bcd)	29 ± 2,3 (c)	18,4 ± 1,6 (c)	44,1 ± 5,4 (abcd)
		OP	2,5 ± 0,7 (c)	6,9 ± 0,4 (abc)	32,8 ± 1 (ab)	20,2 ± 1,9 (b)	37,6 ± 2,2 (d)
		OPE	1,8 ± 1,3 (c)	6 ± 1,4 (cd)	30,7 ± 3,3 (bc)	22 ± 1,6 (a)	39,5 ± 6 (cd)
		M	3,6 ± 4,3 (c)	5,3 ± 0,4 (cdef)	27,7 ± 0,3 (c)	18,4 ± 1 (c)	44,9 ± 4,3 (abc)
		MP	1 ± 0,1 (c)	6,2 ± 1,6 (cd)	28,4 ± 0,7 (c)	17,6 ± 0,4 (c)	46,8 ± 1,7 (ab)
		MPE	0,9 ± 0,7 (c)	6,3 ± 1,4 (cd)	32,7 ± 3,3 (ab)	18,9 ± 1,8 (bc)	41,1 ± 4 (bcd)
Horizon inférieur	T0	Briques	81,1 ± 3,8 (a)	8,8 ± 1,3 (a)	0,8 ± 0,1 (d)	2 ± 0,7 (e)	7,4 ± 4,3 (e)
	T+6mois	M	80,8 ± 4,3 (ab)	5,5 ± 3,1 (cde)	0,5 ± 0,2 (d)	2,2 ± 0,6 (e)	11 ± 2 (e)
		MP	79,1 ± 1,5 (ab)	6,4 ± 2,5 (abc)	0,7 ± 0,2 (d)	2,2 ± 0,3 (e)	11,5 ± 0,7 (e)
		MPE	77,4 ± 3,1 (b)	8,5 ± 2,3 (ab)	0,8 ± 0,5 (d)	2,1 ± 0,3 (e)	11,2 ± 0,2 (e)
	T0	Bois	84,7 ± 3,6 (a)	5,2 ± 0,9 (cdef)	2,6 ± 0,9 (d)	1,3 ± 0,6 (e)	6,1 ± 2,6 (e)
	T+6mois	O	83,3 ± 0,6 (ab)	3 ± 0,9 (f)	2,5 ± 0,1 (d)	1,7 ± 0,2 (e)	9,4 ± 0,8 (e)
		OP	82,4 ± 5,7 (ab)	4,2 ± 1,5 (def)	2,9 ± 1,5 (d)	1,7 ± 0,5 (e)	8,9 ± 2,9 (e)
		OPE	82,5 ± 1,8 (ab)	3,3 ± 1,1 (ef)	3 ± 0,8 (d)	1,9 ± 0,3 (e)	9,4 ± 2,5 (e)

Tableau 27 : Evolution granulométrique des Technosols entre T0 et T+6mois. Des lettres différentes indiquent des différences significatives au sein d'une même classe.

Les matériaux parentaux présentent une importante différenciation granulométrique. La fraction >5mm représente ainsi plus de 81% en masse du bois et des briques contre seulement 3% pour le mélange (**Tableau 27**). Pour le bois broyé et les briques et tuiles concassées, l'ensemble des autres fractions sont inférieurs à 9%. Dans le mélange organique, les fractions <0,05mm et [2-0,2mm] prédominent, représentant respectivement 43,9 et 31,9% de la masse.

En 6 mois, la distribution granulométrique des matériaux parentaux n'est pas modifiée, hormis un enrichissement en particules les plus fines dans l'horizon inférieur, cependant non significatif.

II.5. Bilan de matière à l'échelle d'un bac

II.5.a. Bilan massique des Technosols

Bilan de masse			O	OP	OPE	M	MP	MPE
Au total (Σ des horizons)	Masse Technosol (kg)	T0	49 ± 1	49 ± 2	47 ± 1	121 ± 6	123 ± 7	117 ± 2
		T+6mois	37 ± 2	41 ± 1	39 ± 1	120 ± 3	118 ± 5	118 ± 7
		T+1an	33 ± 1	34 ± 1	32 ± 1	115 ± 5	115 ± 12	107 ± 7
	%perte de masse	T+6mois	-25%	-16%	-18%	-1%	-4%	2%
		T+1an	-33%	-30%	-31%	-5%	-7%	-8%
Par horizon	Horizon supérieur	T0	31 ± 2	30 ± 3	29 ± 1	28 ± 2	34 ± 4	29 ± 4
		T+1an	20 ± 1	21 ± 1	20 ± 4	22 ± 2	22 ± 3	22 ± 2
	Horizon intermédiaire	T+1an	4 ± 1	5 ± 1	5 ± 2			
	Horizon inférieur	T0	17 ± 1	19 ± 2	18 ± 1	93 ± 5	89 ± 6	88 ± 4
		T+1an	9 ± 1	8 ± 1	8 ± 2	93 ± 4	93 ± 13	85 ± 9
	Perte par lixiviation de matière organique (C * 2) (kg)		- 0,96	- 0,73	- 0,69	- 0,84	- 0,54	- 0,52
A T+1an	Exportation par les cultures (kg)			-0,05	-0,06		-0,05	-0,05
	% des pertes de masse expliquées		- 6%	- 5%	- 5%	-15%	- 7%	- 6%
	% Total pertes de masses non expliquées		94%	94%	94%	85%	91%	93%

Tableau 28 : Bilan massique (en matière sèche) d'un Technosol à l'échelle d'un bac. m.o = Matière organique.

Le **Tableau 28**, nous permet d'observer de fortes différences de pertes de masse entre les traitements avec un horizon inférieur en bois broyé ou briques et tuiles concassées. En moyenne, les traitements O ont perdu en 1 an 31% de leur masse contre 6% pour les M. Ces pertes sont attribuables à 108% en

moyenne (car des gains de masses sont observées pour l'horizon inférieur) à l'horizon supérieur pour les traitements M ; contre 62% pour les traitements à base de bois broyé. En moyenne pour O, OP et OPE, 63% des pertes se déroulent durant les six premiers mois contre 15% pour M, MP et MPE. Le pourcentage de perte de masse expliqué pour l'ensemble des traitements à partir des mesures de lixiviation est faible : entre 5 et 15%. Au regard des stocks initiaux, les exportations de matière par les cultures sont très faibles.

II.5.b. Bilan par élément

- **Bilan pour ...**

Pour les trois éléments quantifiés au sein des Technosols, l'effet des facteurs plantes ou vers semblent négligeables et les tendances sont identiques (**Tableau 29**). En conséquence, seule la comparaison entre horizon supérieur et inférieur et l'effet du type d'horizon inférieur sera décrite ci-dessous.

- ... le carbone organique

Rapporté au stock initial, les pertes en carbone organique sont en moyenne de 42 et 38% durant la première année pour les traitements O et M (**Tableau 29**). Les pertes en carbone sont presque exclusivement liées à l'horizon supérieur pour les traitements M (94% pour M, MP et MPE) et majoritairement avec un horizon inférieur organique (52% O, OP et OPE). Les pertes massiques ont lieu majoritairement pendant les six premiers mois : 71% pour les traitements avec un horizon inférieur à base de bois broyé et 77% avec briques et tuiles concassées. Pour les traitements M l'horizon inférieur s'enrichit en carbone, ce l'on peut expliquer par un transfert de carbone depuis l'horizon supérieur. Les pertes par lixiviation mesurées in-situ représentent entre 5 et 13% des pertes reportées dans le **Tableau 29** pour l'ensemble des traitements.

- ... l'azote total

Les pertes massiques d'azote durant la première année sont comprises, pour l'ensemble des traitements entre 14 et 28% du stock initial (**Tableau 29**). Tous comme pour le carbone, les pertes sont très majoritairement associées à l'horizon supérieur, entre 111 et 192% pour l'ensemble des traitements. Contrairement au carbone, les pertes en azote n'ont lieu qu'à 23% durant les six premiers mois pour la couche supérieure. Les horizons inférieurs s'enrichissent en azote, aussi bien pour les traitements O que M. En additionnant les pertes mesurées par lixiviation et supposées par exportation via les cultures, entre 18 et 53% des pertes reportées peuvent être expliqués par ces processus.

Des Technosols construits à partir de produits résiduaux urbains : services écosystémiques
fournis et évolution

Bilan par élément			O	OP	OPE	M	MP	MPE	
C _{organique}	Au total (Σ des horizons)	Masse (kg) T0	18 ± 0.5	18 ± 0.3	17 ± 0.1	9 ± 0.5	11 ± 1.2	11 ± 1.2	
		T+1an	10 ± 0.03	11 ± 0.04	10 ± 0.06	6 ± 0.03	7 ± 0.09	7 ± 0.07	
		% perte à T+1an	-43%	-39%	-43%	-35%	-39%	-39%	
	Masse (kg)	Horizon supérieur	T0	9,6 ± 0,5	9,1 ± 0,9	8,8 ± 0,4	8,7 ± 0,5	10,4 ± 1,2	8,8 ± 1,1
			T+1an	5,1 ± 0,1	5,7 ± 0,2	5,3 ± 0,4	5,3 ± 0,4	5,9 ± 0,8	5,9 ± 0,8
		Horizon inférieur	T0	8,2 ± 0,5	9 ± 0,7	8,6 ± 0,4	0,4 ± 0,02	0,4 ± 0,03	0,4 ± 0,02
			T+1an	5 ± 0,7	5,3 ± 0,4	4,6 ± 0,8	0,6 ± 0,06	0,7 ± 0,05	0,7 ± 0,04
	Azote total	Au total (Σ des horizons)	Masse (kg) T0	0.9 ± 0.04	0.9 ± 0.07	0.8 ± 0.03	0.7 ± 0.04	0.9 ± 0.1	0.7 ± 0.1
			T+1an	0.7 ± 0.03	0.7 ± 0.04	0.7 ± 0.1	0.6 ± 0.03	0.6 ± 0.1	0.6 ± 0.1
			% perte à T+1an	-25%	-15%	-14%	-18%	-28%	-15%
Masse (kg)		Horizon supérieur	T0	0,8 ± 0,04	0,8 ± 0,07	0,7 ± 0,04	0,7 ± 0,04	0,9 ± 0,1	0,7 ± 0,09
			T+1an	0,5 ± 0,03	0,6 ± 0,04	0,5 ± 0,1	0,6 ± 0,03	0,6 ± 0,09	0,6 ± 0,07
		Horizon inférieur	T0	0,1 ± 0,01	0,1 ± 0,01	0,09 ± 0,004	0,004 ± 0,0002	0,004 ± 0,0002	0,004 ± 0,0002
			T+1an	0,14 ± 0,01	0,16 ± 0,01	0,2 ± 0,02	0,03 ± 0,08	0,03 ± 0,004	0,04 ± 0,008
Potassium total	Au total (Σ des horizons)	Masse (kg) T0	0,7 ± 0,03	0,7 ± 0,1	0,7 ± 0,02	1,4 ± 0,1	1,4 ± 0,1	1,3 ± 0,04	
		T+1an	0,4 ± 0,03	0,4 ± 0,1	0,4 ± 0,1	1,2 ± 0,1	1,1 ± 0,1	1,1 ± 0,04	
		% perte à T+1an	-45%	-42%	-39%	-15%	-21%	-20%	
	Masse (kg)	Horizon supérieur	T0	0,6 ± 0,3	0,6 ± 0,1	0,6 ± 0,03	0,5 ± 0,03	0,7 ± 0,1	0,6 ± 0,1
			T+1an	0,3 ± 0,03	0,3 ± 0,04	0,3 ± 0,1	0,3 ± 0,04	0,3 ± 0,1	0,3 ± 0,03
		Horizon inférieur	T0	0,1 ± 0,01	0,1 ± 0,01	0,1 ± 0,005	0,8 ± 0,04	0,8 ± 0,1	0,8 ± 0,04
			T+1an	0,1 ± 0,02	0,1 ± 0,03	0,1 ± 0,03	0,8 ± 0,04	0,8 ± 0,12	0,8 ± 0,1

Tableau 29 : Bilan par élément entre T0 et T+1an. Les valeurs sont exprimées à l'échelle d'un Technosol et par bac. C_{organique} = carbone organique. Pour des raisons de simplicité et en l'absence de mesure des teneurs en C, N et P dans l'horizon intermédiaire, les teneurs de cet horizon ont été affectées à l'horizon inférieur pour les traitements O, OP et OPE.

○... le potassium total

Les différences de perte au niveau du potassium total entre les traitements à base de bois broyé ou de briques et tuiles concassées (respectivement 42 contre 19% de la masse initiale ; **Tableau 29**) ne reflètent que les teneurs initiales en potassium des briques et tuiles. Ainsi, les pertes massiques sont du

même ordre de grandeur (≈ 300 g). Tous traitements confondus et sur la première année, ces pertes sont dues à l'horizon supérieur pour 98 à 120% (du fait de gain en masse de l'horizon inférieur). Les teneurs en potassium n'ayant pas été mesurées à T+6mois, la dynamique temporelle de ces pertes massiques ne peut être décrite.

III. Discussion

III.1. Biodégradation des composts

L'indicateur de stabilité de la matière organique (ISMO), est habituellement utilisé pour prédire la proportion de matière organique exogène susceptible de contribuer au stock de matière organique stable d'un sol. Dans notre cas, l'indice de stabilité de la matière organique, indique une stabilité du bois relativement faible avec un ISMO de 50,2%. Cet ISMO est proche de celui observé pour des ordures ménagères résiduelles (Obriot 2016). Avec un ISMO de 71,1 %, le mélange est dans la fourchette des valeurs observées pour un compost de bio-déchets ($75,5 \pm 6,3$; Obriot 2016).

In-situ, les pertes importantes de carbone soluble observées, sont un indicateur direct de minéralisation. La dynamique dans le temps des pertes, nous montre d'importantes différences entre les traitements OP et MP. Si l'on compare les pertes en C par lixiviation au volume d'eau de percolation, OP présente des pertes associées totalement corrélées au volume d'eau perdue. Ce qui est dans une moindre mesure, le cas pour MP. Ainsi pour 50% de volume d'eau de percolation perdue, OP présente 60% de perte en C, contre 70% pour MP. Pour 80% du volume d'eau perdue en un an, 80% des pertes en carbone pour OP sont observées contre 90% pour MPE. Ces dissemblances de comportement, montrent une certaine stabilisation de la couche supérieure, visible dans le cas des traitements avec une couche inférieure en briques et tuiles concassées. Le fort potentiel de biodégradation de l'horizon inférieur en bois broyé entraîne une perte en carbone dissous toujours importante au bout d'un an. Ce constat est confirmé par les valeurs de C/N des horizons supérieurs, proches de 10 au bout d'un an et indiquant une matière organique mature (Bernal et al. 1998), alors que les valeurs de C/N de l'horizon inférieur pour O, OP et OPE, comprises entre 18 et 21 indiquent une matière organique en cours d'humification. La forte fraction de cellulose, facilement dégradable, présente dans le bois broyé semble également bien corrélée avec ces observations.

Les études portant sur la décomposition de matière organique apportée en grande quantité sont relativement rares. Vidal-Beaudet et al. (2012) a ainsi étudié la décomposition de deux composts apportés en grande quantité (>50 gC.kg⁻¹ de MS) durant 60 mois. Ces auteurs ont montré que la décomposition de la matière organique était indépendante de la quantité apportée, celle-ci dépendant principalement de la maturité du compost apporté et de l'abondance de certaines fractions granulométriques grossières (>1 mm) et des fractions biochimiques (hémicellulose, cellulose, lignine et

cutine). Par ailleurs, les taux de minéralisation de l'un des deux composts utilisés n'ont diminué qu'au bout de 24 mois. Dans notre cas, prédire la stabilité des matières organiques apportées requiert une étude in-situ sur une période plus longue, couplée à une modélisation. L'utilisation d'un modèle, tel que RothC (Coleman and Jenkinson 1996) conçu pour des sols, tel que développé par Vidal-Beaudet et al. (2012) pour des Technosols, serait de ce point de vue une direction de recherche intéressante.

III.2. Bilan massique et source d'incertitude

Les bilans de masse et d'éléments effectués sont révélateurs des processus en jeu. Néanmoins, d'un point de vue numérique, ils présentent une variabilité forte et une importante partie des pertes restent inexpliquée. Ainsi, même en additionnant les pertes liées à la lixiviation du carbone et en extrapolant les valeurs obtenues in-situ de minéralisation, en moyenne 48% des pertes en carbone et 41% des pertes en N sont expliquées. Ce fort pourcentage de pertes non expliquées, peut avoir quatre origines : (i) une sous-estimation de la minéralisation in situ lorsque l'on utilise les résultats de l'incubation, (ii) des erreurs sur certaines mesures réalisées, (iii) l'absence de mesure de certains flux (par exemple pertes de N par volatilisation d'ammoniaque ou dénitrification) et (iv) l'incertitude inhérente à des mesures expérimentales et qui, dans le cas d'un bilan se cumulent.

Au niveau de l'incertitude sur les mesures, les deux sources majeures de variabilité nous semblent être liées à la mesure d'épaisseur des Technosols, influençant le calcul de leur volume, et à la mesure de la masse volumique apparente utilisée directement pour le calcul des masses. Ainsi, une variation de l'ordre de 2cm dans l'estimation des épaisseurs de couches et un mauvais remplissage, des cylindres pour la détermination de la masse volumique apparente de l'ordre du centimètre, peuvent faire varier les stocks d'environ 10 kg (Barrier-Guillot 2017). De plus, une surestimation de masse volumique apparente, suite à une légère compaction de l'échantillon lors du prélèvement n'est pas impossible.

Les principales mesures manquantes concernent la perte de particules en suspension au sein des eaux de surverse. Au niveau des plantes, bien que peu significatif d'un point de vue massique, l'absence de quantification du gain en masse et en terme de carbone, liée à la non exportation des racines, conduit à une sous-estimation des pertes. Lors d'analyses réalisées à T+6 mois, après la culture d'épinards, les gains en masse par la biomasse racinaire ont été estimés entre 0,17 et 0,23 kg.bac⁻¹. Enfin, un dépôt de particules, léger dans le cas des traitements O et plus important pour les traitements M, a pu être noté au niveau des géotextiles présents sur la partie inférieure des bacs. Ce dépôt, non comptabilisé dans les bilans peut-être une source de variabilité et peut être attribué à un processus de lessivage.

III.3. Premiers processus de pédogénèse

Le fait d'étudier, parallèlement et au travers de différents indicateurs, l'importance de processus liés à la pédogénèse est l'une des originalités de notre étude. Durant cette première année, nous avons pu observer peu de changements physiques des Technosols : l'effondrement non négligeable du Technosol (entre -10 et -20% en épaisseur) ne se traduit pas par une évolution marquée de l'espace poral et ne semble pas au bout d'un an engendrer de tassement. En revanche, le profil du Technosol avec un horizon inférieur organique évolue avec la formation d'un horizon intermédiaire résultant d'un déplacement de matière. Cet effondrement est dû à une perte de masse, par lessivage et lixiviation mais vraisemblablement surtout par biodégradation. Cette hypothèse est confortée par l'observation d'une diminution des C/N au sein de l'horizon supérieur, indicateur de biodégradation et de minéralisation et est cohérente avec l'observation, en incubation, d'une minéralisation rapide du mélange compost de biodéchets et résidus de champignonnière.

Des transferts d'éléments sont observés, des horizons supérieurs aux inférieurs (C, N), ainsi que des pertes nettes de C, N et K. Ces transferts peuvent être expliqués par une lixiviation d'éléments (C, N, K) ou un lessivage de particules organiques (C, N, K). L'existence d'un lessivage est démontrée par la formation d'un horizon intermédiaire en O et par l'observation d'un dépôt de particules sur le géotextile sous le Technosol. Par contre la CEC de l'horizon inférieur en M n'augmente pas, ce qui serait le cas si de petites particules organiques de CEC élevées (voir **Tableau 21**) étaient transportées et retenues dans l'horizon bas des traitements M. La lixiviation est mise en évidence par l'analyse des eaux de percolation, et confortée par la forte diminution de la conductivité électrique, sans doute liée à la lixiviation de sels.

L'augmentation des teneurs et des stocks de carbonate de calcium, peut être expliquée par des apports dus au caractère calcaire de l'eau d'irrigation. Un phénomène de décarbonatation a également pu survenir pour l'horizon supérieur. La pédogénèse précoce de Technosols construits uniquement à partir de résidus urbains est donc particulièrement marquée par la prédominance de la biodégradation et de la lixiviation sur son évolution. En parallèle, un début d'évolution du profil, lié à un lessivage de particules de l'horizon supérieur pour l'un des traitements est observé.

Au vu de l'originalité de la disposition des matériaux, de leurs natures et proportions, peu de travaux équivalents à notre étude peuvent-être trouvés. Toutefois, certaines études abordent les mêmes problématiques avec des caractéristiques proches, principalement en science du sol ou génie pédologique. Ainsi, dans une étude réalisée durant 24 mois, sur des Technosols construits en bicouche à partir de résidus (des composts ; voir Chapitre I : partie 2 - **Tableau 7**) Grosbellet et al. (2011) observent certaines tendances similaires : une première année marquée par une évolution forte de la matière

organique avec la dégradation des composés facilement décomposables. Toutefois, et contrairement à ce qui a été observé dans nos résultats, les auteurs notent en parallèle une augmentation de la masse volumique apparente (pendant les 12 premiers mois), couplée à une diminution de la porosité et une diminution de la taille des pores au sein des Technosols. Dans une autre étude portant sur des sols reconstitués à partir de compost, de boues papetières et de sols traités thermiquement, Séré et al. (2010) rapportent des tendances équivalentes. Ils mettent en évidence deux phases de pédogénèse. La première phase est marquée par des phénomènes intenses et à cinétiques rapides tels que la compaction et une altération chimique avec la perte d'éléments minéraux solubles. La deuxième phase est définie par des phénomènes plus lents tels que la décarbonatation et la formation d'agrégats. Notons les deux différences majeures entre nos Technosols et ces études : la nature de certains matériaux parentaux (notamment l'utilisation de sol) et la profondeur des profils considérés allant de 57 à 115 cm dans les études citées.

Pour évaluer l'intensité des pertes par lixiviation, la littérature concernant les toitures végétalisées constitue un point de référence. Whittinghill et al. (2016a) ont ainsi rassemblé une partie de la littérature sur le sujet. Considérant des pertes de masses annuelles dans les eaux de percolations, les auteurs font état de pertes de nitrates de 33 kg.ha^{-1} estimées en un an d'une toiture productive, par rapport à une fourchette de $0,2\text{-}189 \text{ kg.ha}^{-1}$ pour les toitures végétalisées et $0\text{-}55 \text{ kg.ha}^{-1}$ pour des champs cultivés. Nos valeurs pour les traitements OP et MP sont beaucoup plus élevées, car respectivement de 490 et 932 kg.ha^{-1} pour l'azote minéral. Par ailleurs, ces auteurs évaluent les pertes de solides en suspension (lessivage) à 1513 kg.ha^{-1} en un an pour la ferme contre une fourchette de 8 à 515 kg.ha^{-1} pour les toits végétalisés et $0,1$ à 11080 kg.ha^{-1} pour des champs cultivés. Dans notre cas, les pertes en carbone sont de 7195 et 5338 kg.ha^{-1} pour les traitements OP et MP, soit des pertes en matière organique proches du double. Cette comparaison, bien que limitée du fait d'une diminution des pertes durant la première année, souligne bien l'intensité des pertes observées dans notre étude.

III.4. Déterminants des processus pédogénétiques

Trois facteurs de pédogénèse ont ici été étudiés : la nature des matériaux parentaux (horizon squelette minéral ou organique), la présence de plantes et la présence de vers avec des plantes.

Dans notre étude, la **nature des matériaux parentaux**, n'a pas eu d'influence significative sur l'évolution chimique des Technosols excepté au niveau des pertes par lixiviation en présence de plantes ou de plantes et de vers. Ainsi, les traitements OP et OPE, ont présenté des pertes de carbone plus élevées que MP et MPE. Ce résultat n'étant pas présent pour les bacs sans plante, cela suppose une interaction des plantes avec l'horizon inférieur. En revanche, aucune différenciation significative n'a pu être observée durant la première année au niveau des bilans massiques. Au niveau physique, les propriétés

contrastées des matériaux initiaux aboutissent à une différence d'effondrement entre les deux types d'horizon inférieur, plus importante dans le cas d'horizon inférieur organique, et aboutit à la formation d'un horizon intermédiaire.

La bibliographie concernant l'**impact de la macrofaune** est contradictoire. Jangorzo et al. (2014), lors d'essai en microcosme sur des Technosols montrent que la présence de vers aboutit à une translocation de compost entre horizons, une variation de la porosité et une agrégation des particules de sol. D'un point de vue chimique, des études montrent que la présence de vers peut réduire la concentration en carbone organique dissous au sein des composts pendant le compostage, en parallèle d'une augmentation de sa minéralisation (Nigussie et al. 2017). Dans une étude en laboratoire, Deeb et al. (2016b) montrent un impact des vers sur la micro-porosité. Contrairement à ces résultats, les vers n'ont ici eu quasiment aucun impact significatif sur les paramètres observés durant la première année, ceci malgré un développement important des populations de vers dans les Technosols où ils ont été inoculés, allant de 82 à 547 individus par bac au bout d'un an. Ce manque d'impact peut-être lié au temps relativement court de l'étude, à la catégorie écologique des vers ainsi qu'à l'interaction avec les plantes (création d'une porosité par les vers, pour partie compensée par le développement des racines). Une telle interaction a été démontrée par Deeb et al. (2017).

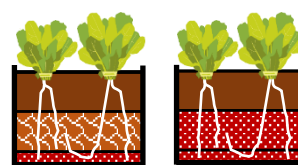
Jangorzo et al. (2014) montrent que la **présence de plantes** entraîne un effet mixte d'augmentation et de diminution de la porosité, lié à leur développement et vieillissement. En horticulture, dans des volumes limités, Michel et Kerloch (2017) reportent des résultats contradictoires au sein de la littérature tendant toutefois à démontrer que le développement de racines au sein de la macroporosité diminue la porosité remplie d'air des substrats. Au niveau physique, nos résultats ne sont pas aussi marqués que ceux trouvés dans la littérature, l'impact des plantes restant faible. Pour l'horizon supérieur, les systèmes racinaires semblent tout de même préserver une partie de la macroporosité (pores de 300 à 95µm) ou de la microporosité (9,5 à 3µm), sans toutefois que la diminution observée, en l'absence de plantes, n'affecte significativement la porosité totale ou le taux d'effondrement. Par contre, les plantes réduisent fortement les volumes d'eau percolés ainsi que les pertes de C et N par lixiviation. Cette réduction peut-être due (i) aux prélèvements d'eau par les plantes, réduisant ainsi les volumes d'eau rejetés, et (ii) aux prélèvements directs de nutriments pour leur développement. Une telle diminution a été également montrée par Aitkenhead-Peterson et al. (2011), dans une étude sur des toitures végétalisées (intensive et extensive), montrent une réduction de pertes de certains éléments (C et N) associés à la présence de plantes.

Conclusion chapitre V

L'étude de la première année d'évolution d'un Technosol constitué de résidus urbains nous a permis de mettre en évidence un certain nombre de processus de pédogénèse. Cette première année a été principalement caractérisée par une forte biodégradation des matières organiques des Technosols, associée à une importante lixiviation. De façon surprenante, cette importante activité biologique, n'a pas été couplée avec une évolution forte des Technosols d'un point de vue physique. Un effondrement, relativement limité, des Technosols a été identifié, avec la formation d'un horizon intermédiaire pour certains traitements au bout d'un an. Des transferts d'éléments (C et N) ont également été mis en évidence.

Contrairement à nos hypothèses initiales, la présence de vers de terre (en présence de plantes), a eu peu d'impact sur la première phase d'évolution des Technosols. La présence de plantes a également eu un effet faible, qui s'est principalement traduit par une moindre lixiviation, en relation avec des transferts d'eau réduits. Un impact sur certaines classes de pores a également pu être observé, sans que cela ne se traduise par un tassement ou une évolution physique générale différenciée du Technosol. En revanche, le choix d'un horizon inférieur organique minéral ou organique a affecté l'intensité de différents processus tels que l'effondrement ou la lixiviation. L'ensemble des résultats est résumé au sein du **Tableau 30** et de la **Figure 72**.

Les résultats de notre étude rejoignent pour partie ceux d'autres études montrant une évolution pédogénétique des Technosols construits particulièrement intense durant la première année. Néanmoins, la courte durée de notre étude ne permet pas, en l'état, d'appréhender les évolutions futures des Technosols, notamment du point de vue des matières organiques en place. Celles-ci semblent se stabiliser pour certains traitements en fin de première année, sans toutefois que cela puisse être affirmé. Une étude sur un plus long terme couplée à une approche prédictive à l'aide d'une modélisation de l'évolution des stocks de C et N semble une direction de recherche intéressante.



OP

MP

% de perte de masse totale	-29%	-7%
% de perte de masse de l'horizon supérieur par rapport à la perte de masse totale	59%	144%
Perte par lixiviation de matière organique (kg)	0,7	0,5
Epaisseur au bout d'un an du Technosol (% de l'épaisseur initiale)	82 ± 4	88 ± 0,3
Evolution du profil par création d'un horizon	Oui	Non
Perte en Nmin lxivié (g.bac ⁻¹)	24,7	47
Perte en C lxivié (g.bac ⁻¹)	362,7	269,1

Tableau 30 : Résumé d'indicateurs de certains processus de pédogénèse observés durant cette première année pour deux traitements. N.B. : la valeur de 144% pour MP, est liée à des gains de masse au niveau de l'horizon inférieur.

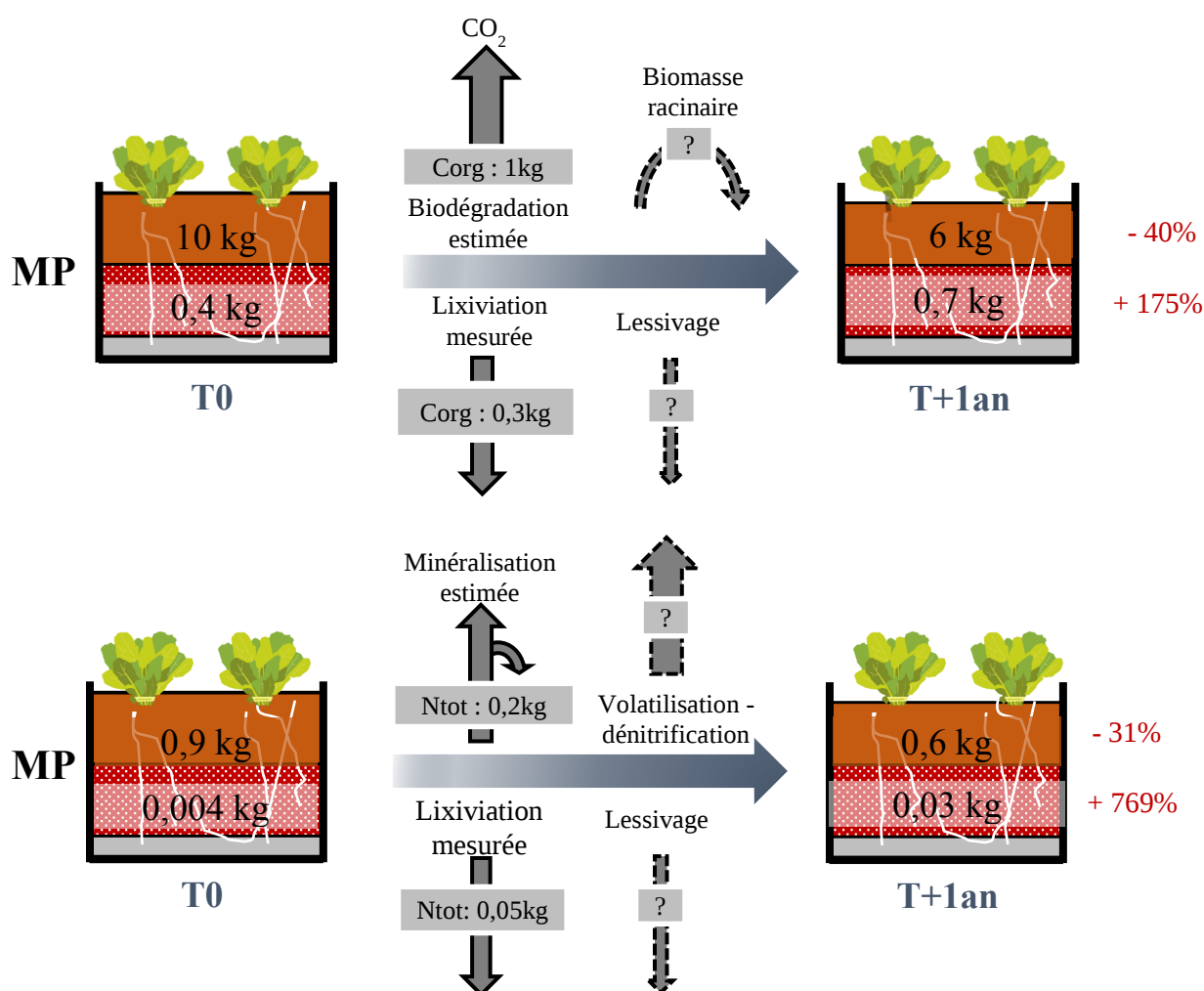


Figure 72 : Représentation schématique pour un traitement de l'évolution des stocks de carbone (en haut) et d'azote (en bas), et des principaux processus quantifiés.



Toiture d'AgroParisTech en juin 2016. © Mairie de Paris

Chapitre VI : Discussion générale

Nos villes sont, aujourd'hui encore, en pleine expansion et densification, réduisant de plus en plus les espaces de biodiversité au sein et autour d'elles. De ce fait, la végétalisation du bâti est devenue l'un des outils d'aménagements des villes d'aujourd'hui et de demain. Les toitures productives (i.e. de biomasse alimentaire) sont à cet égard développées pour les services écosystémiques qu'elles peuvent rendre. Toutefois, ces toitures restent mal connues, tant dans leur conception, que dans leurs fonctionnements et impacts environnementaux. Au travers de ces travaux de thèse, nous avons proposé un autre modèle de toiture végétalisée que celle classiquement mise en place. Nous nous sommes fixés la contrainte de concevoir un Technosol productif uniquement à partir de résidus urbains. Ce travail a été conduit dans un double objectif (i) d'étudier les services écosystémiques rendus et (ii) de mieux comprendre le fonctionnement et l'évolution des Technosols. L'idée sous-jacente étant d'optimiser les services écosystémiques rendus.

Pour répondre à ces objectifs, ces travaux se sont appuyés sur différents dispositifs expérimentaux in-situ. Nous allons tout d'abord voir les réponses apportées aux questions initiales posées avant de discuter de l'ensemble des résultats, des limites du travail et des perspectives.

- **Des toitures multifonctionnelles**

- *Question n°1: Quels sont les services et di-services écosystémiques rendus par un Technosol productif ? Existe-t-il des compromis entre services ?*
- *Question n°2 : Comment se situent ces services par rapport à une toiture végétalisée non productive ?*

A l'aide d'une analyse quantitative, notamment basée une analyse de flux, nos travaux ont montré que des Technosols productifs à base de résidus urbains pouvaient engendrer certains services écosystémiques comme ceux de production alimentaire, de recyclage de résidus urbains, de rétention de l'eau de pluie ou de rétention de nitrates. En comparaison à une toiture végétalisée non productive, nous avons pu voir que le niveau des services rendus était équivalent voire supérieur. Les toitures productives générant de nouveaux services tels que la production alimentaire ou le recyclage de résidus urbains. La comparaison avec un autre type de Technosol, le témoin en terreau, a montré que les niveaux de service rendus étaient équivalents avec néanmoins des différences sur la lixiviation de l'azote minéral (supérieures pour le terreau) et du carbone dissous (supérieurs pour les résidus organiques).

Les analyses de flux de nutriments dans les eaux de percolation ont permis de montrer que si les Technosols à base de résidus urbains sont des puits de nitrates sur deux années, ils agissent en revanche

comme des sources de carbone. Bien qu'aucune donnée publiée ne permette de comparaison des quantités perdues, les concentrations observées en moyenne sur les deux ans sont bien supérieures à celles reportées pour des toitures végétalisées non productives, intensives ou extensives (environ 5 fois supérieur ; Chapitre III : partie 1 - **Tableau 12**). Cette importante lixiviation représente l'un des défis dans la conception des Technosols à vocation alimentaire. En effet, la perte de carbone soluble peut-être expliquée par les propriétés des composts et le processus de biodégradation ayant lieu au sein des Technosols. Le processus de biodégradation est intimement lié à la minéralisation des nutriments et donc au service de production de biomasse alimentaire. La lixiviation observée entraîne de ce fait, un **compromis entre services rendus** et plus particulièrement entre le service d'approvisionnement alimentaire et celui de qualité des eaux de ruissellement. Par ailleurs, seuls deux éléments (C et N) ont ici été étudiés, mais nous pouvons faire l'hypothèse que d'autres éléments peuvent être associés au C tels que le potassium, connu pour sa mobilité, le calcium, le magnésium ou le sodium, comme reporté, au niveau d'une autre toiture productive par Whittinghill et al. (2016a).

Notre étude n'a que partiellement abordé un aspect essentiel au niveau des services rendus : celle de **l'évolution** des Technosols dans le temps. La fonction de production alimentaire est restée relativement constante au cours du temps. Néanmoins, le temps affecte de manière importante d'autres processus tel que la lixiviation. Ainsi, pour le traitement L-I du dispositif n°2, 71% des pertes massiques en carbone et 86% des pertes en nitrates ont lieu la première année. Cette intégration de la dimension temps dans la quantification des services est rarement réalisée au niveau des toitures végétalisées et nécessite de mieux comprendre l'évolution des Technosols. En l'occurrence, cette dernière semble tendre vers la minimisation de certains dis-services, via une diminution de la lixiviation. Ce résultat nécessite toutefois un recul plus important et le test d'autres variables (nature des matériaux parentaux, itinéraire technique, etc.).

- **Fonction de production alimentaire**

- *Question n°3 : Un Technosol construit uniquement à partir de résidus urbains organiques permet-il une production alimentaire significative d'un point de vue quantitatif et acceptable au plan qualitatif ?*
- *Question n°4 : Le niveau de production et la qualité des légumes sont-ils influencés par le type de sol et/ou son évolution ?*

La deuxième partie du chapitre III, nous a permis de voir que les Technosols étudiés permettent d'atteindre des niveaux de productions équivalents pour certaines productions à ceux de maraîchers professionnels (ITAB 2017) ou reportés dans la littérature (Orsini et al. 2014). En comparaison à un terreau, les niveaux de production sont également équivalents voire supérieurs. Le choix des référentiels

peut-être discuté, le terreau aurait pu par exemple, être fertilisé comme cela est couramment pratiqué. Néanmoins, ces comparaisons montrent bien la pertinence des systèmes de cultures mis en place. Par ailleurs, ce résultat rejoint ceux reportés par de nombreuses études en horticulture, montrant l'intérêt de l'utilisation du compost en tant que support de production (Hartz et al. 1996; van der Gaag et al. 2007a).

L'étude de l'agencement et la nature des Technosols a montré leurs effets sur la production de biomasse alimentaire. La structuration initiale d'un Technosol en couche, selon le type de légumes, semble avoir un impact positif sur le niveau de production, notamment des légumes feuilles. L'absence de mesures in-situ et en laboratoire, telles que des cinétiques de minéralisation ou des analyses de l'espace poral, ne permettent malheureusement pas de déterminer le ou les mécanismes ou les processus responsables de cet effet. En parallèle, nous avons pu montrer l'intérêt agronomique de produits tel que les résidus de champignonnière du point de vue de la production alimentaire. En revanche, la nature de la couche squelette (organique ou minérale) n'a eu que peu d'effet sur la production durant une première année de culture. La faune du sol a, quant à elle, montré un impact différent selon la nature de l'horizon supérieur avec une absence d'impact dans un premier cas, et un impact négatif et positif dans le deuxième. Enfin, le vieillissement du Technosol semble ne pas affecter négativement le niveau de production des Technosols sur 5 saisons de cultures. Cet aspect n'a jamais été directement étudié dans les autres articles sur le sujet (Whittinghill et al. 2013 ; Orsini et al. 2014). L'ensemble de ces résultats nous amène à conclure que l'agencement des matériaux parentaux et la nature de leur matière organique sont les facteurs majeurs influençant la fonction de production alimentaire.

Sur le plan qualitatif, 10 cultures, correspondant à 5 légumes différents ont été analysées pour leur teneur en ETM et aucune, à part une récolte d'épinards sur le dispositif n°3, ne présentait des teneurs supérieures aux normes existantes pour le Pb et le Cd. Ces résultats, bien que limités, rejoignent ceux des premières études sur le sujet montrant des résultats encourageants quant à la culture hors sol sur substrat (Vittori Antisari et al. 2015), ou en toiture (Gelman 2014) vis-à-vis des polluants. Néanmoins, il serait nécessaire de réaliser un suivi sur le plus long terme afin d'appréhender les conséquences de l'évolution temporelle des Technosols. La biodisponibilité des éléments traces métalliques peut ainsi varier au cours du temps, en lien avec l'évolution des Technosols. Par ailleurs, l'impact d'autres facteurs comme celui de la hauteur de l'immeuble sur lequel est placé un jardin nécessite des études complémentaires.

- **Des Technosols fertiles en évolution**

Un sol construit correspond à un ensemble dynamique d'éléments répartissables en compartiments et en interaction sous l'action de facteurs extérieurs (voir Chapitre I-facteur de pédogénèse). Ces interactions sont retranscrites par différents processus : prélèvement de nutriments par les plantes, transport

d'éléments (sous forme dissoute, colloïdal ou particulaire), biodégradation de la matière organique etc. Nous avons ici étudié cette évolution sous deux angles : celui de la fertilité et de la pédogénèse pour un modèle de Technosol donné.

- *Question n°5 : Comment évoluent les stocks de nutriments présents au sein du Technosol durant la première année ?*
- *Question n°6 : La fertilité du Technosol uniquement constitué de résidus urbains est-elle satisfaisante et le reste-t-elle après un an de culture ?*

Nous avons choisi d'étudier la fertilité des Technosols en place au travers d'indicateurs physiques et chimiques. Contrairement aux hypothèses que nous avons faites, la nature organique ou minérale de la couche squelette, avec des propriétés contrastées, n'a eu qu'un impact négligeable sur la fertilité des Technosols. La première année de cultures a montré une stabilité de la fertilité physique, en l'absence d'évolution significative de la porosité du Technosol. En revanche, d'un point de vue chimique des évolutions sont importantes avec une baisse des stocks de N, P et K. Néanmoins, concernant la fertilité, les caractéristiques du Technosol ont permis un bon développement des cultures la première année. Enfin, la présence de vers n'a pas affecté de manière significative les indicateurs de fertilité des Technosols.

Nous avons mis en évidence deux compromis essentiels au niveau du Technosol productif. Le premier compromis se situe entre fourniture d'éléments minéraux par biodégradation et maintien de la fertilité physique du Technosol, donc entre des composantes de la fertilité physique et chimique. La conception des Technosols étudiés semble permettre la gestion de ce compromis. En revanche, un deuxième compromis, entre fourniture d'éléments minéraux par biodégradation de la matière organique et lixiviation est problématique.

- *Question n°7 : Comment des Technosols, formés à partir de matériaux riches en matière organique, évoluent-ils à court terme (1 an) ? Quels processus de pédogénèse peut-on observer et quelle est leur importance relative ?*
- *Question n°8 : Quel est le bilan C au sein du Technosol durant la première année d'implantation ?*
- *Question n°9 : Quel est l'impact des matériaux parentaux, des plantes cultivées et d'ingénieurs du sol sur les premières étapes de pédogénèse ?*

Comme reporté par d'autres études sur des Technosols comparables (Grosbellet et al. 2011), le processus de biodégradation a nettement dominé la première année de pédogénèse des Technosols en place. Celle-ci a été associée à un processus de lixiviation conséquent. En revanche, l'évolution physique des

Technosols a été relativement faible. L'importante biodégradation observée en laboratoire, et mise en évidence in-situ, ne s'est pas accompagnée d'un tassement ni d'une évolution de l'espace poral. Comme pour la fertilité, l'impact de la faune du sol n'a pas été significatif. La présence ou l'absence de plantes a affecté en revanche certains paramètres (lixiviation moins forte pour le carbone et l'azote en présence de plantes) sans modifier les tendances observées. La présence d'une couche squelette organique en comparaison à une couche squelette minérale, n'a de même pas modifié l'importance respective des processus mais a eu un impact significatif sur certains. La présence d'une couche squelette organique, a en effet conduit à un effondrement plus important, lié à la formation d'un horizon intermédiaire ainsi qu'à des pertes par lixiviation plus fortes pour le carbone et l'azote.

L'importante biodégradation observée durant la première année de culture ne s'est pas accompagnée d'une fragmentation des particules organiques du Technosol. Ce résultat est surprenant et contradictoire avec ceux observés par Grosbellet et al. (2011), qui a montré une fragmentation de la matière organique durant la première année d'un Technosol. Par ailleurs, comme l'ont démontré certains travaux (Grosbellet 2008), des indices de stabilité de la matière organique tel que l'ISB peuvent devenir limités pour prédire l'évolution d'un pool de matière organique dans le cas d'apport de celle-ci en grande quantité. Dans cette perspective, notre travail a montré que le comportement des matières organiques apportées correspondait bien à la tendance décrite, par l'indicateur de stabilité de la matière organique ISMO sur une année. Néanmoins, la question de l'évolution de la matière organique apportée sur le moyen et le long terme, et de sa modélisation à partir de valeurs tel que l'ISMO, conçu pour un apport d'amendement au sol, reste posée. Les matières organiques en place au niveau des Technosols étudiés, semblent en effet se stabiliser au bout d'une année, ces résultats nécessitant toutefois d'être confirmés.

- Impact du type de matière organique

Le type de matière organique n'a pas été une variable testée directement sur les dispositifs expérimentaux, à part sur le dispositif n°1 avec l'incorporation de résidus de champignonnière dans l'un des traitements (L-R). Cependant, les traitements L et OP, des dispositifs n°2 et 3, ne diffèrent que par la nature des matières organiques de l'horizon supérieur et leur comparaison est intéressante pour donner des pistes sur l'effet du type de matière organique sur la lixiviation. Les différences entre ces traitements et leurs principaux résultats, à l'issue d'une saison de cultures, sont résumées au sein du **Tableau 31**.

Le **Tableau 31** montre des dynamiques d'effondrement différentes durant la première année entre les dispositifs (l'effondrement de L étant supérieur à celui d'OP). Les pertes par lixiviation sont également bien différenciées entre les deux traitements : les pertes en carbone et azote minéral sont ainsi 10 fois supérieures pour OP. Cette différence montre bien l'impact du type de matière organique sur le processus de lixiviation et donc de biodégradation. Néanmoins, malgré des volumes d'eau de surverse

proches, les différences entre les deux dispositifs (d'année, de période d'implantation, de rotation de culture etc.) ne permettent pas de conclure sur cette différence.

Le compost de déchets verts, bien qu'ayant un ISMO proche de celui du compost de biodéchets (Lashermes et al. 2007), présente une plus faible capacité de minéralisation en laboratoire et est connu pour avoir une matière organique relativement stable liée à sa richesse en lignine (Benoît et al. 2014). Ceci explique sans doute l'observation de comportements différents in-situ.

Dispositif expérimental n°	2	3
Date d'implantation et période concernées	Mars 2013 à 2014	Novembre 2015 à 2016
Traitement	L	OP
Nature et épaisseur de l'horizon supérieur initiale	Compost de déchets verts (15cm)	Mélange (15cm)
Nature et épaisseur de l'horizon inférieure initiale	Bois broyé (15cm)	Bois broyé (15cm)
Rotation de culture	Laitues - Tomates - Engrais vert	Epinards - Choux et Haricots - Laitues
Présence d'une réserve d'eau	Oui	Non
Nature de l'horizon drainant ou de la réserve d'eau	Billes d'argiles expansées	Briques et tuiles concassées
Effondrement à T+1an (en % de l'épaisseur initiale)	64 ± 2	82 ± 4
Perte par lixiviation	TC (kg.m ⁻²)	0,08 ± 0,007
	Nmin (kg.m ⁻²)	0,003 ± 0,0007
Irrigation (l.m ⁻²)		279
Volume Pluie (mm.m ⁻²)		608
Surverse (l .bac ⁻¹)		211 ± 35
		621
		635,4
		162 ± 22

Tableau 31 : Résumé des principales différences et des principaux résultats comparables entre les dispositifs n°2 et 3.

- Concevoir des Technosols productifs
 - *Question n°10 : Des Technosols productifs constitués uniquement de résidus urbains sont-ils une voie de végétalisation productive durable ?*

Végétaliser la ville nécessite d'utiliser des matières souvent issues de l'extérieur du milieu urbain et de ressources naturelles non renouvelables, telles que la terre végétale ou la pouzzolane. L'idée de recycler les résidus urbains dans des projets de végétalisation, n'est pas nouvelle. Nos travaux se situent ainsi

dans la lignée d'autres travaux visant à optimiser l'utilisation de résidus urbains dans le cadre d'opération de végétalisation (Séré 2007; Grosbellet 2008; Rokia 2014). Notre démarche a néanmoins été innovante en proposant l'intégration d'un nouvel objet d'étude (e.g. la création de Technosol productif de biomasse alimentaire dans le cadre de toiture productive) avec une contrainte forte (e.g. utiliser uniquement des résidus urbains). De manière à comprendre les apports et limites de notre étude du point de vue de la conception d'un Technosol productif, nous allons voir les différentes étapes de celle-ci.

La mise en place d'un espace végétalisé en ville, répond avant tout à un objectif de végétalisation. Dans le cas d'une toiture productive, l'objectif premier est celui de production de biomasse alimentaire. L'importance de cet objectif est ensuite modulée par la prépondérance de la fonction (e.g. dichotomie entre une ferme productive en toiture dans un objectif de vente et un jardin partagé). De ce point de vue nous avons proposé d'associer à cet objectif un bouquet de services écosystémiques. L'optimisation de ces services sera définie par l'objectif du projet mais également par son contexte (e.g. contrainte réglementaire liée au PLU) et son environnement (e.g. prise en compte d'une problématique forte de ruissellement des eaux de pluies).

Une fois ces objectifs et contraintes définis, l'étape clé est celle du choix du Technosol à mettre en place. Ce choix s'effectue à deux niveaux : (i) en premier, la sélection des matériaux utilisables puis (ii) le choix de leurs agencements, proportion et mélange. Le champ des possibles des matériaux utilisables est défini comme nous l'avons dit par (i) les objectifs et contraintes du projet mais également (ii) des critères économiques et (iii) la disponibilité des matériaux. Une fois le champ des possibles des matériaux définis, leurs agencements et proportions sont définis grâce à des indicateurs de fertilité, voire la modélisation de leurs propriétés (Rokia 2014), au regard des fonctions attendues. De ce point de vue, les traitements mis en place, dans le cadre de ces travaux, pourraient être optimisés en intégrant des retours d'expérience de projets tel que le projet SITERRE (Coulon and Damas 2016) et/ou en effectuant une pré-sélection approfondie des mélanges, comme cela a pu être fait par exemple dans la thèse de Sarah Rokia (2014).

Dans le cadre de nos travaux nous sommes partis d'un modèle simplifié de Technosols en bicouche, uniquement à partir de résidus urbains. Chaque couche a une fonction spécifique : l'horizon supérieur, visant l'approvisionnement en nutriments et en eau des plantes et l'horizon inférieur, dit « squelette », ayant un double rôle de drainage et de maintien d'une certaine porosité remplie d'air pour les plantes. A cet égard, notre étude a permis de mettre en évidence les conséquences de l'agencement vertical des matériaux, montrant ainsi un intérêt à répartir certains matériaux en couches plutôt qu'en mélange. L'ensemble des résultats de nos travaux permet de montrer que sur une période allant d'une année de cultures à cinq années, il est possible de maintenir un niveau de fertilité physique et chimique des Technosols suffisant pour une production significative de biomasse alimentaire. Ces résultats mettent

en évidence, qu'un compromis entre biodégradation des Technosols et fertilité physique et chimique peut être trouvé.

Par ailleurs, nous avons mis en évidence l'existence d'un autre compromis clé dans la conception de ces Technosols : celui qui se situe entre la décomposition de la matière organique et la lixiviation. Ce compromis, reflète l'une des contradictions de base des propriétés des Technosols productifs, reposant uniquement sur la minéralisation des Technosols pour l'alimentation des plantes : maintenir un taux de minéralisation suffisant pour assurer la fertilité chimique du Technosol et éviter dans le même temps des pertes par lixiviation. De ce point de vue, l'utilisation d'un horizon inférieur minéral a permis de réduire la lixiviation en azote minéral et carbone. Notre étude souligne le besoin de recherches sur ce deuxième compromis. Un certain nombre de leviers d'optimisation peuvent être distingués par rapport aux modèles étudiés dans cette étude :

- Au niveau du Technosol :

- (i) En premier lieu, la **nature de la matière organique et des matériaux parentaux** : la comparaison de l'importance des lixiviations entre les traitements L et OP sur deux dispositifs (**Tableau 31**), montre que si l'utilisation de compost de déchets verts semble bien réduire les pertes en carbone, ces pertes restent conséquentes. Cette observation, souligne l'un des premiers leviers d'optimisation des Technosols étudiés dans cette thèse : la nature de la matière organique et sa stabilité. L'utilisation en mélange, au sein de l'horizon fertile, de matériaux avec deux potentiels de biodégradation différenciés, paraît être intéressante. Cela revient à penser la matrice fertile du Technosol comme composée de deux types de matières organiques : l'une se biodégradant rapidement permettant de subvenir aux besoins des plantes dès les premiers mois et une autre plus stable, permettant une libération plus progressive de nutriments. Par ailleurs, le mélange d'un matériau organique avec une capacité de minéralisation importante avec un matériau minéral présentant des capacités d'absorption, pourrait être pertinent. Enfin, l'acidification des conditions très alcalines présentes au sein des Technosols est un autre levier potentiel. Les conditions alcalines sont en effet connues pour favoriser la solubilisation de la matière organique (Camps Arbestain et al. 2008).
- (ii) **Quantité et proportion des matériaux parentaux** : une réduction de la quantité initiale de compost semble souhaitable. Par exemple, pour le dispositif n°3, les stocks initiaux concernant l'azote présent dans l'horizon supérieur, et potentiellement minéralisable, représentait 8 fois les besoins de la rotation de culture sur une année.
- (iii) Par ailleurs, si **l'agencement des matériaux parentaux du Technosol** a montré une influence sur la productivité des systèmes en place, il serait intéressant de tester leurs influences sur les pertes du système.

- Sur le plan Technique :

D'autres solutions pour optimiser sont envisageables telles que le stockage et la réutilisation des eaux de percolation comme pratiqué dans des systèmes hydroponiques fermés. Néanmoins, le caractère biologiquement actif de l'eau de percolation peut poser des questions techniques et sanitaires, du point de vue des pathogènes par exemple (Majsztrik et al. 2017). Enfin, l'irrigation, élément influençant fortement l'évolution du sol en place (Michel and Kerloch 2017), peut être largement optimisée pour limiter au maximum le débordement (ce qui n'était pas le cas ici) ainsi que la consommation d'eau des systèmes en place.

- Au niveau des plantes :

Enfin, le type de plante cultivée, a été vu au cours de ces travaux comme impactant l'effet de certains matériaux ou agencement. Par ailleurs, le type de plantes cultivées, a été montré comme l'un des facteurs influençant la fonctionnalité du sol de toiture végétalisée (lixiviation, cycle des nutriments etc. ; Dusza 2017). L'étude de l'effet de la nature des plantes cultivées sur les services rendus, en particulier dans des systèmes intensifs en terme de pratique, paraît être une perspective intéressante et nécessaire.

- **Limites de l'étude**

Comme toutes démarches expérimentales in situ, le travail réalisé au cours de cette thèse est caractérisé par des limites inhérentes à cette démarche et aux contraintes qui lui sont propres.

Le temps d'étude relativement court au regard des processus de pédogénèse ne permet pas d'entrer dans une démarche prédictive sur les évolutions futures des Technosols en place. D'après la littérature, l'acquisition progressive d'une structure complexe au niveau du Technosol pourrait limiter les transferts de particules, et une stabilisation des matières organiques en place pourrait limiter les pertes par lixiviation, mais la courte durée de notre étude ne permet pas de tester ces hypothèses. Le temps d'étude des processus pédogénétiques dont nous avons disposés (1 an), a été trop faible pour permettre l'observation d'un équilibre entre le sol et son environnement, si tant est qu'un état d'équilibre, comme cela peut être observé pour des sols naturels, puisse être observé pour des Technosols construits productifs subissant une forte pression anthropique.



©Natalie Rak

Conclusion générale

Nous avons, dans ces travaux de thèse étudié une nouvelle forme de toiture végétalisée et mis en avant un nouveau champ de recherche, celui des toitures végétalisées productives de biomasse alimentaire. Nous donnant comme contrainte de n'utiliser que des résidus urbains en tant que support de culture, nous avons évalué les services écosystémiques rendus et étudié l'évolution temporelle des Technosols. Pour cela, trois dispositifs expérimentaux en toiture ont été suivis et ont permis de tester différents modèles de Technosols.

La multifonctionnalité de ces toitures a été mise en lumière et a permis de distinguer certains leviers d'optimisations des services écosystémiques rendus. Ainsi, l'existence d'un double compromis dans la conception des Technosols en place a été mise en évidence : un premier compromis entre biodégradation de la matière organique et maintien d'un niveau de fertilité physique et chimique a émergé, et a été vu comme réalisable durant un ou plusieurs cycles de cultures. En parallèle, l'existence d'un deuxième compromis entre biodégradation et lixiviation a été démontrée. Ce deuxième compromis nécessite d'autres recherches visant à optimiser la composition des Technosols productifs au regard des services rendus.

Les résultats acquis dans cette thèse ouvrent un nouveau champ d'étude, lié à une pratique aujourd'hui en expansion. L'optimisation des systèmes de cultures mis en place au regard des services écosystémiques rendus, est désormais nécessaire. Trois grands domaines d'optimisation peuvent-être distingués :

- **Technosol** : nous avons vu que les Technosols pouvaient être optimisés, au regard d'éléments existant dans la bibliographie tant au niveau de la nature des matériaux parentaux, que de leurs proportions et agencements. De manière complémentaire, l'intégration de critères économiques (e.g. coût des matériaux), spatiaux (e.g. disponibilité des matériaux) et réglementaires (e.g. limite dans l'utilisation de certains résidus) est indispensable pour permettre un développement à large échelle. En parallèle, la caractérisation de nouveaux gisements de résidus (comme le marc de café issu de champignonnières) et l'adaptation des produits compostés aux contraintes d'un Technosol productif de biomasse alimentaire paraît être une direction de recherche intéressante. Les méthodes de compostage actuelles sont en effet pensées pour un apport au sol des matières organiques exogènes, et non une « auto-utilisation » de celles-ci, comme nous avons pu le mettre en œuvre dans ces travaux.
- **Les itinéraires techniques** doivent être adaptés aux systèmes en place et aux services qui en sont attendus. Ainsi, en lien avec l'évolution des Technosols, la fertilisation des systèmes doit être étudiée comme par exemple, au niveau de l'apport de produits résiduels (fréquence, type

et méthode). D'autres éléments de la gestion du système nécessitent aussi un effort de recherche, en lien avec la composition des Technosols : irrigation (type et fréquence en vue de minimiser l'intrant en eau), paillage, réutilisation des eaux de percolation, etc.

- **La culture** : élément essentiel du système de culture, le choix des plantes et de leurs associations doit également être pensé selon différents critères : économique, productif (quantité et qualité), paysager, etc.

Dans une optique de développement opérationnel du modèle étudié ici, la prise en compte d'autres services apparaît nécessaire : bilan énergétique des bâtiments, atténuation de la pollution de l'air en ville, réservoir de biodiversité, fonction sociale – éducative et pédagogique etc. L'intégration des premiers retours d'expériences sur les micro-fermes urbaines existantes (Daniel 2017) paraît être un élément indispensable pour adapter les pratiques et les systèmes en conséquences.

D'un point de vue plus général, l'intégration d'outil tel que les analyses de cycle de vie dans la conception de ces systèmes permettra de minimiser leurs impacts environnementaux. Ainsi, une analyse de cycle de vie réalisée sur l'un des systèmes analysés dans ce manuscrit (le dispositif n°2), montre la réduction de l'impact carbone par kg de biomasse produite avec l'utilisation de résidus urbains en tant que Technosol, en comparaison à un terreau (Dorr et al. 2017). L'utilisation de ce type d'analyse, doit permettre d'orienter les choix réalisés pour les différentes composantes du système.

Au-delà, de l'objet toiture végétalisée, dans lequel cette thèse a été réalisée, la conception de Technosol productif peut et doit être appréhendée dans d'autres contextes. Ainsi, l'utilisation de délaissés urbains telles que des friches présentant des sols pollués, représente une opportunité d'extension de ces formes de cultures hors sol à partir de résidus urbains. Cela a d'ailleurs été réalisé au sein du projet de démonstrateur « Les fermes en villes »²⁵, mis en place par l'association du Vivant et la ville. De tels projets offrent un potentiel de développement important à ce type de Technosol, au-delà des toitures.

Même sans nourrir les villes de demain, la réimplantation de micro-fermes urbaines constituent une opportunité de développer des espaces multifonctionnels, de biodiversité, permettant de reconnecter les populations urbaines à la production alimentaire. Par ailleurs, les possibilités d'implantation de ces systèmes sur le bâti comme au sol, offrant de multiples alternatives de développement à l'avenir, font qu'ils deviendront probablement de plus en plus incontournables dans les aménagements futurs des villes de demain. Conduisant à l'émergence d'un nouveau champ disciplinaire : l'agronomie urbaine.

²⁵ <http://www.lesfermesenvilles.com/>



Toiture d'AgroParisTech en juin 2016 – zone dite de « biodiversité ». © Mairie de paris

Bibliographie

- Abad M, Noguera P, Burés S (2001) National inventory of organic wastes for use as growing media for ornamental potted plant production: case study in Spain. *Bioresour Technol* 77:0–3.
- Aerts R, Dewaelheyns V, Achten WMJ (2016) Potential ecosystem services of urban agriculture : a review. 1–6.
- AFNOR 44-551 (2009) Norme NF U 44-551 : supports de culture.
- Agreste (2013) Infos rapides. Agreste Infos rapides - <http://www.agreste.agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/conjinfoleg201311toma.pdf> 6:2–5.
- Aitkenhead-Peterson JA, Dvorak BD, Volder A, Stanley NC (2011) Chemistry of growth medium and leachate from green roof systems in south-central Texas. *Urban Ecosyst* 14:17–33. doi: 10.1007/s11252-010-0137-4
- Alexander PD, Alloway BJ, Dourado AM (2006) Genotypic variations in the accumulation of Cd, Cu, Pb and Zn exhibited by six commonly grown vegetables. *Environ Pollut* 144:736–745. doi: 10.1016/j.envpol.2006.03.001
- Alloway BJ (2004) Contamination of soils in domestic gardens and allotments: a brief overview. *L Contam Reclam* 12:179–187. doi: 10.2462/09670513.658
- Aloisio JM, Tuininga AR, Lewis JD (2016) Crop species selection effects on stormwater runoff and edible biomass in an agricultural green roof microcosm. *Ecol Eng* 88:20–27. doi: 10.1016/j.ecoleng.2015.12.022
- Alsop S, Ebbs S, Retzlaff W (2009) The exchangeability and leachability of metals from select green roof growth substrates. *Urban Ecosyst* 13:91–111. doi: 10.1007/s11252-009-0106-y
- Ampim P a Y, Sloan JJ, Cabrera RI, et al (2010) Green Roof Growing Substrates: Types, Ingredients, Composition and Properties. *J Environ Hortic* 28:244–252.
- ANSES (2011) Étude de l'alimentation totale française 2 (EAT 2) Tome 1.
- APUR (2013) Étude sur le potentiel de végétalisation des toitures terrasses à Paris. 39p.
- Argouarc'h J (2005) Les cultures légumières en agriculture biologique. 1–119.
- Aubry C (2013) L'agriculture urbaine, contributrice des stratégies alimentaires des mégapoles?
- Aubry C, Dabat M, Mawois M (2010) Fonction Alimentaire de l'agriculture urbaine au Nord et au Sud: Permanence et renouvellement des questions de recherche. ... *Agric Food* 1–13.
- Aubry C, Ramamonjisoa J, Dabat M-H, et al (2012) Urban agriculture and land use in cities: An approach with the multi-functionality and sustainability concepts in the case of Antananarivo (Madagascar). *Land use policy* 29:429–439. doi: 10.1016/j.landusepol.2011.08.009
- Bacholle C, Leclerc B, Coppin Y, et al (2006) Utilisation des produits organiques en reconstitution de sols : Inventaire des pratiques en France, Etat des connaissances liées aux impacts de ces pratiques. In: *Actes des 9èmes Journées Nationales de l'Etude des Sols*. pp 51–52
- Barles S (2008) Comprendre et maîtriser le métabolisme urbain et l'empreinte environnementale des villes. *Ann des Mines - Responsab Environ* 52:21. doi: 10.3917/re.052.0021
- Barles S (2009) Urban Metabolism of Paris and Its Region. *J Ind Ecol* 13:898–913. doi: 10.1111/j.1530-9290.2009.00169.x
- Barrier-Guillot A (2017) Des potagers sur les toits à partir de déchets urbains : étude des premières étapes d'évolution d'un technosol et des services écosystémiques rendus.
- Bates AJ, Sadler JP, Greswell RB, Mackay R (2015) Effects of recycled aggregate growth substrate on green roof vegetation development: A six year experiment. *Landsc Urban Plan* 135:22–31. doi: 10.1016/j.landurbplan.2014.11.010

- Baumgartl T (1998) Physical soil properties in specific fields of application especially in anthropogenic soils. *Soil Tillage Res* 47:51–59. doi: 10.1016/S0167-1987(98)00072-5
- Beattie DJ, Jarrett AR (2009) Green Roofs for Stormwater Runoff Control. *Environ Prot EPA*:81. doi: <https://nepis.epa.gov/Adobe/PDF/P1003704.PDF>
- Beck DA, Johnson GR, Spolek GA (2011) Amending greenroof soil with biochar to affect runoff water quantity and quality. *Environ Pollut* 159:2111–2118. doi: 10.1016/j.envpol.2011.01.022
- Beecham S, Razzaghmanesh M (2015) Water quality and quantity investigation of green roofs in a dry climate. *Water Res* 70:370–384. doi: 10.1016/j.watres.2014.12.015
- Bengtsson L (2005) Peak flows from thin sedum-moss roof. *Nord Hydrol* 36:269–280.
- Benito M, Masaguer A, Moliner A, De Antonio R (2006) Chemical and physical properties of pruning waste compost and their seasonal variability. *Bioresour Technol* 97:2071–6. doi: 10.1016/j.biortech.2005.09.011
- Benoît P, Brugère H, Casellas M, et al (2014) Chapitre 2 - Expertise MAFOR : Caractéristiques physico-chimiques et biologiques des Mafor.
- Berardi U, GhaffarianHoseini A, GhaffarianHoseini A (2014) State-of-the-art analysis of the environmental benefits of green roofs. *Appl Energy* 115:411–428. doi: 10.1016/j.apenergy.2013.10.047
- Bernal MP, Parades C, Sánchez-Monedero MA, Cegarra J (1998) Maturity Prepared and Stability Parameters of Composts With a , Wide Range of Organic Wastes. *Bioresour Technol* 63:91–99.
- Berndtsson JC, Bengtsson L, Jinno K (2008) First flush effect from vegetated roofs during simulated rain events. *Hydrol Res* 39:171. doi: 10.2166/nh.2008.044
- Berndtsson JC, Bengtsson L, Jinno K (2009) Runoff water quality from intensive and extensive vegetated roofs. *Ecol Eng* 35:369–380. doi: 10.1016/j.ecoleng.2008.09.020
- Berretta C, Poë S, Stovin V (2014) Moisture content behaviour in extensive green roofs during dry periods: The influence of vegetation and substrate characteristics. *J Hydrol* 516:37–49. doi: 10.1016/j.jhydrol.2014.04.001
- Billen G, Barles S, Garnier J, et al (2008) The food-print of Paris: long-term reconstruction of the nitrogen flows imported into the city from its rural hinterland. *Reg Environ Chang* 9:13–24. doi: 10.1007/s10113-008-0051-y
- Bini C, Gaballo S (2006) Pedogenic trends in anthrosols developed in sulfidic mine spoils: A case study in the Temperino mine archaeological area (Campiglia Marittima, Tuscany, Italy). *Quat Int* 156–157:70–78. doi: 10.1016/j.quaint.2006.05.033
- Blank L, Vasl A, Levy S, et al (2013) Directions in green roof research: A bibliometric study. *Build Environ* 66:23–28. doi: 10.1016/j.buildenv.2013.04.017
- Bliss DJ, Neufeld RD, Ries RJ (2009) Storm Water Runoff Mitigation Using a Green Roof. *Environ Eng Sci* 26:407–418. doi: 10.1089/ees.2007.0186
- Blouin M, Hodson ME, Delgado E a., et al (2013) A review of earthworm impact on soil function and ecosystem services. *Eur J Soil Sci* 64:161–182. doi: 10.1111/ejss.12025
- Boerema A, Rebelo AJ, Bodi MB, et al (2016) Are ecosystem services adequately quantified? *J Appl Ecol*. doi: 10.1111/1365-2664.12696
- Boudreau MA (2013) Diseases in intercropping systems. *Annu Rev Phytopathol* 51:499–519. doi: 10.1146/annurev-phyto-082712-102246
- Bouzouidja R, Rousseau G, Galzin V, et al (2016) Green roof ageing or Isolatic Technosol's pedogenesis? *J Soils Sediments*. doi: 10.1007/s11368-016-1513-3
- Burnett SE, Mattson NS, Williams KA (2016) Substrates and fertilizers for organic container production of herbs, vegetables, and herbaceous ornamental plants grown in greenhouses in the United States.

- Sci Hortic (Amsterdam) 208:111–119. doi: 10.1016/j.scienta.2016.01.001
- Camps Arbertain M, Madinabeitia Z, Anza Hortala M, et al (2008) Extractability and leachability of heavy metals in Technosols prepared from mixtures of unconsolidated wastes. *Waste Manag* 28:2653–2666. doi: 10.1016/j.wasman.2008.01.008
- Carlile W (2008) The use of composted materials in growing media. *Acta Hortic* 321–328.
- Carlile WR, Cattivello C, Zaccheo P (2015) Organic Growing Media: Constituents and Properties. *Vadose Zo J* 14:1–13. doi: 10.2136/vzj2014.09.0125
- Caron J, Price JS, Rochefort L (2015) Physical Properties of Organic Soil: Adapting Mineral Soil Concepts to Horticultural Growing Media and Histosol Characterization. *Vadose Zo J* 14:0. doi: 10.2136/vzj2014.10.0146
- Carson TB, Asce AM, Hakimdavar R, et al (2012) Viability of recycled and waste materials as green roof substrates. *GeoCongress* 3644–3653.
- Castiglia Feitosa R, Wilkinson S (2016) Modelling green roof stormwater response for different soil depths. *Landsc Urban Plan* 153:170–179. doi: 10.1016/j.landurbplan.2016.05.007
- Chang M, McBroom MW, Scott Beasley R (2004) Roofing as a source of nonpoint water pollution. *J Environ Manage* 73:307–315. doi: 10.1016/j.jenvman.2004.06.014
- Chenu C, Le Bissonnais Y, Arrouays D (2000) Organic Matter Influence on Clay Wettability and Soil Aggregate Stability. *Soil Sci Soc Am J* 64:1479. doi: 10.2136/sssaj2000.6441479x
- Clark S, Cavigelli M (2005) Suitability of Composts as Potting Media for Production of Organic Vegetable Transplants. *Compost Sci Util* 13:150–155. doi: 10.1080/1065657X.2005.10702232
- Cleary J, Roulet NT, Moore TR (2005) Greenhouse Gas Emissions from Canadian Peat Extraction, 1990–2000: A Life-cycle Analysis. *AMBIO A J Hum Environ* 34:456. doi: 10.1639/0044-7447(2005)034[0456:GGEFCP]2.0.CO;2
- Coleman K, Jenkinson DS (1996) RothC-26.3 - A Model for the turnover of carbon in soil. In: *Evaluation of Soil Organic Matter Models*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, pp 237–246
- Collaert J-P (2010) *L'art du jardin en lasagnes*, Edisud.
- Cook-Patton SC, Bauerle TL (2012) Potential benefits of plant diversity on vegetated roofs: A literature review. *J Environ Manage* 106:85–92. doi: 10.1016/j.jenvman.2012.04.003
- Coulon A, Damas O (2016) Créer des sols fertiles. Du déchet à la végétalisation urbaine. *Le Moniteur*.
- Czemiel Berndtsson J (2010) Green roof performance towards management of runoff water quantity and quality: A review. *Ecol Eng* 36:351–360. doi: 10.1016/j.ecoleng.2009.12.014
- Daniel A (2017) *Fonctionnement et durabilité des micro-fermes urbaines*.
- De-Ville S, Menon M, Jia X, et al (2017) The impact of green roof ageing on substrate characteristics and hydrological performance. *J Hydrol* 547: doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.02.006>
- De-ville S, Menon M, Stovin V (2015) Using X-ray microtomography to identify physical changes in green roof substrates as a result of ageing. In: *The Annual Postgraduate Research Student Conference - April 2015*. pp 8–13
- De Kimpe CR, Morel J-L (2000) Urban Soil Management : A Growing Concern. *Soil Sci*. doi: 0038-075C/00/1651-31-40
- Deeb M, Desjardins T, Podwojewski P, et al (2017) Interactive effects of compost, plants and earthworms on the aggregations of constructed Technosols. *Geoderma* 305:305–313. doi: 10.1016/j.geoderma.2017.06.014
- Deeb M, Grimaldi M, Lerch TZ, et al (2016a) Interactions between organisms and parent materials of a constructed Technosol shape its hydrostructural properties. 163–174. doi: 10.5194/soil-2-163-

2016

- Deeb M, Grimaldi M, Lerch TZ, et al (2016b) Influence of Organic Matter Content on Hydro-Structural Properties of Constructed Technosols. *Pedosphere* 26:486–498. doi: 10.1016/S1002-0160(15)60059-5
- Díaz-Zorita M, Perfect E, Grove J. (2002) Disruptive methods for assessing soil structure. *Soil Tillage Res* 64:3–22. doi: 10.1016/S0167-1987(01)00254-9
- Dorr E, Sanyé-Mengual E, Gabrielle B, et al (2017) Proper selection of substrates and crops enhances the sustainability of Paris rooftop garden. *Agron Sustain Dev* 37:51. doi: 10.1007/s13593-017-0459-1
- DRIAFF (2013) Laitues d’Île-de-France : une production satisfaisante en 2013 et des prix supérieurs à la moyenne quinquennale 2008-2012 . Agri’ Conjonct - Ile-de-France 6.
- Dudal R (2005) The sixth factor of soil formation. *Eurasian Soil Sci* 38:S60–S65.
- Dunnett N, Nagase A, Booth R, Grime P (2008) Influence of vegetation composition on runoff in two simulated green roof experiments. *Urban Ecosyst* 11:385–398. doi: 10.1007/s11252-008-0064-9
- Dusza Y (2017) Toitures végétalisées et services écosystémiques : favoriser la multifonctionnalité via les interactions sols-plantes et la diversité végétale.
- Dusza Y, Barot S, Kraepiel Y, et al (2017) Multifunctionality is affected by interactions between green roof plant species, substrate depth, and substrate type. *Ecol Evol* 7:2357–2369. doi: 10.1002/ece3.2691
- Egli M, Dahms D, Norton K (2014) Geoderma Soil formation rates on silicate parent material in alpine environments : Different approaches – different results ? *Geoderma* 213:320–333. doi: 10.1016/j.geoderma.2013.08.016
- Eksi M, Rowe DB, Fernández-Cañero R, Cregg BM (2015) Effect of substrate compost percentage on green roof vegetable production. *Urban For Urban Green* 14:315–322. doi: 10.1016/j.ufug.2015.03.006
- Elstein J, Welbaum GE, Stewart D a., Borys DR (2008) Evaluating growing media for a shallow-rooted vegetable crop production system on a green roof. *Acta Hort* 782:177–183.
- Emilsson T, Czemieli Berndtsson J, Mattsson JE, Rolf K (2007) Effect of using conventional and controlled release fertiliser on nutrient runoff from various vegetated roof systems. *Ecol Eng* 29:260–271. doi: 10.1016/j.ecoleng.2006.01.001
- EU 2011 (2011) Commission Regulation (EU) No 420/2011 of 29 April 2011 amending Regulation (EC) No 1831/2003 setting maximum levels for certain contaminants in foodstuffs.
- Farrell M, Jones DL (2010) Food waste composting: its use as a peat replacement. *Waste Manag* 30:1495–501. doi: 10.1016/j.wasman.2010.01.032
- FLL (2008) Guidelines for the Planning, Construction and Maintenance of Green Roofing - Green Roofing Guideline.
- Francaviglia R, Renzi G, Ledda L, Benedetti A (2017) Organic carbon pools and soil biological fertility are affected by land use intensity in Mediterranean ecosystems of Sardinia, Italy. *Sci Total Environ* 599–600:789–796. doi: 10.1016/j.scitotenv.2017.05.021
- Friedrich C (2008) Selecting the Proper Components for a Green Roof Growing Media. 2nd Natl Low Impact Dev Conf 240–251. doi: 10.1061/41007(331)22
- Frouz J, Jílková V, Cajthaml T, et al (2013) Soil biota in post-mining sites along a climatic gradient in the USA: Simple communities in shortgrass prairie recover faster than complex communities in tallgrass prairie and forest. *Soil Biol Biochem* 67:212–225. doi: 10.1016/j.soilbio.2013.08.025
- Gelman V (2014) Rooftop vegetables and urban contamination: Trace elements and polycyclic aromatic hydrocarbons in crops from Helsinki rooftops.

- Getter KL, Rowe DB (2009) Substrate depth influences sedum plant community on a green roof. *HortScience* 44:401–407.
- Getter KL, Rowe DB, Andresen JA (2007) Quantifying the effect of slope on extensive green roof stormwater retention. *Ecol Eng* 31:225–231. doi: 10.1016/j.ecoleng.2007.06.004
- Getter KL, Rowe DB, Robertson GP, et al (2009) Carbon Sequestration Potential of Extensive Green Roofs. *Environ Sci Technol* 43:7564–7570. doi: 10.1021/es901539x
- Girardet H (2008) Cities people planet: urban development and climate change.
- Gobat J-M, Aragno M, Matthey W (2011) *Le sol vivant*. Presses polytechniques
- Goldstein B, Hauschild M, Fernández J, Birkved M (2016) Urban versus conventional agriculture, taxonomy of resource profiles: a review. *Agron Sustain Dev* 36:9. doi: 10.1007/s13593-015-0348-4
- Gómez-Baggethun E, Barton DN (2013) Classifying and valuing ecosystem services for urban planning. *Ecol Econ* 86:235–245. doi: 10.1016/j.ecolecon.2012.08.019
- Graceson A, Hare M, Hall N, Monaghan J (2014a) Use of inorganic substrates and composted green waste in growing media for green roofs. *Biosyst Eng* 124:1–7. doi: 10.1016/j.biosystemseng.2014.05.007
- Graceson A, Hare M, Monaghan J, Hall N (2013) The water retention capabilities of growing media for green roofs. *Ecol Eng* 61:328–334. doi: 10.1016/j.ecoleng.2013.09.030
- Graceson A, Monaghan J, Hall N, Hare M (2014b) Plant growth responses to different growing media for green roofs. *Ecol Eng* 69:196–200. doi: 10.1016/j.ecoleng.2014.03.067
- Grard BJ-P, Bel N, Marchal N, et al (2015) Recycling urban waste as possible use for rooftop vegetable garden. *Futur Food J Food, Agric Soc* 3:21–34.
- Gregoire BG, Clausen JC (2011) Effect of a modular extensive green roof on stormwater runoff and water quality. *Ecol Eng* 37:963–969. doi: 10.1016/j.ecoleng.2011.02.004
- Grewal SS, Grewal PS (2012) Can cities become self-reliant in food? *Cities* 29:1–11. doi: 10.1016/j.cities.2011.06.003
- Grosbellet C (2008) Évolution et effets sur la structuration du sol de la matière organique apportée en grande quantité.
- Grosbellet C, Vidal-Beaudet L, Caubel V, Charpentier S (2011) Improvement of soil structure formation by degradation of coarse organic matter. *Geoderma* 162:27–38. doi: 10.1016/j.geoderma.2011.01.003
- Grünewald G, Kaiser K, Jahn R (2007) Alteration of secondary minerals along a time series in young alkaline soils derived from carbonatic wastes of soda production. *Catena* 71:487–496. doi: 10.1016/j.catena.2007.03.022
- Gustafsson C, Gschwend PM (1997) Aquatic colloids : Concepts , definitions , and current challenges.
- Haase D, Larondelle N, Andersson E, et al (2014) A quantitative review of urban ecosystem service assessments: Concepts, models, and implementation. *Ambio* 43:413–433. doi: 10.1007/s13280-014-0504-0
- Haines-young R, Potschin M (2010) Chapter Six: The links between biodiversity, ecosystem services and human well-being. *Ecosyst Ecol a new Synth* 1–31.
- Harada Y, Whitlow TH, Nina L (2017) Biogeochemistry of Rooftop Farm Soils. 275–294.
- Hartz TK, Costa FJ, Schrader WL (1996) Suitability of composted green waste for horticultural uses. *HortScience* 31:961–964.
- Hernández-Apaolaza L, Gascó AM, Gascó JM, Guerrero F (2005) Reuse of waste materials as growing media for ornamental plants. *Bioresour Technol* 96:125–31. doi: 10.1016/j.biortech.2004.02.028

- Hidalgo A (2014) 'Anne Hidalgo veut de la verdure et des potagers sur les toits de Paris'. In: MetroNews.fr. <http://www.anne-hidalgo.net/actualites/anne-hidalgo-veut-de-la-verdure-et-des-potagers-sur-les-toits-de-paris-metronewsfr>. Accessed 6 Jan 2015
- Huot H (2013) Formation, fonctionnement et évolution d'un Technosol sur des boues sidérurgiques.
- Huot H, Simonnot M-O, Marion P, et al (2011) Characteristics and potential pedogenetic processes of a Technosol developing on iron industry deposits. *J Soils Sediments* 13:555–568. doi: 10.1007/s11368-012-0513-1
- Huot H, Simonnot M-O, Morel JL (2015) Pedogenetic Trends in Soils Formed in Technogenic Parent Materials. *Soil Sci* 180:1. doi: 10.1097/SS.0000000000000135
- Ingelmo F, Canet R, Ibañez M a., et al (1998) Use of MSW compost, dried sewage sludge and other wastes as partial substitutes for peat and soil. *Bioresour Technol* 63:123–129. doi: 10.1016/S0960-8524(97)00105-3
- ITAB (2017) Guide produire des légumes bio - Tome 2 : Spécificités par légume.
- IUSS Working Group WRB (2014) World reference base for soil resources 2014. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps.
- Jangorzo NS (2013) Quantification du processus d'agrégation dans les Technosols.
- Jangorzo NS, Watteau F, Schwartz C (2013) Evolution of the pore structure of constructed Technosols during early pedogenesis quantified by image analysis. *Geoderma* 207–208:180–192. doi: 10.1016/j.geoderma.2013.05.016
- Jangorzo NS, Watteau F, Schwartz C (2014) Nondestructive monitoring of the effect of biological activity on the pedogenesis of a constructed Technosol. *J Soils Sediments*. doi: 10.1007/s11368-014-1008-z
- John MK (1973) Cadmium uptake by eight food crops as influenced by various soil levels of cadmium. *Environ Pollut* 4:7–15. doi: 10.1016/0013-9327(73)90026-8
- Joimel S, Cortet J, Jolivet CC, et al (2016) Physico-chemical characteristics of topsoil for contrasted forest, agricultural, urban and industrial land uses in France. *Sci Total Environ* 545–546:40–47. doi: 10.1016/j.scitotenv.2015.12.035
- Joimel S, Schwartz C, Hedde M, et al (2017) Urban and industrial land uses have a higher soil biological quality than expected from physicochemical quality. 585:614–621. doi: 10.1016/j.scitotenv.2017.01.086
- Juvin A (2014) Exploration d'associations et successions de cultures dans le cas particulier de cultures en bac sur les toits urbains à partir de substrats 100% organiques: Constitution, production et conduite de ces associations.
- Kandziora M, Burkhard B, Müller F (2013) Interactions of ecosystem properties, ecosystem integrity and ecosystem service indicators: A theoretical matrix exercise. *Ecol Indic* 28:54–78. doi: 10.1016/j.ecolind.2012.09.006
- Kang GS, Beri V, Sidhu BS, Rupela OP (2005) A new index to assess soil quality and sustainability of wheat-based cropping systems. *Biol Fertil Soils* 41:389–398. doi: 10.1007/s00374-005-0857-4
- Karlen DL, Mausbach MJ, Doran JW, et al (1997) Soil quality: A concept, definition, and framework for evaluation. *Soil Sci Am J* 4–10. doi: 10.2136/sssaj1997.03615995006100010001x
- Kazemi F, Mohorko R (2017) Review on the roles and effects of growing media on plant performance in green roofs in world climates. *Urban For Urban Green*. doi: 10.1016/j.ufug.2017.02.006
- Kern J, Tammeorg P, Shanskiy M, et al (2017) Synergistic use of peat and charred material in growing media – an option to reduce the pressure on peatlands? *J Environ Eng Landsc Manag* 25:160–174. doi: 10.3846/16486897.2017.1284665
- Koegler M, Grard BJ-P, Christine A (2017) Climate Innovation Potentials of Urban Agriculture (

CIPUrA) Geographic Pathfinder.

- Kong AYY, Rosenzweig C, Arky J (2015) Nitrogen dynamics associated with organic and inorganic inputs to substrate commonly used on rooftop farms. *HortScience* 50:806–813.
- Kortright R (2001) Evaluating the potential of green roof agriculture.
- Krawczyk A, Domagała-Świątkiewicz I, Lis-Krzyżsin A (2017) The effect of substrate on growth and nutritional status of native xerothermic species grown in extensive green roof technology. *Ecol Eng* 108:194–202. doi: 10.1016/j.ecoleng.2017.08.022
- Lagneau A, Barra M, Lecuir G (2015) Agriculture urbaine. Vers une réconciliation ville-nature., NaturePari.
- Lashermes G, Houot S, Nicolardot B, et al (2007) Apport de matières organiques exogènes en agriculture : indicateur de potentialité de stockage de carbone dans les sols et définition de classes de disponibilité d'azote. *Echo-MO* 3–8.
- Lata J-C, Dusza Y, Abbadie L, et al (2017) Role of substrate properties in the provision of multifunctional green roof ecosystem services Short. *Appl Soil Ecol* 0–1. doi: 10.1016/j.apsoil.2017.09.012
- Leguëdois S, Séré G, Auclerc A, et al (2016) Modelling pedogenesis of Technosols. *Geoderma* 262:199–212.
- Lehmann A, Stahr K (2007) World Congress of Soil Science (WCSS) (Subject Editor: Stefan Norra) Nature and Significance of Anthropogenic Urban Soils. *J Soils Sediments* 7:247–260. doi: 10.1065/jss2007.06.235
- Lehmann S (2011) Optimizing urban material flows and waste streams in urban development through principles of zero waste and sustainable consumption. *Sustainability* 3:155–183. doi: 10.3390/su3010155
- Li Y, Babcock RW (2014) Green roofs against pollution and climate change. A review. *Agron Sustain Dev* 34:695–705. doi: 10.1007/s13593-014-0230-9
- Lin BB, Philpott SM, Jha S (2015) The future of urban agriculture and biodiversity-ecosystem services: Challenges and next steps. *Basic Appl Ecol*. doi: 10.1016/j.baae.2015.01.005
- Liu T, Yang M, Han Z, Ow DW (2016) Rooftop production of leafy vegetables can be profitable and less contaminated than farm-grown vegetables. *Agron Sustain Dev* 36:41. doi: 10.1007/s13593-016-0378-6
- Lorenz K (2015) Organic Urban Agriculture. 0:1–9. doi: 10.1097/SS.0000000000000129
- Lucisine P, Lecerf A, Danger M, et al (2015) Litter chemistry prevails over litter consumers in mediating effects of past steel industry activities on leaf litter decomposition. *Sci Total Environ* 537:213–224. doi: 10.1016/j.scitotenv.2015.07.112
- Luederitz C, Brink E, Gralla F, et al (2015) A review of urban ecosystem services: six key challenges for future research. *Ecosyst Serv* 14:98–112. doi: 10.1016/j.ecoser.2015.05.001
- Lundholm JT (2015) Green roof plant species diversity improves ecosystem multifunctionality. *J Appl Ecol* 52:726–734. doi: 10.1111/1365-2664.12425
- Luo H, Liu X, Anderson BC, et al (2015) Carbon sequestration potential of green roofs using mixed-sewage-sludge substrate in Chengdu World Modern Garden City. *Ecol Indic* 49:247–259. doi: 10.1016/j.ecolind.2014.10.016
- Macía P, Fernández-Costas C, Rodríguez E, et al (2014) Technosols as a novel valorization strategy for an ecological management of dredged marine sediments. *Ecol Eng* 67:182–189. doi: 10.1016/j.ecoleng.2014.03.020
- MacRae R, Gallant E, Patel S (2010) Could Toronto provide 10% of its fresh vegetable requirements from within its own boundaries? Matching consumption requirements with growing spaces.

- Madre F, Vergnes A, Machon N, Clergeau P (2013) A comparison of 3 types of green roof as habitats for arthropods. *Ecol Eng* 57:109–117. doi: 10.1016/j.ecoleng.2013.04.029
- Majsztrik JC, Fernandez RT, Fisher PR, et al (2017) Water Use and Treatment in Container-Grown Specialty Crop Production: A Review. *Water Air Soil Pollut*. doi: 10.1007/s11270-017-3272-1
- Martín F, Díez M, García I, et al (2007) Weathering of primary minerals and mobility of major elements in soils affected by an accidental spill of pyrite tailing. *Sci Total Environ* 378:49–52. doi: 10.1016/j.scitotenv.2007.01.031
- Mason Y, Ammann AA, Ulrich A, Sigg L (1999) Behavior of Heavy Metals , Nutrients , and Major Components during Roof Runoff Infiltration. *Environ Sci Technol* 33:1588–1597.
- Mc Phearson et al (2011) Chapter 9 : Toward a sustainable New York city : greening through urban forest restoration. Island Press/Center for Resource Economics, Washington, DC
- McBride MB, Shayler HA, Spliethoff HM, et al (2014) Concentrations of lead, cadmium and barium in urban garden-grown vegetables: The impact of soil variables. *Environ Pollut* 194:254–261. doi: 10.1016/j.envpol.2014.07.036
- Mcclintock N, Cooper J (2009) Cultivating the Commons ? An Assessment of the Potential for Urban Agriculture on Public Land in Oakland , California. *Rev Lit Arts Am* 1:1–61.
- Meera V, Mansoor Ahammed M (2006) Water quality of rooftop rainwater harvesting systems: A review. *J Water Supply Res Technol - AQUA* 55:257–268. doi: 10.2166/aqua.2006.008
- Mentens J, Raes D, Hermy M (2006) Green roofs as a tool for solving the rainwater runoff problem in the urbanized 21st century? *Landsc Urban Plan* 77:217–226. doi: 10.1016/j.landurbplan.2005.02.010
- Michel J (2010) The physical properties of peat: a key factor for modern growing media. *Mires Peat* 6:1–6.
- Michel JC, Kerloch E (2017) Evolution of hydraulic properties and wettability of organic growing media during cultivation according to irrigation strategies. *Sci Hortic (Amsterdam)* 217:28–35. doi: 10.1016/j.scienta.2017.01.023
- Molineux CJ, Fentiman CH, Gange AC (2009) Characterising alternative recycled waste materials for use as green roof growing media in the U.K. *Ecol Eng* 35:1507–1513. doi: 10.1016/j.ecoleng.2009.06.010
- Molineux CJ, Gange AC, Connop SP, Newport DJ (2015) Using recycled aggregates in green roof substrates for plant diversity. *Ecol Eng* 82:596–604. doi: 10.1016/j.ecoleng.2015.05.036
- Monserie M-F, Watteau F, Villemin G, et al (2009) Technosol genesis: identification of organo-mineral associations in a young Technosol derived from coking plant waste materials. *J Soils Sediments* 9:537–546. doi: 10.1007/s11368-009-0084-y
- Morel JL, Chenu C, Lorenz K (2014) Ecosystem services provided by soils of urban, industrial, traffic, mining, and military areas (SUITMAs). *J Soils Sediments*. doi: 10.1007/s11368-014-0926-0
- Morel P, Poncet L, Rivière L (2000) Les supports de culture horticoles: les matériaux complémentaires et alternatifs à la tourbe.
- Mougeot LJA (2000) Urban agriculture : definition, presence, potentials and risks. *Grow cities, Grow food Urban Agric policy agenda* 1–42.
- Murray H, Pinchin T a., Macfie SM (2011) Compost application affects metal uptake in plants grown in urban garden soils and potential human health risk. *J Soils Sediments* 11:815–829. doi: 10.1007/s11368-011-0359-y
- Murray H, Thompson K, Macfie SM (2009) Site- and species-specific patterns of metal bioavailability in edible plants. *Botany* 87:702–711. doi: 10.1139/B09-019
- Myers RJ., Palm CA, Cuevas E, et al (1994) Chapitre 4: The synchronisation of nutrient mineralisation

- and plant nutrient demand. In: *The biological Management of Tropical Soil Fertility*. p 41
- Nagase A, Dunnett N (2011) The relationship between percentage of organic matter in substrate and plant growth in extensive green roofs. *Landsc Urban Plan* 103:230–236. doi: 10.1016/j.landurbplan.2011.07.012
- Nasr J, Kuhns J, Baker L, Nasr J (2014) L'expansion de l'agriculture urbaine à toronto : une collaboration entre la ville et la communauté des habitants. *Rev. POUR* n°224 397/404.
- Néel C, Bril H, Courtin-Nomade A, Dutreuil JP (2003) Factors affecting natural development of soil on 35-year-old sulphide-rich mine tailings. *Geoderma* 111:1–20. doi: 10.1016/S0016-7061(02)00237-9
- Nehls T, Rokia S, Mekiffer B, et al (2012) Contribution of bricks to urban soil properties. *J Soils Sediments* 13:575–584. doi: 10.1007/s11368-012-0559-0
- Nektarios PA, Amountzias I, Kokkinou I, Ntoulas N (2011) Green roof substrate type and depth affect the growth of the native species *Dianthus fruticosus* under reduced irrigation regimens. *HortScience* 46:1208–1216.
- Nigussie A, Bruun S, de Neergaard A, Kuyper TW (2017) Earthworms change the quantity and composition of dissolved organic carbon and reduce greenhouse gas emissions during composting. *Waste Manag* 62:43–51. doi: 10.1016/j.wasman.2017.02.009
- Oberndorfer E, Lundholm J, Bass B, et al (2007) Green Roofs as Urban Ecosystems: Ecological Structures, Functions, and Services. *Bioscience* 57:823. doi: 10.1641/B571005
- Obriot F (2016) Epandage de produits résiduaux organiques et fonctionnement biologique des sols, de la quantification des impacts sur les cycles carbone et azote à l'évaluation multicritère de la pratique à l'échelle de la parcelle. *AgroParisTech*
- Olle M, Ngouajio M, Siomos A (2012) Vegetable quality and productivity as influenced by growing medium: a review. *Žemdirbystė (Agriculture)* 99:399–408.
- Olowoyo JO, Lion GN (2016) Urban farming as a possible source of trace metals in human diets. *S Afr J Sci* 112:1–6. doi: 10.17159/sajs.2016/20140444
- Olszewski MW, Young C a (2011) Physical and Chemical Properties of Green Roof Media and Their Effect on Plant Establishment 1. 29:81–86.
- Ondono S, Bastida F, Moreno JL (2014) Microbiological and biochemical properties of artificial substrates: A preliminary study of its application as Technosols or as a basis in Green Roof Systems. *Ecol Eng* 70:189–199. doi: 10.1016/j.ecoleng.2014.05.003
- Ondono S, Martinez-Sanchez JJ, Moreno JL (2016) The composition and depth of green roof substrates affect the growth of *Silene vulgaris* and *Lagurus ovatus* species and the C and N sequestration under two irrigation conditions. *J Environ Manage* 166:330–340. doi: 10.1016/j.jenvman.2015.08.045
- Orsini F, Dubbeling M, Gianquinto G (2015) Multifunctional rooftop horticulture : a promising strategy for intensifying horticulture production in cities. *Chron Horticult* 55:12–17.
- Orsini F, Gasperi D, Marchetti L, et al (2014) Exploring the production capacity of rooftop gardens (RTGs) in urban agriculture: the potential impact on food and nutrition security, biodiversity and other ecosystem services in the city of Bologna. *Food Secur* 781–792. doi: 10.1007/s12571-014-0389-6
- Orsini F, Kahane R, Nono-Womdim R, Gianquinto G (2013) Urban agriculture in the developing world: a review. *Agron Sustain Dev* 33:695–720. doi: 10.1007/s13593-013-0143-z
- Ostos JC, López-Garrido R, Murillo JM, López R (2008) Substitution of peat for municipal solid waste- and sewage sludge-based composts in nursery growing media: effects on growth and nutrition of the native shrub *Pistacia lentiscus* L. *Bioresour Technol* 99:1793–800. doi: 10.1016/j.biortech.2007.03.033

- Papafotiou M, Pergialioti N, Tassoula L, et al (2013) Growth of native aromatic xerophytes in an extensive Mediterranean green roof as affected by substrate type and depth and irrigation frequency. *HortScience* 48:1327–1333.
- Pennisi G, Orsini F, Mancarella S, et al (2016) Soilless system on peat reduce trace metals in urban grown food: unexpected evidence for a soil origin of plant contamination. *Agron Sustain Dev* in press:1–11. doi: Pennisi G., Orsini, F., Mancarella S., Gasperi, G., Sanoubar, R., Vittori Antisari, L., Vianello, G., Gianquinto G. Soilless system on peat reduce trace metals in urban grown food: unexpected evidence for a soil origin of plant contamination. *Agronomy for sustainable development*, in corso di stampa, DOI: 10.1007/s13593-016-0391-9
- Pey B, Cortet J, Capowiez Y, et al (2014) Technosol composition affects *Lumbricus terrestris* surface cast composition and production. *Ecol Eng* 67:238–247. doi: 10.1016/j.ecoleng.2014.03.039
- Pey B, Cortet J, Watteau F, et al (2013) Structure of earthworm burrows related to organic matter of a constructed Technosol. *Geoderma* 202–203:103–111. doi: 10.1016/j.geoderma.2013.03.010
- Pourias J (2013) Growing food for self-consumption inside cities: lessons learnt from urban allotment gardens in Paris and Montreal. 1681–1692.
- Raviv M (2013) SWOT analysis of the use of composts as growing media components. *Acta Hortic* 1013:191–202.
- Raviv M (2005) Production of high-quality composts for horticultural purposes: A mini-review. *Horttechnology* 15:52–57.
- Raviv M, Zaidman B-Z, Kapulnik Y (1998) The Use of Compost as a Peat Substitute for Organic Vegetable Transplants Production. *Compost Sci Util* 6:46–52. doi: 10.1080/1065657X.1998.10701908
- Rincón L, Coma J, Pérez G, et al (2014) Environmental performance of recycled rubber as drainage layer in extensive green roofs. A comparative Life Cycle Assessment. *Build Environ* 74:22–30. doi: 10.1016/j.buildenv.2014.01.001
- 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.
- Rokia S, Séré G, Schwartz C, et al (2014) Modelling agronomic properties of Technosols constructed with urban wastes. *Waste Manag* 34:2155–2162. doi: 10.1016/j.wasman.2013.12.016
- Rossiter DG (2007) Classification of Urban and Industrial Soils in the World Reference Base for Soil Resources. *J Soils Sediments* 7:96–100. doi: <http://dx.doi.org/10.1065/jss2007.02.208>
- Rowe DB (2011) Green roofs as a means of pollution abatement. *Environ Pollut* 159:2100–2110. doi: 10.1016/j.envpol.2010.10.029
- Rowe DB, Monterusso MA, Rugh CL (2006) Assessment of heat-expanded slate and fertility requirements in green roof substrates. *Horttechnology* 16:471–477.
- Russo A, Escobedo FJ, Cirella GT, Zerbe S (2017) Edible green infrastructure: An approach and review of provisioning ecosystem services and disservices in urban environments. *Agric Ecosyst Environ* 242:53–66. doi: 10.1016/j.agee.2017.03.026
- Samangooei, Mina ; Sassi, Paola ; Lack A (2016) Soil-less systems vs . soil-based systems for cultivating edible plants on buildings in relation to the contribution towards sustainable cities. *Futur food* 4:24–39.
- Samouëlian A, Cornu S (2008) Modelling the formation and evolution of soils, towards an initial synthesis. *Geoderma* 145:401–409. doi: 10.1016/j.geoderma.2008.01.016
- Sanyé-Mengual E (2015) Sustainability assessment of urban rooftop farming using an interdisciplinary approach.
- Sanyé-Mengual E, Orsini F, Oliver-Solà J, et al (2015) Techniques and crops for efficient rooftop

- gardens in Bologna, Italy. *Agron Sustain Dev*. doi: 10.1007/s13593-015-0331-0
- Sauer D (2010) Approaches to quantify progressive soil development with time in Mediterranean climate — I. Use of field criteria. 822–842. doi: 10.1002/jpln.201000136
- Säumel I, Kotsyuk I, Hölscher M, et al (2012) How healthy is urban horticulture in high traffic areas? Trace metal concentrations in vegetable crops from plantings within inner city neighbourhoods in Berlin, Germany. *Environ Pollut* 165:124–32. doi: 10.1016/j.envpol.2012.02.019
- Schrader S, Böning M (2006) Soil formation on green roofs and its contribution to urban biodiversity with emphasis on Collembolans. *Pedobiologia (Jena)* 50:347–356. doi: 10.1016/j.pedobi.2006.06.003
- Schroll E, Lambrinos J, Righetti T, Sandrock D (2011) The role of vegetation in regulating stormwater runoff from green roofs in a winter rainfall climate. *Ecol Eng* 37:595–600. doi: 10.1016/j.ecoleng.2010.12.020
- Schwager-Guilloux J (2014) Les toitures végétalisées puits et sources d'éléments en traces métalliques. Thesis 15.
- Schwager J, Schaal L, Simonnot M-O, et al (2015) Emission of trace elements and retention of Cu and Zn by mineral and organic materials used in green roofs. *J Soils Sediments* 15:1789–1801. doi: 10.1007/s11368-014-0962-9
- Seidl M, Gromaire M-C, Saad M, De Gouvello B (2013) Effect of substrate depth and rain-event history on the pollutant abatement of green roofs. *Environ Pollut* 183:195–203. doi: 10.1016/j.envpol.2013.05.026
- Séré G (2007) Fonctionnement et évolution pédogénétique de Technosols issus d'un procédé de construction de sol.
- Séré G, Schwartz C, Ouvrard S, et al (2010) Early pedogenic evolution of constructed Technosols. *J Soils Sediments* 10:1246–1254. doi: 10.1007/s11368-010-0206-6
- Six J, Elliott ET, Paustian K, Doran JW (1998) Aggregation and Soil Organic Matter Accumulation in Cultivated and Native Grassland Soils. *Soil Sci Soc Am J* 62:1367. doi: 10.2136/sssaj1998.03615995006200050032x
- Smit J, Nasr J (1992) Urban agriculture for sustainable cities: using wastes and idle land and water bodies as resources. *Environ Urban* 4:141–152. doi: 10.1177/095624789200400214
- Smit J, Nasr J, Ratta A (2001) Urban agriculture : Food, Jobs and sustainable Cities. Urban Agric Network, Inc 16.
- Smit J, Ratta A, Nasr J (1996) Urban agriculture: food, jobs and sustainable cities. United Nations Development Programme (UNDP)
- Smith OB, Moustier P, Mougeot LJA (2004) Développement durable de l'agriculture urbaine en Afrique francophone Enjeux , concepts et méthodes Développement durable de l'agriculture urbaine en Afrique francophone Enjeux , concepts et méthodes Sommaire.
- Speak AF, Rothwell JJ, Lindley SJ, Smith CL (2013) Rainwater runoff retention on an aged intensive green roof. *Sci Total Environ* 461–462:28–38. doi: 10.1016/j.scitotenv.2013.04.085
- Specht K, Sanyé-Mengual E (2015) Urban rooftop farming in Berlin and Barcelona: What risks and uncertainties do key stakeholders perceive? *Proc 7th Int AESOP Sustain Food Plan Conf* 307–313.
- Specht K, Siebert R, Hartmann I, et al (2013) Urban agriculture of the future: an overview of sustainability aspects of food production in and on buildings. *Agric Human Values* 31:33–51. doi: 10.1007/s10460-013-9448-4
- Specht K, Siebert R, Thomaier S, et al (2015) Zero-Acreage Farming in the City of Berlin: An Aggregated Stakeholder Perspective on Potential Benefits and Challenges. *Sustainability* 7:4511–4523.

- Stovin V, Poe S, De-Ville S, Berretta C (2015) The influence of substrate and vegetation configuration on green roof hydrological performance. *Ecol Eng* 85:159–172. doi: 10.1016/j.ecoleng.2015.09.076
- Tabares-Velasco PC, Srebric J (2009) The role of plants in the reduction of heat flux through green roofs: Laboratory experiments. *ASHRAE Trans* 115 PART 2:793–802.
- Thomaier S, Specht K, Henckel D, et al (2014) Farming in and on urban buildings: Present practice and specific novelties of Zero-Acreage Farming (ZFarming). *Renew Agric Food Syst* 1–12. doi: 10.1017/S1742170514000143
- Tifafi M, Bouzoudja R, Leguédois S, et al (2017) How lysimetric monitoring of Technosols can contribute to understand the temporal dynamics of the soil porosity. *Geoderma* 296:60–68. doi: 10.1016/j.geoderma.2017.02.027
- Tong Z, Whitlow TH, Landers A, Flanner B (2016) A case study of air quality above an urban roof top vegetable farm. *Environ Pollut* 208:256–260. doi: 10.1016/j.envpol.2015.07.006
- Tremel-Schaub A, Feix I (2005) Contamination des sols Transferts des sols vers les plantes. EDP Sciences, ADEME
- Van der Gaag DJ, Van Noort FR, Stapel-Cuijpers LHM, et al (2007a) The use of green waste compost in peat-based potting mixtures: Fertilization and suppressiveness against soilborne diseases. *Sci Hortic (Amsterdam)* 114:289–297. doi: 10.1016/j.scienta.2007.06.018
- Van der Gaag DJ, Van Noort FR, Stapel-Cuijpers LHM, et al (2007b) The use of green waste compost in peat-based potting mixtures: Fertilization and suppressiveness against soilborne diseases. *Sci Hortic (Amsterdam)* 114:289–297. doi: 10.1016/j.scienta.2007.06.018
- van Groenigen JW, Lubbers IM, Vos HMJ, et al (2014) Earthworms increase plant production: a meta-analysis. *Sci Rep* 4:6365. doi: 10.1038/srep06365
- Van Wijnen HJ, Rutgers M, Schouten AJ, et al (2012) How to calculate the spatial distribution of ecosystem services - Natural attenuation as example from The Netherlands. *Sci Total Environ* 415:49–55. doi: 10.1016/j.scitotenv.2011.05.058
- Veenhuizen R Van (2006) Cities farming for the future: Urban agriculture for green and productive cities.
- Vidal-Beaudet L, Grosbellet C, Forget-Caubel V, Charpentier S (2012) Modelling long-term carbon dynamics in soils reconstituted with large quantities of organic matter. *Eur J Soil Sci* 63:787–797. doi: 10.1111/j.1365-2389.2012.01494.x
- Vidal-Beaudet L, Rokia S, Nehls T, Schwartz C (2016) Aggregation and availability of phosphorus in a Technosol constructed from urban wastes. *J Soils Sediments*. doi: 10.1007/s11368-016-1469-3
- Vijayaraghavan K (2016) Green roofs: A critical review on the role of components, benefits, limitations and trends. *Renew Sustain Energy Rev* 57:740–752. doi: 10.1016/j.rser.2015.12.119
- Vila A, Pérez G, Solé C, et al (2012) Use of rubber crumbs as drainage layer in experimental green roofs. *Build Environ* 48:101–106. doi: 10.1016/j.buildenv.2011.08.010
- Vittori Antisari L, Orsini F, Marchetti L, et al (2015) Heavy metal accumulation in vegetables grown in urban gardens. doi: 10.1007/s13593-015-0308-z
- Wang H, Qin J, Hu Y (2017) Are green roofs a source or sink of runoff pollutants ? *Ecol Eng* 107:65–70. doi: 10.1016/j.ecoleng.2017.06.035
- Wangersky PJ (1993) Background papers Dissolved organic carbon methods : a critical review. *Mar Chem* 41:61–74. doi: 10.1016/0304-4203(93)90106-X
- Warming M, Hansen MG, Holm PE, et al (2015) Does intake of trace elements through urban gardening in Copenhagen pose a risk to human health? *Environ Pollut* 202:17–23. doi: 10.1016/j.envpol.2015.03.011

- Whittinghill LJ, Hsueh D, Culligan P, Plunz R (2016a) Stormwater performance of a full scale rooftop farm: Runoff water quality. *Ecol Eng* 91:195–206. doi: 10.1016/j.ecoleng.2016.01.047
- Whittinghill LJ, Rowe DB, Andresen J a., Cregg BM (2015) Comparison of stormwater runoff from sedum, native prairie, and vegetable producing green roofs. *Urban Ecosyst* 13–29. doi: 10.1007/s11252-014-0386-8
- Whittinghill LJ, Rowe DB, Cregg BM (2013) Evaluation of Vegetable Production on Extensive Green Roofs. *Agroecol Sustain Food Syst* 37:465–484. doi: 10.1080/21683565.2012.756847
- Whittinghill LJ, Rowe DB, Ngouajio M, Cregg BM (2016b) Evaluation of nutrient management and mulching strategies for vegetable production on an extensive green roof. *Agroecol Sustain Food Syst* 40:297–318. doi: 10.1080/21683565.2015.1129011
- Whittinghill LJ, Rowe DB, Schutzki R, Cregg BM (2014) Quantifying carbon sequestration of various green roof and ornamental landscape systems. *Landsc Urban Plan* 123:41–48. doi: 10.1016/j.landurbplan.2013.11.015
- Wilhelm JA, Smith RG (2017) Ecosystem services and land sparing potential of urban and peri-urban agriculture: A review. *Renew Agric Food Syst* 1–14. doi: 10.1017/S1742170517000205
- Wong CSC, Li X, Thornton I (2006) Urban environmental geochemistry of trace metals. *Environ Pollut* 142:1–16. doi: 10.1016/j.envpol.2005.09.004
- Yang J, Yu Q, Gong P (2008) Quantifying air pollution removal by green roofs in Chicago. *Atmos Environ* 42:7266–7273. doi: 10.1016/j.atmosenv.2008.07.003
- Yilmaz D, Cannavo P, Séré G, et al (2016) Physical properties of structural soils containing waste materials to achieve urban greening. *J Soils Sediments* 1–14. doi: 10.1007/s11368-016-1524-0
- Young T, Cameron DD, Sorrill J, et al (2014) Importance of different components of green roof substrate on plant growth and physiological performance. *Urban For Urban Green* 13:507–516. doi: 10.1016/j.ufug.2014.04.007
- Zhang Q, Miao L, Wang X, et al (2015) The capacity of greening roof to reduce stormwater runoff and pollution. *Landsc Urban Plan* 144:142–150. doi: 10.1016/j.landurbplan.2015.08.017
- Zmora-Nahum S, Markovitch O, Tarchitzky J, Chen Y (2005) Dissolved organic carbon (DOC) as a parameter of compost maturity. *Soil Biol Biochem* 37:2109–2116. doi: 10.1016/j.soilbio.2005.03.013

Annexes

Annexe n° 1 : Description des matériaux utilisés et du matériel d'étude

Des analyses chimiques des matériaux parentaux sont détaillées ci-dessous (**Tableau 32**).

Quelques précisions sur la composition de certains produits, donnés par les fournisseurs :

- **Compost de biodéchets** : produit par l'entreprise Véolia, il est collecté en porte à porte chez les habitants de l'agglomération Lorientaise avec un apport uniquement de particuliers. Ces déchets sont en forte proportion des déchets de cuisines et l'on trouve aussi une part importante de déchets verts (tontes, tailles de haies ; utilisé en co-compostage). Un contrôle visuel est fait sur les arrivages pour isoler les chargements présentant une proportion d'indésirables trop importante. Ces mises à l'écart sont très exceptionnelles. Pour assurer un traitement optimal ils ajoutent en début de traitement des déchets verts broyés qui a vocation à être structurant. Le ratio est un volume de biodéchet pour un volume de déchets verts broyés. En matière d'inertes, le compost répond au cahier des charges Ecolabel. Ce compost est composté durant 3 à 6 mois. Avec des temps de fermentation allant de 5 semaines à 3 mois. Et des temps de maturation autour de 3 mois ;
- **Compost de déchets verts** : produit par l'entreprise BioYvelinesServices, celui-ci est décrit succinctement sur leur page internet²⁶. Les déchets verts (branchages, pelouses etc.) sont compostés en andain, selon le procédé végéterre mis au point par l'ADEME. Le processus de traitement est certifié ISO 9001 ;
- **Le bois broyé** : produit par l'entreprise BioYvelinesServices, celui-ci provient du broyage de produits d'élagages urbains, composés majoritairement de feuillus et de gros bois. Ces déchets végétaux proviennent uniquement de professionnels. Le produit est décrit sur la page internet de l'entreprise²⁷ ;
- **Résidus de champignonnière** : est produit par l'entreprise la Boite à Champignons et correspond à leurs résidus de culture après avoir fait pousser des champignons de type pleurote. La composition exacte du substrat de culture des champignons est confidentielle, néanmoins celui-ci contient majoritairement : du marc de café usagé ainsi qu'un résidu ligneux (paille, carton, bois broyé etc.) ;
- **Briques et tuiles concassée** résultent d'un mélange réalisé par l'entreprise ECT pour une autre expérimentation ;

²⁶ <http://www.bioyvelines.fr/compost-vert.html>

²⁷ <http://www.bioyvelines.fr/paillage-de-bois.html>

- **Terreau** : il correspond à la marque « Terre à planter : or brun® ». Il est composé de terre végétale, de tourbe blonde de sphaignes, d'écorces compostées, de tourbe brune, de fumier de cheval et d'algues compostés ;
- **Billes d'argiles expansées** : ont été achetées à l'entreprise Leprieuré.

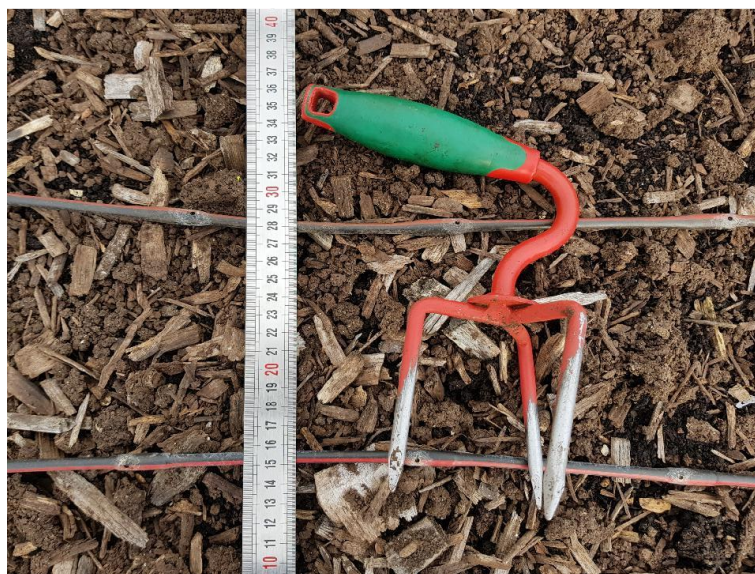


Figure 73 : Binette utilisée au sein de l'expérimentation. ©Zahir Charlène.

Tableau 32 - (a)	pH	Corganique	Matière organique	C:N ratio	Ntotal
		g.kg ⁻¹	g.kg ⁻¹	-	g.kg ⁻¹
Briques et tuiles concassées - 2015	10,4 ± 0,2	4,6 ± 0,9	8 ± 1,5	105,1 ± 10,9	0,04 ± 0,01
Bois broyé - 2014	7,3 ± 0,1	454,3 ± 5,7	786 ± 9,9	96,9 ± 6,8	4,7 ± 0,3
Bois broyé - 2015	6,9 ± 0,1	470 ± 6	813,7 ± 10,5	94,5 ± 11,7	5,02 ± 0,6
Compost de biodéchets criblés - 2015	8,4 ± 0,1	268 ± 1	464,3 ± 1,5	11 ± 0,14	24,4 ± 0,4
Compost de déchets verts - 2013/2014	7,8 ± 0,1	230 ± 22,61	398 ± 39,7	18,7 ± 2,4	12,2 ± 0,8
Mix (compost de biodéchets et résidus de champignonnière) - 2015	8 ± 0,2	306,7 ± 5,8	531 ± 9,5	12,1 ± 0,4	25,5 ± 0,5
Plaquette forestière - 2014	6,9 ± 0,04	484,7 ± 4,7	838 ± 7,9	325,8 ± 28,6	1,5 ± 0,2
Plaquette forestière - 2015	7 ± 0,1	469,3 ± 6,7	811,7 ± 11,6	75,8 ± 4,5	6,2 ± 0,3
Résidus de champignonnière - 2013/2014	6,7 ± 1,5	415 ± 42,9	717,8 ± 74,2	15,9 ± 1,1	26,1 ± 1,6
Résidus de champignonnière - 2015	5,7 ± 0,02	413,3 ± 6,7	715 ± 11,4	19,5 ± 0,8	21,3 ± 0,6
Terreau - 2013/2014	6,7 ± 0,1	231,8 ± 64,5	401 ± 111,4	37,8 ± 2,6	6,1 ± 1,4

Tableau 32 - (b)

	P₂O₅ total	P_{olsen}	Potassium total	Mn	Fe	CaCO₃ total	Conductivité électrique	Capacité d'échange cationique
	g.kg ⁻¹	g.kg ⁻¹	g.kg ⁻¹	mg.kg ⁻¹	mg.kg ⁻¹	g.kg ⁻¹	mS.cm ⁻¹	cmol.kg ⁻¹
Briques et tuile concassées - 2015	-	0,02 ± 0	0,9 ± 0,03	7,6 ± 0,9	718,3 ± 33,01	54,1 ± 3,6	0,06 ± 0,01	2 ± 0,9
Bois broyé - 2014	1,5 ± 0,1	-	0,6 ± 0,01	-	-	3,2 ± 1,08	-	-
Bois broyé - 2015	-	0,4 ± 0,03	0,6 ± 0,1	14 ± 2,4	273,3 ± 33,1	1,8 ± 0,6	0,4 ± 0,07	17,4 ± 1,7
Compost de biodéchets criblés - 2015	-	1,6 ± 0,2	2,4 ± 0,1	46,8 ± 1,5	2426,7 ± 63,5	36,9 ± 1	1,7 ± 0,06	36,9 ± 1,8
Compost de déchets verts - 2013/2014	4,9 ± 0,6	-	1,2 ± 0,04	-	-	56,2 ± 6,1	-	-
Mix (compost de biodéchets et résidus de champignonnière) - 2015	-	1,6 ± 0,04	1,9 ± 0,04	40,7 ± 1	2026,7 ± 92,4	33,3 ± 7,2	1,5 ± 0,03	33,5 ± 5,8
Plaquette forestière - 2014	0,6 ± 0,2	-	0,2 ± 0,04	-	-	<1,1 ± 0	-	-
Plaquette forestière - 2015	-	0,3 ± 0,02	0,2 ± 0,03	7,1 ± 1,4	187 ± 65,5	6,6 ± 1,6	0,2 ± 0,02	21,5 ± 1,7
Résidus de champignonnière - 2013/2014	3,2 ± 0,5	-	0,4 ± 0,09	-	-	37,01 ± 45,4	-	-
Résidus de champignonnière - 2015	-	0,6 ± 0,2	0,4 ± 0,04	17,1 ± 1,8	35,8 ± 1,4	39,9 ± 4,9	0,9 ± 0,04	28,6 ± 4,3
Terreau - 2013/2014	3,6 ± 0,8	-	1,3 ± 0,02	-	-	15,1 ± 9,5	-	-

Tableau 32 (a) et (b): Principales caractéristiques chimiques des matériaux parentaux utilisés au sein de l'expérimentation.

Annexe n° 2 : Effondrement et apport de matière

La **Figure 74** présente l'effondrement des Technosols par traitement durant les cinq saisons de culture sur le dispositif n°1. Chaque mesure a été réalisée avant la « remise à niveau » des Technosols, réalisée en mars ou avril de chaque année. Le **Tableau 33**, présente les volumes apportés annuellement pour le dispositif n°1.

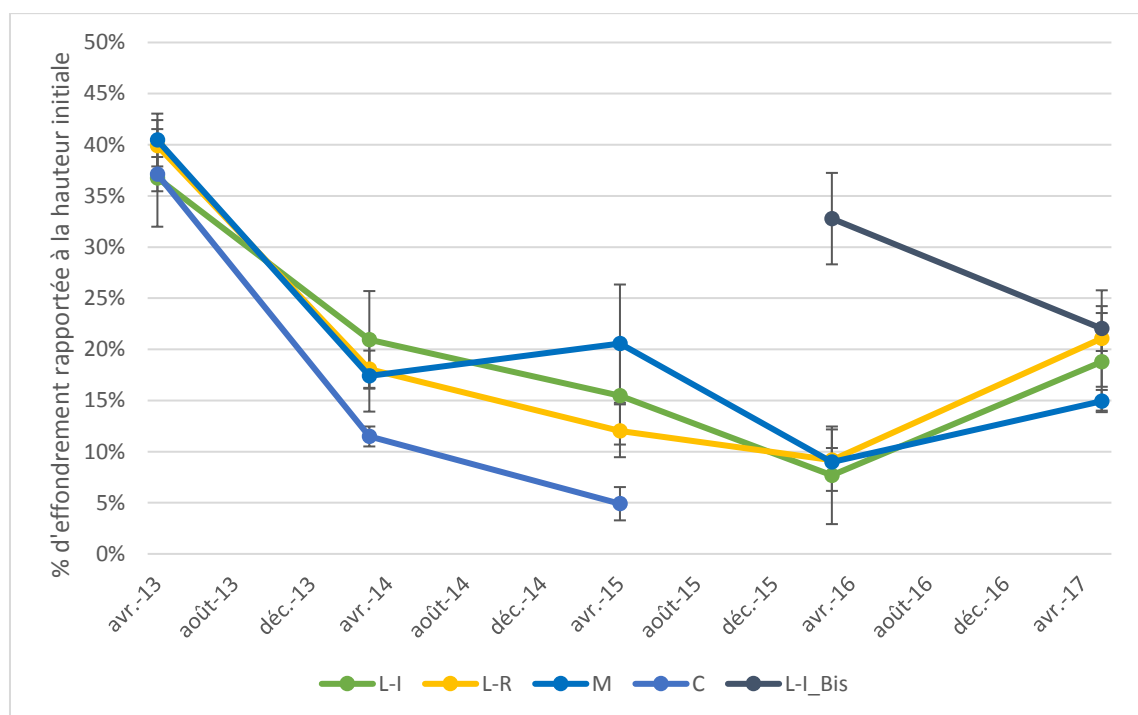


Figure 74 : Effondrement des Technosols, sur le dispositif n°1.

Traitement	Apport (l.bac ⁻¹)					Type d'apport
	avr-13	mars-14	avr-15	mars-16	mai-17	
L-I	71	41	30	15	37	Compost de déchets verts
L-R	78	35	23	18	41	Compost de déchets verts (83% du volume apporté) et résidu de champignonnière (17% du volume apporté)
M	79	34	40	17	29	Compost de déchets verts et bois broyé (respectivement 50% du volume apporté)
C	72	22	10			Terreau
L-I_Bis				64	43	Compost de déchets verts

Tableau 33 : Apport de la couche supérieure de chaque traitement par bac, proportionnelle à l'effondrement pour le dispositif n°1.

Le **Tableau 34** résume quant à lui les mesures d'épaisseurs des Technosols et les volumes apportés au niveau du dispositif n°2.

Date	Epaisseur		Volume apporté	
	mars-14	mars-15	mars-14	Type d'apport
	(cm)		(l.bac ⁻¹)	
C	21 ± 1	26 ± 1	75	Terreau
L	19 ± 2	20 ± 1=2	88	Compost de déchets verts
L-I	15 ± 3	21 ± 1	122	Compost de déchets verts

Tableau 34 : Mesure d'épaisseur et apport de matière réalisés sur le dispositif n°2. Moyenne ± écart-type.

Annexe n° 3 : Mesure dans l'eau - détails de la mesure de Nminéral et du carbone dissous.

- **Mesure de l'azote minéral :**

Les échantillons décongelés sont passés dans un analyseur à flux continu Skalar qui va mesurer la quantité de nitrates et de nitrites présents dans l'échantillon, ainsi que l'azote ammoniacal. L'échantillon est dilué dans un tampon, puis passe sur une colonne de grains de cadmium recouverts de noir de cuivre, pour réduire les nitrates en nitrites. La quantité de nitrites obtenue (celle présente à l'origine plus celle issue de la réduction) donne une réaction de di-azotation avec de la sulfanilamide, puis un couplage avec du chlorhydrate d'anphtyl-ethylenediamine, pour former un complexe rose, dont l'intensité de coloration, mesurée à 540 nm, est proportionnelle à la concentration initiale en nitrites dans l'échantillon.

La détermination de l'ammoniac utilise la réaction de Berthelot modifiée : l'ammoniac est chloré en monochloramine ; celle-ci réagit avec le salicylate pour former un 5-aminosalicylate. Après oxydation et couplage oxydant, il se forme un complexe coloré vert. L'intensité de sa coloration, mesurée à 660 nm, est proportionnelle à la concentration initiale en ammoniac dans l'échantillon.

- **Mesure du carbone dissous :**

Un aliquote d'échantillon d'eau de surverse dilué, passe au travers du module liquide d'un analyseur de carbone Shimadzu, modèle : TOC 5050A. Cet échantillon liquide est brûlé dans un four à 680°C sous un flux d'oxygène. Le carbone total, converti en CO₂ est dosé par un détecteur à infrarouge. Un second aliquote de l'échantillon est acidifié avec de l'acide phosphorique, ce qui permet la transformation du carbone minéral (composé de carbonates et de bicarbonates) en CO₂, dosé par un détecteur à infrarouge. Le carbone organique total est obtenu par la différence entre le carbone total et le carbone minéral.

Annexe n° 4 : Méthode de mesure des éléments traces métalliques

Les méthodes de dosage sont les mêmes pour les substrats et les végétaux. Seul le broyage peut changer.

Les échantillons sont d'abord broyés à 2mm. Ils sont ensuite minéralisés au sein d'un bloc à minéraliser (DigiPREP Jr de SCP SCIENCE) dans des tubes en polypropylène de 50 ml (DigiTUBEs).

- à l'eau régale pour Cu, Cd, Zn, Pb. 1.5 ml HNO_3 , 4.5 ml HCl pour une masse de 0.5g d'échantillon. Les solutions sont chauffées à 95 °C, avec un reflux partiel pendant 30 mn ('verre de montre' en polypropylène) puis évaporées à sec. Le résidu est repris par 2 ml d' HNO_3 puis la solution est étendue à 50 ml avec de l' H_2O déminéralisée ;
- Les éléments sont ensuite dosés en spectrométrie d'absorption atomique sur un HITACHI Z5000.

Pour le Cd, le Pb et le Cu la mesure est réalisée en SAA Electrothermique.

- Cu : on effectue une dilution dans HNO_3 à 4% en utilisant un tube pyrolytique ;
- Cd et Pb : on réalise éventuellement une dilution dans HNO_3 à 4% en utilisant un modificateur $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ (5 μl à 1% pour 10 ou 20 μl d'échantillon), ainsi qu'un tube Oméga avec plate-forme.

Pour Zn la mesure est faite en SAA Flamme via une dilution éventuelle dans HNO_3 à 4%.

Pour le Hg, cela est réalisé avec HNO_3 seul. On prend 5 ml HNO_3 pour environ 0.25g d'échantillon. Du fait du dosage du Hg, la température de séchage initiale doit être limitée à 40°C. Les échantillons sont donc laissés à 40°C jusqu'à masse constante. Après dosage les échantillons sont séchés à 100°C et les résultats sont recalculés. Durant la mesure les échantillons sont chauffés à 95°C, elle est effectuée pendant 2 heures. Les bouchons sont laissés sur les tubes, légèrement dévissés pour permettre un bon reflux et éviter peut-être, les pertes. Les solutions sont ensuite étendues à 20 (25) ou 50 ml avec HNO_3 4%. Le dosage est réalisé en SAA sur un SpectrAA 250 Plus de VARIAN après passage dans un montage spécifique à l'analyse, contenant un piège à Hg. 10 ml de solution sont utilisés pour chaque dosage. On ajoute 0.5 ml de SnCl_2 (20% dans HCl) en début de dosage pour réduire Hg^{2+} en Hg^0 qui sera adsorbé et concentré sur le piège de sable doré, puis analysé en SAA après chauffage du piège. L'étalonnage est effectué au préalable à partir de solutions de 0, 5, 10, 20 ng de Hg qui suivent toutes le processus analytique. La grandeur de mesure sur les solutions est ici la masse (ng). La référence certifiée utilisée est le peuplier et donne des résultats satisfaisants. La limite de détection est de l'ordre 1 ng par gramme de matière sèche.

Annexe n° 5 : Critère d'observation d'un Technosol

Lors des prélèvements de Technosols, une grille d'observation décrite par la **Tableau 35** a été utilisée. Les critères ont été définis à l'aide d'une petite partie des critères de description d'un profil de sol fournis par Geoffroy Séré.

Critère	Réponse possible
Horizon	Supérieur/Intermédiaire/Inférieur
Humidité (gradient de haut en bas)	0. Substrat sec 1. Substrat humide 2. Substrat très humide 3. Stagnation d'eau
Compacité de l'horizon	1. meuble (couteau sans effort) 2. peu compact (couteau avec effort) 3. compact (couteau gros effort) 4. très compact (pénétration incomplète)
Adhésivité de l'horizon	0. non collant 1. peu collant 2. collant 3. très collant
(Bio) dégradation couche de bois	0. Peu dégradé 1. Dégradé 2. Complètement dégradé
Horizon drainant sature	Oui/non
Odeur	

Tableau 35 : Fiche descriptive d'un profil de Technosol

Annexe n° 6 : Protocole de mesure de pF

- **Sur table de succion :**

Une table de succion est principalement constituée de billes de verre (porosité 45 microns) et dispose d'un drain dans sa partie basse (voir **Figure 76**). Le drain est relié à un tuyau dont l'extrémité peut être fixée à une hauteur définie par une règle verticale, dont le 0 est positionné au niveau du centre des échantillons (placés dans les cylindres sur les billes de verre de la table à pF).

Les échantillons en cylindre sont progressivement immergés à débit lent (par la partie inférieure du cylindre) et constant puis laissés 24h à 48h. Une fois saturé, les échantillons sont placés au sein de la table de succion sur les billes de verre (voir **Figure 75** et **Figure 77**).

Au moment de placer les échantillons sur la table, les billes sont recouvertes d'une pellicule d'eau d'environ 1 cm. Il se forme ainsi une continuité hydrique entre les échantillons placés dans les cylindres au fond poreux, et les microbilles de la table. Une toile de papier filtre fine (porosité : 10-20 μ m) sépare le bas des échantillons des billes de verre.

Une fois les échantillons mis en place, le niveau du tuyau du drain est placé à une succession de hauteurs afin d'obtenir plusieurs pF (1, 1.2, 1.5, 1.7, 2). A chaque pF, les échantillons sont laissés un minimum de 4j afin d'assurer un équilibre hydrique, ils sont à chaque fois pesés et leur hauteur et diamètre (taux d'effondrement) sont mesurés.



Figure 75 : Tables de succion.

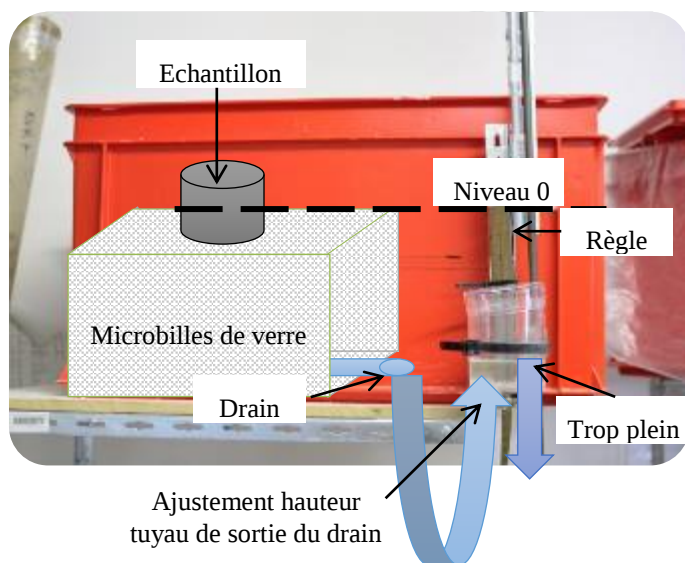


Figure 76 : Schéma récapitulatif du fonctionnement d'une table pF. Réalisé par Alexandre Barrier-Guilot.



Figure 77 : Echantillon sur table de succion.

- **Sur presse Richards :**

Entre pF2 et 4/4,2, des presses Richards sont utilisées (voir **Figure 78**). Les échantillons saturés en eau sont placés sur une plaque en céramique poreuse. Le contact se fait à l'aide de kaolinite entre le fond des cylindres et la plaque en céramique. La presse est fermée, puis une pression est appliquée. L'eau est ainsi expulsée des échantillons, vers la plaque poreuse en céramique, puis à l'extérieur de la presse. Après stabilisation pendant au moins 4 jours, les échantillons sont pesés, leurs hauteurs et diamètres mesurés entre chaque point de pF.



Figure 78 : Presse Richards.

Annexe n° 7 : Protocole de détermination de la masse volumique réelle

- **Mesure de masse volumique réelle - dans le cas d'un matériel hydrophobe**

Objet

Ce mode opératoire décrit une méthode de détermination de la masse volumique réelle de matériaux hydrophobes dans des pycnomètres de 50cm³.

Domaine d'application

Cette méthode est applicable à des échantillons très riches en matière organique comme du bois ou du compost ou des matériaux hydrophobes comme de la brique.

Documents et/ou informations associés:

Protocole adapté de : Clément Mathieu, Françoise Pieltain, « Analyse physique des sols: méthodes choisies », Tec & Doc Lavoisier, 1998, page 82-83

Prévention - Hygiène et sécurité, conditions de travail

Produit/Réactif/Echantillon/Équipement	Dangers	Mesures de protection
Ethanol 96%	Brûlures	Gants, travailler sous la hotte

Bonnes pratiques à respecter – Points de vigilance

Planification :

- Vérifier les stocks d'éthanol 96% ;
- Prévoir une paillasse disponible pendant plusieurs jours et sécurisée (utilisation de matériel très fragile) ;
- Planifier l'utilisation d'un agitateur orbital.

Points de vigilance :

- Certains matériaux peuvent nécessiter une agitation sur 1 journée + 1 nuit de décantation.

Principe

On effectue la mesure de la masse et du volume de la phase solide d'un petit échantillon sec. La mesure du volume est effectuée par le déplacement du liquide, déterminée par la différence de poids entre le pycnomètre plein d'éthanol et celui plein d'éthanol + échantillon. Il est préférable d'opérer sur un échantillon sec. Sur un échantillon humide, il sera nécessaire de connaître le taux d'humidité.

Avec 10 répétitions de la mesure, l'erreur relative commise sur la valeur moyenne et de +/- 1,5% pris au seuil de probabilité de 95%.

Matériels nécessaires

Matériel courant

- 1 balance analytique à 1mg ;
- Du papier propre ;
- Pissette d'éthanol 96% ;
- Agitateur orbital.

Equipements spécifiques

- 10 pycnomètres de volume 50cm³ (50mL) ;
- 1 seringue à aiguille fine type médical.

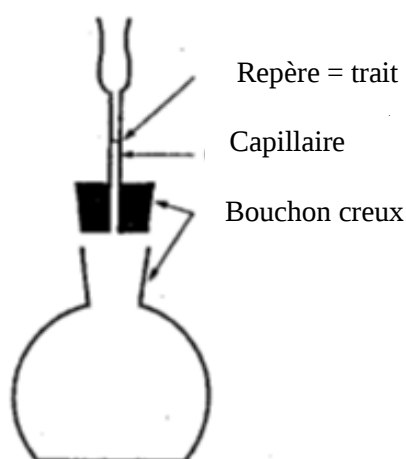


Figure 79 : Représentation schématique d'un pycnomètre.

Produits, réactifs et matériaux de références

(Eau distillée pour des matériaux hydrophiles.)

Ethanol 96% pour des matériaux hydrophobes.

Contenu du mode opératoire

Manipuler les pycnomètres uniquement avec des gants tout au long du protocole, pour éviter les traces de doigts. Toujours tenir les pycnomètres au niveau du col avec 2 doigts pour éviter les erreurs dues aux fluctuations de chaleur.

1. Préparation des échantillons

Les échantillons ont été broyés à 2mm dans un broyeur à couteaux.

2. Nettoyer les pycnomètres

Il faudra s'assurer que les pycnomètres soient parfaitement propres. Ils seront lavés à l'eau distillée, puis à l'alcool si nécessaire. Sécher à l'étuve à 60°C, avant de les sortir, vérifier qu'ils soient parfaitement secs au niveau du capillaire des bouchons creux. Laisser refroidir.

3. Peser des pycnomètres et des échantillons

Peser un pycnomètre vide avec son bouchon creux = **poids A**.

Enlever le bouchon et faire la tare.

Peser 5g d'échantillon (normalement 15g pour du sol) = **poids B**.

Ajouter de l'alcool en rinçant bien les bords intérieurs du pycnomètre. Remplir jusqu'à 0.5 cm au-dessus de l'échantillon.

Faire la même opération pour les 9 autres pycnomètres.

Laisser reposer 1h pour permettre à l'éthanol de pénétrer au cœur de l'échantillon.

4. Agitations

Après 1h de repos, agiter manuellement les pycnomètres pour imbiber totalement l'échantillon.

Remplir les pycnomètres jusqu'à 0.5cm au-dessous du niveau du col pour permettre un mouvement du liquide lors de l'agitation.

Placer les pycnomètres sur un plateau puis sur l'agitateur orbital (le caoutchouc réagit mal avec).

Laisser agiter doucement (80-90 tours minutes) une nuit (voir **Figure 80**). Il est important de bloquer les pycnomètres avec les barres transversales de l'agitateur.

Le matin vérifier qu'il n'y a aucune bulle dans l'échantillon, sinon agiter manuellement et laisser décanter (voir **Figure 81**).

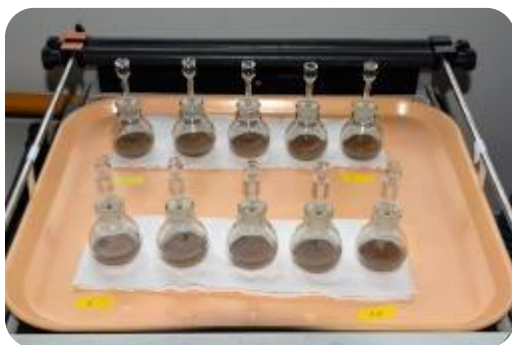


Figure 80 : Pycnomètres en agitation sur un plateau sur un agitateur orbital. ©ABG.



Figure 81 : Décantation incomplète dans le pycnomètre de gauche. A droite, la décantation est satisfaisante. ©ABG.

5. Ajustement des pycnomètres

Une fois la décantation effectuée (voir **Figure 82**), l'éthanol doit être translucide, remplir le pycnomètre jusqu'au milieu du col. Enfoncer doucement, au maximum, le bouchon creux dans le col. L'éthanol remonte alors dans le capillaire au-dessus du trait d'ajustement.

Ajuster au niveau du repère, en retirant de l'éthanol à l'aide de l'aiguille très fine (cf **Figure 82**), afin que le niveau de l'éthanol soit au niveau du repère du capillaire. Aussitôt après l'ajustement, bien essuyer le pycnomètre avec du papier propre.

Peser = poids C

/!\ Peser immédiatement car l'éthanol s'évapore très vite

Effectuer l'opération pour les **9 autres pycnomètres, un à un.**



Figure 82 : A gauche, ajustement d'un pycnomètre avec une aiguille médicale. A droite, niveau d'éthanol incorrect car en dessous du trait de repère d'un pycnomètre. ©ABG

Fin de manipulation

Elimination des déchets produits et réactifs

Nom du produit/réactif	Type de produit/réactif	Document de référence
Ethanol	Solvant	Guide de tri des déchets Centre VG

Conservation et/ou élimination des échantillons et des produits d'échantillons

Il est préférable de garder les échantillons tant que les calculs n'ont pas été faits au cas où il y aurait un problème d'ajustement. Si des mesures sont à refaire, les 10 réajustements puis les 10 pesées sont à effectuer de nouveau.

Les incontournables à faire

Nettoyer avec une attention particulière les pycnomètres.

Nettoyage du poste de travail.

Remplir le cahier suivi des matériels/stocks pour l'éthanol, remplacer les bouteilles utilisées.

Problèmes et remarques à signaler aux encadrants techniques et scientifiques.

Calculs et expression des résultats

On connaît :

- le volume du pycnomètre (50cm³) ;
- la masse volumique du liquide utilisé ;
- la masse du pycnomètre (poids A) ;
- la masse d'échantillon introduit (poids B) ;
- la masse totale 1 : pycnomètre + 50cm³ de liquide (Poids D) ;
- la masse totale 2 : échantillon + pycnomètre + liquide (Poids C).

Ethanol 96%	
1,0000 mL	= 0,8013 g
1,2480 mL	= 1,0000 g

La masse volumique réelle est déterminée de la façon suivante :

$$C - D - B = \text{masse de liquide déplacée (g)}$$

$$\frac{\text{masse de liquide déplacée (g)}}{\text{masse volumique du liquide } \left(\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}\right)} = \text{volume de liquide déplacé (cm}^3\text{)}$$

$$\frac{\text{masse échantillon (g)}}{\text{volume de liquide déplacé (cm}^3\text{)}} = \text{Masse volumique réelle (g.cm}^{-3}\text{)}$$

Conduite à tenir face aux problèmes principaux (*paragraphe optionnel*) :

Problème	Conduite à tenir
Bulles d'air se forment dans et sur l'échantillon	Agiter à nouveau TOUS les pycnomètres et laisser décanter
Un fragment flotte dans le capillaire	Bien veiller à l'enlever lors du nettoyage
Le poids de l'échantillon varie rapidement sur la balance (l'éthanol s'évapore très vite)	Compter 5sec et noter la valeur pour tous les échantillons

Pièce jointe : protocole pycnomètre

82

Analyse physique des sols

3.4. La densité réelle

Méthode classique au pycnomètre.

3.4.1. Principe

On effectue la mesure du poids et du volume de la phase solide d'un petit échantillon sec. La mesure du volume est réalisée par déplacement de liquide.

On peut opérer sur un échantillon humide dont l'humidité est connue ; ceci entraîne une correction dans le calcul. Mais c'est une procédure à éviter.

3.4.2. Matériel

- 1 balance analytique à 1 mg ;
- 1 pycnomètre classique ou à large ouverture, de 50 ml ;
- 1 dessiccateur avec dispositif pour vide par trompe à eau ;
- 1 seringue médicale à aiguille fine ;
- du papier filtre plat.

3.4.3. Mode opératoire

La méthode consiste à faire une série de quatre pesées a, b, c, d, dont on déduit le poids et le volume de l'échantillon.

- a = le pycnomètre vide
- b = le pycnomètre contenant le sol à étudier (15 g environ)
- c = le pycnomètre + sol + eau
- d = le pycnomètre rempli d'eau

On a : Poids = b - a

$$\text{Volume} = (d - a) - (c - b) \quad \text{d'où} \quad \bar{\gamma}_s = \frac{b - a}{(b + d) - (a + c)}$$

Il est essentiel que les pesées soient effectuées à température constante (dilatation du pycnomètre et de l'eau), de 20 °C si possible.

A) Opération a : pycnomètre vide

Nettoyer le pycnomètre, en principe à l'eau, puis à l'alcool, puis à l'éther. Sécher à l'étuve à 105 °C. Laisser refroidir en dessiccateur. Peser.

B) Opération b : pycnomètre + terre

On opère avec de la terre fine, passée au tamis de 2 mm, séchée à l'étuve à 105 °C et ramenée à la température ambiante dans un dessiccateur. Une quantité approximative de 15 g de cette terre échantillonnée est introduite dans le pycnomètre ; la pesée b permet d'en connaître le poids exact.

Mesures de la porosité

83

C) Opération c : pycnomètre + terre + eau

C'est l'opération la plus délicate de la manipulation ; elle est faite en deux temps :

- on imbibue la terre et on la recouvre d'environ 1 cm d'eau distillée, dégazée. On place le pycnomètre sous une cloche à vide aussi longtemps qu'il le faut pour qu'il n'y ait plus de dégagement de bulles d'air. Ceci demande en général une heure. Il est bon de casser le vide et d'agiter au moins une fois pour modifier la position des particules qui ont décanté, et faciliter le départ de l'air emprisonné entre elles ;

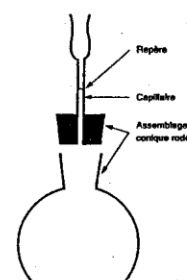
- on termine le remplissage à l'eau distillée dégazée, en prenant soin de ne pas perdre les particules de débris végétaux entraînées à la surface de l'eau. On ajuste alors au trait de repère du pycnomètre, soit avec une seringue médicale à aiguille fine, soit à l'aide de minces bandes de papier filtre enroulées, qui permettent d'enlever le film d'eau qui adhère aux parois du tube capillaire au-dessus du repère. Le bouchon doit être bien assujéti dans le goulot ; quand on essuie l'extérieur du pycnomètre, près du col, le niveau du liquide ne doit pas varier dans le tube capillaire. La partie renflée du pycnomètre ne doit pas être tenue avec la main afin d'éviter les causes d'erreurs dues aux variations de température ; on le tiendra avec deux doigts au niveau du col.

D) Opération d : pycnomètre + eau

On emploie de l'eau déminéralisée, préalablement dégazée par ébullition ou sous vide, mais toujours à la température ambiante. On en remplit le pycnomètre, puis on ajoute le bouchon creux. Réglage du niveau au repère du tube du bouchon comme ci-dessus en c.

E) Précision

Avec dix répétitions de la mesure, l'erreur relative commise sur la valeur moyenne de $\bar{\gamma}_s$ est de $\pm 1,5 \%$ pris au seuil de probabilité de 95 %.



- Mesure de masse volumique réelle - dans le cas d'un matériel hydrophobe et/ou flottants et/ou poreux

Objet

Ce mode opératoire décrit une méthode de détermination de la masse volumique réelle de matériaux hydrophobes et/ou flottants, et/ou poreux dans des éprouvettes de 0.5 ou 1L.

Domaine d'application

Cette méthode est applicable à des échantillons hydrophobes et/ou flottants, et/ou poreux. Elle a été mise au point pour calculer des masses volumiques réelles de bois broyés, de plaquettes de bois déchiquetées et de mélanges de briques et tuiles concassées.

Documents et/ou informations associés:

Pas de référence

Prévention - Hygiène et sécurité, conditions de travail

Aucun

Bonnes pratiques à respecter – Points de vigilance

Planification :

- Réserver à l'avance des éprouvettes identiques,
- Réserver à l'avance des agitateurs adaptés aux éprouvettes.

Points de vigilance :

- Prévoir 24h pour chaque échantillon.

Principe

La méthode est fondée sur la poussée d'Archimède, qui définit la force particulière que subit un corps plongé tout entier ou en partie dans un fluide (liquide ou gaz) soumis à un champ de gravité. « Tout corps plongé dans un fluide éprouve une poussée verticale, dirigée de bas en haut, égale au poids du fluide qu'il déplace et appliquée au centre de gravité du fluide déplacé, ou centre de poussée. »

Ainsi dans un volume de liquide connu, l'immersion totale d'un objet entraînera la montée du niveau de ce liquide, ce volume déplacé est égal au volume de l'objet immergé, qui une fois rapporté à sa masse sèche, exprimera sa masse volumique réelle.

Matériels nécessaires

Matériel courant

- Le maximum d'agitateurs,
- Autant d'éprouvettes de 0.5 ou 1L (en fonction de la densité et du poids des échantillons) que d'agitateurs,
- Une pissette d'eau distillée.

Equipements spécifiques

- De la toile de lyophilisateur,
- Des cylindres creux adaptés au diamètre des éprouvettes afin de constituer un bouchon.

Produits, réactifs et matériaux de références

Environ 1L d'eau distillée par échantillon.

Contenu du mode opératoire

Pour les matériaux flottants (bois), répliqué 10 fois

Préparation de 10 échantillons

Les échantillons sont secs et leur masse connue.

Ils n'ont subi aucune modification physique par rapport à leur état d'origine afin de pouvoir déterminer leur masse volumique réelle.

Nettoyer et sécher les éprouvettes

Les éprouvettes devront être parfaitement propres et sèches, afin de connaître leur masse exacte. Numéroté les éprouvettes et les peser. (**Masse A**)

Créer un bouchon unique pour chaque éprouvette

A l'aide de cylindre de PVC creux (ou tout autre matériel similaire) et des toiles de lyophilisateur, confectionner un bouchon qui bloquera l'échantillon, mais laissera passer l'eau à travers (voir **Figure 83**). Le bouchon doit pouvoir s'enfoncer dans l'eau et être retiré sans trop de difficulté.



Figure 83 : Bouchon composé d'un tube PVC et de toiles de lyoph. ©ABG

NETTOYER ET SECHER LES BOUCHONS

Nettoyer et sécher parfaitement les différentes composantes du bouchon.

Une fois parfaitement sec, peser l'ensemble du bouchon. (*Masse C*)

/!\ chaque bouchon est unique à chaque éprouvette, ils ne doivent pas être mélangés entre eux (ni mélanger les toiles de lyoph, etc...)

Déterminer la masse volumique des bouchons

Introduire les bouchons dans leur éprouvette respective. Remplir d'eau distillée. Il ne doit pas y avoir de bulle d'air. Ajuster au trait d'ajustement (1L ou 0.5L par exemple). Peser. (*Masse D*)

A cette étape, la masse totale sèche de chaque éprouvette et de leur bouchon respectif ainsi que la masse de chaque éprouvette + bouchon + eau ajustée, sont connues.

Peser les échantillons :

Faire la tare de l'éprouvette. Y ajouter une masse précise d'échantillon sec (qui sera identique pour chaque échantillon). Rincer le contenant de l'échantillon pour récupérer toutes les petites fractions (voir **Figure 84**). (*Masse E*)

Répéter l'opération pour chacune des éprouvettes.



Figure 84 : Pesée des échantillons secs dans les éprouvettes. ©ABG

Agitation

Remplir les éprouvettes à moitié d'eau. Agiter 12 à 16h. Plus le mouvement d'eau dans l'éprouvette sera important, mieux l'échantillon sera rapidement imbibé d'eau. **L'ensemble de l'échantillon doit être immergé (cf Figure 85).**

L'agitation permet de limiter l'apparition de bulles d'air sur l'échantillon, et de remplir au maximum d'eau les pores accessibles de l'échantillon.



Figure 85 : Agitation des échantillons. ©ABG.

Pesée et ajustement

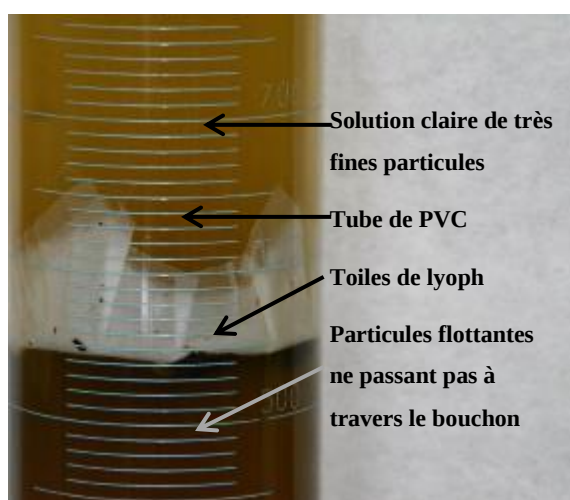


Figure 86 : Le bouchon retient toutes les grosses particules flottantes de l'échantillon. ©ABG.

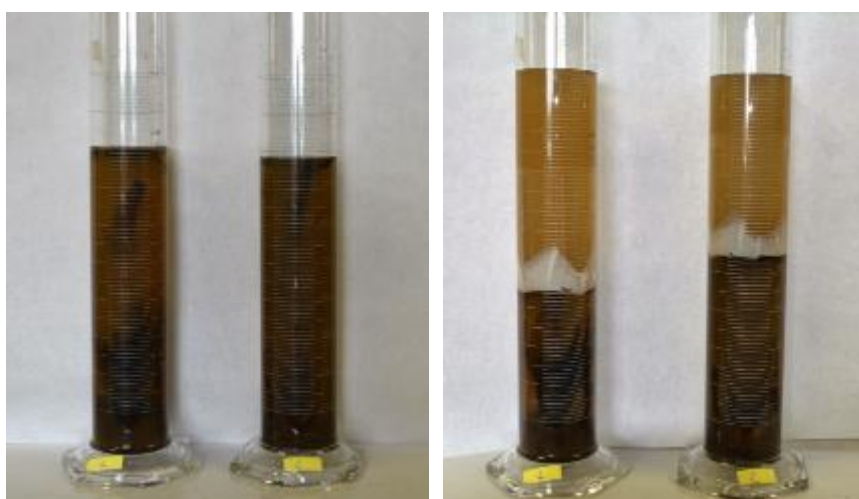


Figure 87 : Eprouvettes avant insertion du bouchon à gauche, puis avec le bouchon à droite. ©ABG.

Une fois l'échantillon parfaitement imbibé, mettre le bouchon dans l'éprouvette. Ne pas l'enfoncer au maximum, mais juste en dessous du trait d'ajustement (1L ou 0.5L). Remplir doucement d'eau distillée

et en même temps faire descendre le bouchon pour qu'il soit totalement immergé. **Ne pas dépasser le trait d'ajustement.**

Enfoncer le bouchon petit à petit, par à-coup, en tapotant ou en le tournant afin d'éviter le maximum de bulles d'air (voir **Figure 86** et **Figure 87** ; note : plus il sera enfoncé, plus il sera difficile de le retirer).

Une fois les bulles d'air éliminées (voir **Figure 88**), ajuster au volume désiré (1L par exemple).



Figure 88 : Bulles d'air à éviter avant ajustement final du niveau d'eau. ©ABG.

Sécher l'extérieur de l'éprouvette et peser l'ensemble. (*Masse F*)

Répéter l'opération pour toutes les éprouvettes.

Fin de manipulation

Elimination des déchets produits et réactifs

Il n'y a pas de produit ou réactif qui nécessite un recyclage particulier.

Conservation et/ou élimination des échantillons et des produits d'échantillons

Pas de conservation possible. L'échantillon est récupéré et jeté dans une poubelle classique à défaut de poubelle déchets verts ou sol. (Ne pas vider dans l'évier directement utilisé un tamis pour ne pas boucher les canalisations).

Les incontournables à faire

Nettoyage et rangement de la vaisselle.

Nettoyage du poste de travail.

Cahiers de laboratoire et/ou de suivi des matériels/stocks à renseigner.

Problèmes et remarques à signaler aux encadrants techniques et scientifiques.

Calculs et expression des résultats

Pour chaque échantillon, on connaît en gramme :

- La masse de l'éprouvette sèche et vide = A
- La masse de l'éprouvette ajustée au volume désiré, par exemple 1L = A + 1000g = B
- La masse du bouchon sec = C
- La masse de l'éprouvette + bouchon + eau ajustée = D
- La masse de l'échantillon sec = E
- La masse de l'éprouvette + bouchon + échantillon + eau ajustée = F

Commencer par déterminer la masse volumique de chaque bouchon (ajusté à 1L) :

$$\text{Volume réel bouchon (mL)} = D - (C + B)$$

Puis calculer le volume réel de chaque échantillon

$$\text{Masse d'eau déplacée (g)} = F - E - (A + C)$$

$$\text{Volume réel de l'échantillon (mL)} = 1000 - \text{masse d'eau déplacée (g)} - \text{Volume réel du bouchon (mL)}$$

$$\text{Masse volumique réelle de l'échantillon (g/mL)} = \frac{\text{Masse de l'échantillon sec (g)}}{\text{Volume réel de l'échantillon (mL)}}$$

Conduite à tenir face aux problèmes principaux (*paragraphe optionnel*) :

Problème	Conduite à tenir
Bulles d'air	Enfoncer très doucement par étape le bouchon, le faire tourner, tapoter l'éprouvette, etc...

Annexe n° 8 : Détail μ GC

L'appareil va effectuer un prélèvement de gaz dans l'atmosphère des bocaux fermés par un septum. Grâce à un système de colonnes, les gaz ne vont pas circuler à la même vitesse et vont ainsi se séparer au sein de ces colonnes. Les gaz tournent en boucle et une fois séparés, ils sont analysés.

Étalonner selon les gaz qu'il recherche, l'appareil pourra ainsi déterminer la quantité de gaz obtenue en fonction de son temps de sortie de la colonne. Une valeur en ppm de CO_2 est ainsi obtenue par date de prélèvement.

L'opération est répétée 2 fois par l'appareil afin de vérifier s'il n'y a pas eu de pollution des colonnes et s'il est bien étalonné, les 2 valeurs obtenues par mesure doivent ainsi être très proches. L'écart d'acceptation est de 200ppm. Lorsque la valeur atteint 100 000ppm, la limite de l'appareil est atteinte. De plus, cette valeur a été choisie comme étant la valeur de saturation en CO_2 de l'atmosphère : 10% CO_2 / 10% O_2 , soit 50% de l' O_2 consommé. Les bocaux sont régulièrement « flushés » afin de renouveler leur atmosphère, à l'aide d'une pompe qui fait circuler l'air à travers une colonne de soda lime (composé à plus de 75% de $\text{Ca}(\text{OH})_2$) qui piège le CO_2 de l'atmosphère (de la pièce) avant de le renvoyer dans le fond du bocal. L'opération prend 15 à 20 minutes. La teneur en CO_2 est ensuite à nouveau mesurée. Une courbe de la cinétique de minéralisation de chaque matériau représentée par le cumul des valeurs mesurées (dont les valeurs de CO_2 mesurées après chaque flush ont été soustraites) a été réalisée au fur et à mesure.

Annexe n° 9 : Pluviométries et températures durant les périodes d'expérimentations.

Le tableau et figure ci-dessous, rapportent les données issues de la station météorologique placée sur la toiture expérimentale « Bertrand Ney ».

	Somme précipitations annuelles (mm)
10 mois -2012	565,8
2013	568,8
2014	698,2
2015	511,8
2016	632,4
4mois - 2017	150,8

Tableau 36 : Somme des précipitations annuelles durant les périodes d'expérimentations.

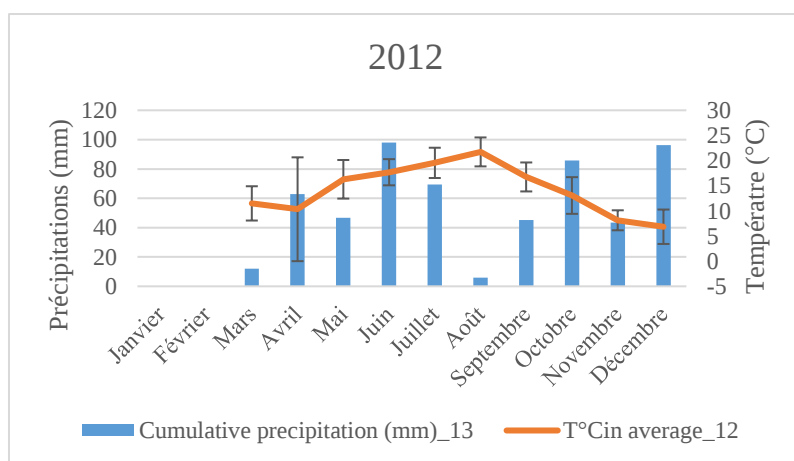


Figure 89 : Diagramme ombrothermique de la toiture expérimentale « Bertrand Ney » entre mars et décembre 2012.

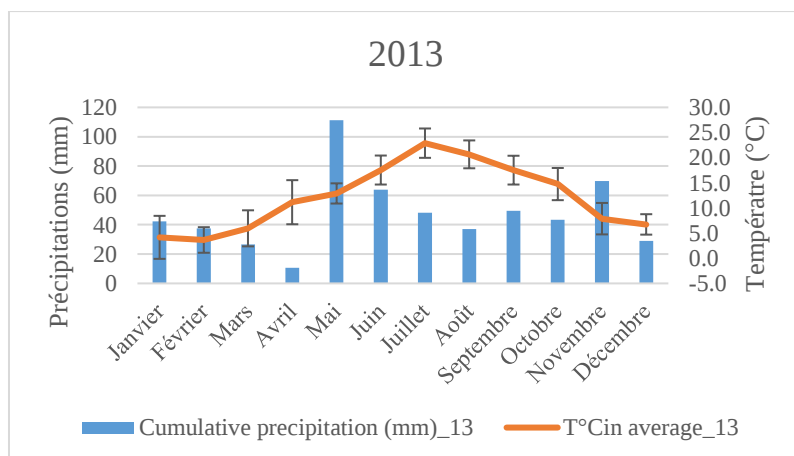


Figure 90 : Diagramme ombrothermique de la toiture expérimentale « Bertrand Ney » durant l'année 2013.

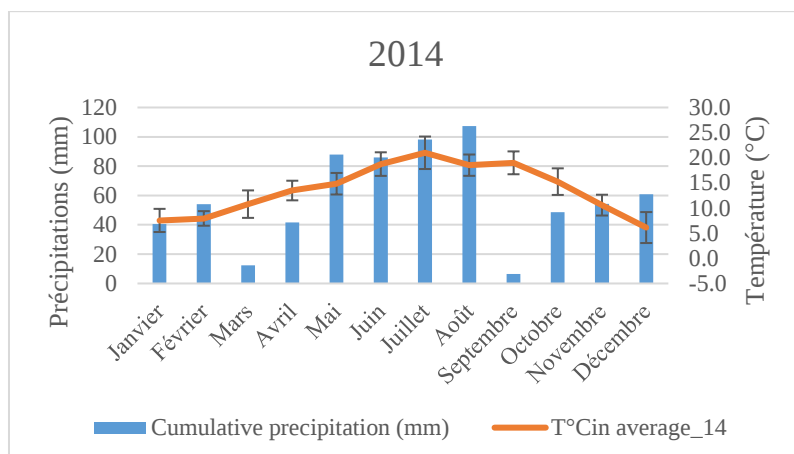


Figure 91 : Diagramme ombrothermique de la toiture expérimentale « Bertrand Ney » durant l'année 2014.

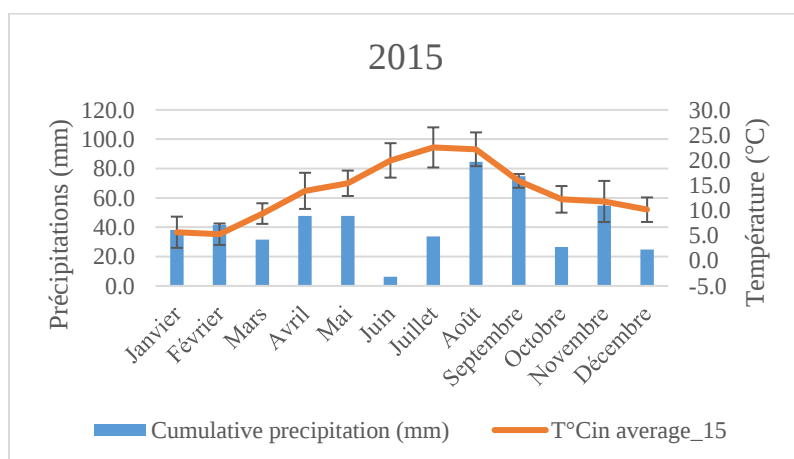


Figure 92 : Diagramme ombrothermique de la toiture expérimentale Bertrand Ney durant l'année 2015.

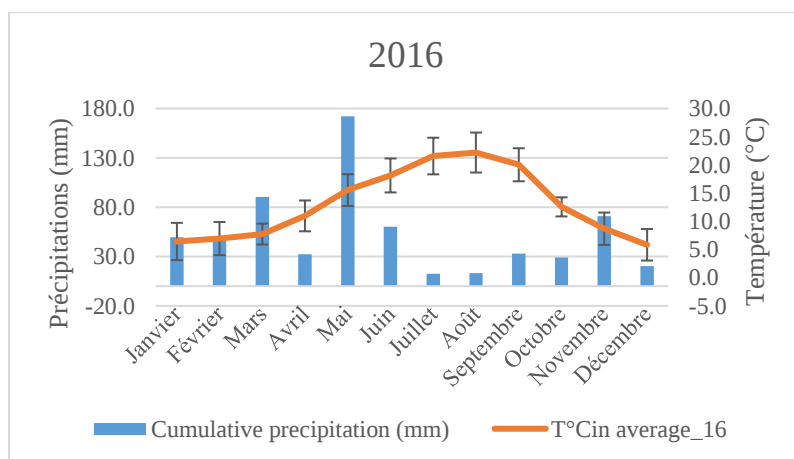


Figure 93 : Diagramme ombrothermique de la toiture expérimentale « Bertrand Ney » durant l'année 2016.

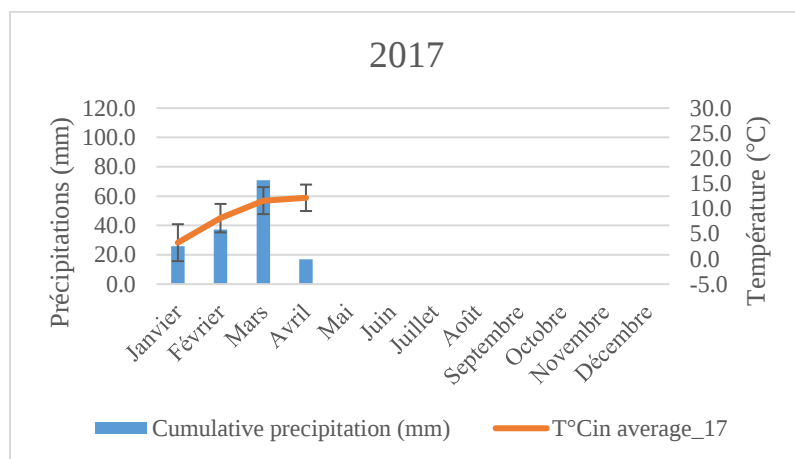


Figure 94 : Diagramme ombrothermique de la toiture expérimentale « Bertrand Ney » entre les mois de janvier et avril. 2017.

Annexe n° 10 : Article “Recycling urban waste as possible use for rooftop vegetable garden”

Grard B.J.-P.*^{1,2}, Bel N.³, Marchal N.⁴, Madre F.^{3,5}, Castell J.-F.¹, Cambier P.¹, Houot S.¹, Manouchehri N.⁶, Besancon S.⁶, Michel J.-C.⁷, Chenu C.¹, Frascaria-Lacoste N.², Aubry C.⁸

- (¹) UMR ECOSYS, INRA, France
- (²) UMR ESE, AgroParisTech – University Paris-Sud, CNRS France.
- (³) TOPAGER, France
- (⁴) Association "Potager sur les toits", France
- (⁵) UMR CESCO 7204, Muséum National d'Histoire Naturelle, France
- (⁶) UMR GENIAL, AgroParisTech, France
- (⁷) UP EPHOR, Agrocampus Ouest, France
- (⁸) UMR SAD-APT, INRA, France

* Corresponding author. E-mail: baptiste.grard@agroparistech.fr

Statut de l'article : publié en mai 2015 dans le journal Future of Food: Journal on Food, Agriculture and Society²⁸.

Abstract

Urban authorities in Europe are confronted with increasing demands by urban dwellers for *allotment gardens*, but vacant urban soil tends to be scarce and/or polluted by past industrial activities. A possible solution for local authorities could therefore be to promote rooftop gardening. However little technical information exists on certain forms of rooftop *urban agriculture*, called *Z-Farming*. In 2012, a pilot experiment was run in Paris (France). Simple and cheap systems of *rooftop gardening* were tested on a rooftop using as crop substrates only local *urban organic waste* so as to contribute to the *urban metabolism*. Production levels and heavy metal contents in cropping substrates and edible vegetables were measured. Available results show (i) high levels of crop production with limited inputs compared to land professional gardening, (ii) low levels of heavy metal pollutants in the edible parts of the crops, especially for Cd and Pb with respect to EU norms for vegetables and (iii) positive influence on yields on organizing the substrate in layers and enhancing the biological activity through earthworm inoculation. These encouraging results allow us to consider that *rooftop gardening* is feasible and seem to have a great potential to improve urban resiliency. It will nevertheless be necessary to identify more

²⁸ <http://futureoffoodjournal.org/index.php/journal>. Visité le 20/10/2017.

precisely the types of roof that can be used and to assess more fully the generic result of the low level of pollution, as well as the global sustainability of these cropping systems.

Introduction

Urban sprawl increase and development across the globe are producing many challenges including atmospheric, soil (Säumel et al. 2012)(Alloway 2004)(Wong et al. 2006) and water pollution due to the concentration of people in urban areas (Girardet 2008), needing transport for food production and supply. Among these challenges urban authorities and inhabitants are increasingly concerned about the food security of cities, for example like Toronto, Cleveland and Detroit. (MacRae et al. 2010)(Grewal and Grewal 2012)(Aubry et al. 2010)(Aubry 2013).

Partially in response to this growing concern, the phenomenon of urban agriculture has been spread worldwide, especially in the northern hemisphere, for more than a decade. Urban agriculture can be defined as an agriculture located inside or near the city, producing mainly for the city and using resources shared and/or in competition with urban uses (Smith et al. 2004) (Veenhuizen 2006). Urban agriculture is characterized by its multi-functionality and diversity of forms (Aubry 2013)(Smit et al. 1996)(Pourias 2013). Amid these forms, urban allotment gardens have been developed rapidly worldwide in the last few decades. For instance, a city like Paris has seen the number of urban allotment gardens rise from 5 in 2002 to more than 100 in 2014 (Pourias, 2013 op.cit). This strong development coupled with the need for space in megacities led to many unsatisfied demands and waiting lists for urban dwellers applying for an urban allotment garden.

The exploitation of unused spaces such as rooftops can be a solution to this scarcity of space for urban allotment gardens. This solution is already used by urban agriculture, mainly for commercial purposes in cities like Montreal, Toronto or New York (Specht et al. 2013)(Thomaier et al. 2014). In Paris, the newly elected mayor Anne Hidalgo promised during the 2014 election campaign to turn 100 ha of Parisian walls and rooftops into green roofs and walls, 30% of this area will be dedicated to gardens or food production (Hidalgo 2014). A study by the Urban Parisian Planning Study (APUR 2013) investigated the current area of rooftops that could be turned into productive rooftops inside the city. These eligible rooftops were identified by the way of aerial photography cross-compared with building licenses and specific criteria (minimum area of 200m², slope below 2% and a supposed concrete structure). The results showed 460ha of flat roofs, among which 80ha were classified as having a “high potential for vegetalization”. Further case by case investigations are needed to assess such classification. Anyway, this study provides a first survey of the actual potential of Paris’ rooftop gardening. Note that (i) Paris is well known for its old centre that presents a very low rate of eligible rooftops, as shown in the APUR study. (ii) The potential of the suburbs of Paris (which represent the majority of the region's

urban surface area) has not yet been investigated, although these areas are likely to have a higher potential, owing to their more recent, flat rooftops.

This emergence of new forms of urban agriculture in or on buildings is called “Z-farming” for Zero-Acreage Farming – a term coined by Specht and Thomaier (Specht et al. 2013)(Thomaier et al. 2014). Z-farming is raising research questions especially on the technical aspects of setting up rooftop gardening. Concerning the choice of a growing media, many researchers worked for more than a decade in horticulture and soil science on the use of waste as a growing substrate or peat/soil substitute (Ostos et al. 2008)(Abad et al. 2001)(Hernández-Apaolaza et al. 2005)(Rokia et al. 2014)(Morel et al. 2000). In the research reported here, we sought to open a new pathway as we consider the urban environment as a source of possible organic and mineral growing substrate using only local urban waste for a productive rooftop. This led us to design an experiment with rooftop gardening in Paris that take into account the specific constraints of this environment. We adopted three main principles for the pilot experiment:

1. To be transposable to people without specific agricultural skills and with limited economic resources. This implied to look for cheap and easy ways to cultivate. These conditions, as well as the minimization of the workload and our environmental friendly approach (see below) excluded the use of high-tech production techniques (such as hydroponic systems or rooftop greenhouses).
2. To be based on the use of local urban organic waste as a part of the urban metabolism (Barles 2009). This could have many direct advantages such as, avoiding the costs and harmful greenhouse gases generated through waste transportation and treatment and recycling the nutrients at a local scale thus partly turning the city into a closed loop system (Smit and Nasr 1992). Furthermore, using organic waste as a cultivation substrate is an advantage in these cultivation conditions, as it is a lightweight substrate.
3. Not to use any chemical fertilizer nor any pesticide or insecticide, in order to limit contamination of food products and ecosystem as well as to limit the use of energy costly fertilizer. In any case local regulations in a city like Paris and a future law has or will prohibit the use of chemical products for green spaces. Exogenous substrates like peat or coco fibre are used for some rooftop production in Montreal or New York. However due to their environmental impacts (Cleary et al. 2005) we chose not to use them in our experiment. Our environmentally friendly approach also imply that a key aspect of our cropping system would be the substrate's sustainability (i.e. its capacity to ensure a significant amount of production before needing to be replaced).

The overall purpose of this paper is to assess the potential of such cropping systems, based on the first results of a pilot experiment in which we manipulated the nature of the substrate components, their

organization in production beds and the presence of soil organisms. We focus here on the production level of our cropping systems and on a key aspect of UA: the content of pollutants in edible production.

I. Material and methods

I.1. Rooftop experiment

The experiment T4P (Pilot Project of Parisian Productive Rooftops) was started in 2012 on the rooftop of *AgroParisTech* (French Technical University of Agronomy; 16 rue Claude Bernard, 75 005; coordinates: 48°50'24.4"N, 2°20'54.5"E). We chose to use wooden containers classically used as a backyard composter. This choice was made not only to facilitate the experimental observations and measurements but also with the idea that small spatial units could be easier to manage than plots on a roof. These containers are very easy to build and are sold cheaply in garden centres (around 20€ for a wooden container 40 cm height). They also allow an urban allotment gardens to be more flexible by adapting the total numbers and spatial localization of cropping containers on the roof to its specific characteristics (global weight carrying capacity and variability on the roof, useable area, number of families each year, etc.). A picture of the experiment is shown in **Figure 95**.



Figure 95 : The rooftop of AgroParisTech in 2012. On the right side the first crop sequence (experimental device n°1) (Photo credit: Xavier Remongin)

I.2. Growing media

I.2.a. Initial substrates

We used three types of urban organic waste as a component of the growing substrate:

- Green waste compost from urban public parks and green spaces, which is commonly made in Paris as well as in the suburbs. This compost is used by the public parks services of the city in their green space as the compost maturity turn it into a good fertilizer. The surpluses are frequently given to individuals or local non-profit organizations. Our supplier is a company located in Versailles near Paris, *BioYvelinesServices* (see **Annexe - Article Future of food - n° 1** for the description of our experiment partner);

- Crushed Wood, also from public spaces, of which the surpluses are given or sold cheaply to the public. An ample supply was provided by *BioYvelinesServices*;

- Coffee grounds with *Pleurotus Ostreatus* mycelium was a more original substrate: it came from a new urban farm (The *U-Farm*, part of the *UpCycle* company ; see **Annexe - Article Future of food - n° 1**) producing mushrooms in ship containers on a coffee grounds mixed with wood chips. U-Farm, in partnership with a leading coffee supplier, collect used coffee through a specific supply chain from coffee machines in Paris.

We used a potting soil (see **Annexe - Article Future of food - n° 2**) as a control. This horticultural substrate, commonly used in urban allotment gardens, was supplied by a garden centre. Woodchips were also used as mulch in each box, in order to minimize substrate evaporation and weeds. The main agronomic characteristics of our substrates are presented in **Tableau 37**.

	pH water (mean ± SD)	CaCO ₃ total (mean ± SD) g.kg ⁻¹ of DM	Organic carbon (mean ± SD) g.kg ⁻¹ of DM	Total nitrogen (mean ± SD) g.kg ⁻¹ of DM	C _{organic} /N _{total} (mean ± SD)	Potassium (mean ± SD) g.100g ⁻¹ of DM
Green waste compost	7,7 ± 0,03	53,2 ± 1,6	233,0 ± 31,1	11,8 ± 0,2	19,6 ± 2,6	1,2 ± 0,04
Coffee ground with mycelium	6,0 ± 0,8	11,1 ± 9,4	436,3 ± 5,1	26,7 ± 1,3	16,4 ± 0,6	0,4 ± 0,09
Crushed wood	7,3 ± 0,07	3,2 ± 1,08	454,3 ± 5,7	4,7 ± 0,3	96,9 ± 6,8	0,6 ± 0,01
Woodchips	6,9 ± 0,04	<1 ± <0,01	484,7 ± 4,7	1,5 ± 0,2	325,8 ± 28,6	0,2 ± 0,04
Potting soil	6,7 ± 0,06	18,6 ± 7,9	264,0 ± 2,7	6,8 ± 0,1	39,1 ± 0,2	1,3 ± 0,02

Tableau 37 : Average physico-chemical characteristics of the source materials for growing substrate used in 2014. SD = Standard Deviation and DM = Dry matter, n=3. The analyses were performed by the soil laboratory of INRA ARRAS that is accredited by COFRAC. <http://www6.lille.inra.fr/las>

I.2.b. Mixes tested

Our cultivation system was inspired by an original gardening practice born in the United States of America and which started to be known and used in France a few years ago: lasagne beds (Collaert 2010). The idea is to mimic a soil by putting down layers of “brown” and “green” organic matter. The

“colour” relates to the decomposability and mineralization rate. For instance, a brown layer could be crushed wood that is supposed to have a low rate of mineralization and provides an input of carbon, with a high C/N ratio. The green layer could be a green waste compost with a high mineralization rate and a consequent input of nutrients due to a low C/N ratio. Every year, at the beginning of the cropping season, an additional layer of “green” matter is added. This ensures an input of organic matter to provide nutrients by mineralization to compensate for that used by the previous crop. Inputs of chemical or organic fertilizer during the cropping season can thus be avoided.

We tested the nature of the initial substrate used and its distribution in the container, either as a lasagne or homogeneously mixed, and the inoculation with earthworms. The latter were introduced with the hypothesis that earthworms would create and maintain a soil structure favourable to plant growth. Two functional groups were used (epigeic and anecic) given their contrasted roles in soil (Blouin et al. 2013)(van Groenigen et al. 2014).

Five mixtures of the three organic wastes and a potting soil were randomly distributed in 2*15 wooden boxes of 0.64m² each, with 0.5 m between them. The five treatments are presented in **Figure 96** and composed as follows:

- Treatment n°1 (L): two layers of 15 cm of green waste compost and crushed wood.
- Treatment n°2 (L-I): two layers of 15 cm of green waste compost and crushed wood in which we inoculated three species of earthworms corresponding to two functional groups (epigeic and anecic): 15 *Dendrobaena Veneta* (epigeic earthworm) adults, 35 *Eisenia Fetida* (epigeic earthworm) adults and 10 *Lumbricus Terrestris* (anecic earthworm) adults.
- Treatment n°3 (L-R) : three layers : two of 12.5 cm composed of crushed wood and green waste compost and 5 cm of coffee ground with *Pleurotus Ostreatus* mycelium.
- Treatment n°4 (M): 30 cm of a green waste compost and crushed wood mixture (50/50 v/v).
- Control (C): 30 cm of potting soil.

Each box was filled at the bottom by 5cm of clay balls used as a water reserve and surrounded by an EPDM (Ethylene-Propylene-Diene Monomer) membrane. On the top of this we placed 30cm of growing substrate surrounded by a “geotextile” through which the roots can grow.

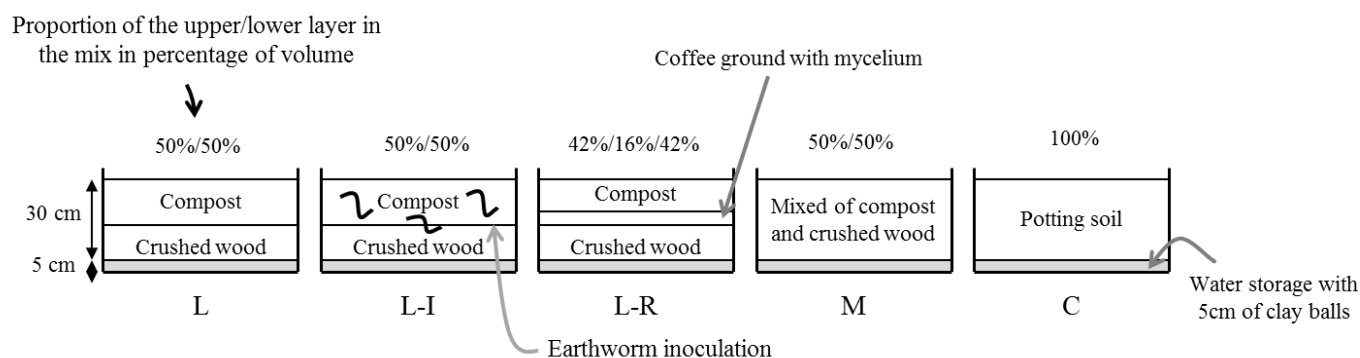


Figure 96 : Description of the five treatments used in the T4P experiment.

I.3. Cropping species

Each row of 15 boxes corresponded to a crop sequence: either lettuce (*Lactuca sativa*) then cherry tomatoes (*Lycopersicum esculentum* var. chery) then green manures (*Trifolium incarnatum* and *Secale cereale*) called n°1; or cherry tomatoes then lettuce then green manures called S2. These two sequences were designed to represent the most common crops grown in UAG in Paris as well as to vary by their nutrients needs over the cropping season. Indeed, the tomatoes plants export more nutrients to grow than the lettuce (Argouarc'h 2005). In this paper we focus on the first sequence, (experimental device n°1), as shown in **Figure 97**.



Figure 97 : Representation of the first crop sequence (experimental device n°1) in the T4P experiment.

I.4. Technical processes of the experiment

The only input allowed was organic, applied at the beginning of the cropping season (end of March or April) when the containers were re-filled with organic material (to 30 cm height) to compensate for substrate compaction and biodegradation. In March 2013 the following proportion of the initial volume of the substrate was filled with (in % of initial volume of the substrate):

- C: 25% of potting soil
- L: 34% of green waste compost
- L-I: 40% of green waste compost
- L-R: 27% of coffee ground with mycelium (16% of the 27% as the bottom layer) and green waste compost (the other percent as the top layer)
- M: 37% of green waste compost mixed with crushed wood (50/50 v/v)

As for diseases protection, we applied copper sulphate only on the tomato plants, in three treatments in 2012 (June, July and August) and two in 2013 (June and July). In parallel we did two preventive horsetail treatments in 2013 on tomatoes and in 2013 we put one Indian carnation plant in each box to avoid aphids. The box was irrigated by way of two kinds of drip irrigation system in the cropping season 2012 and 2013.

I.5. Sampling and analyses

During the harvest of lettuce (June 2012 and June 2013) and tomatoes (between July and October 2012-2013) 100g of fresh matter were collected from each box washed and dried at 40°C for at least a week. The fresh and dry matter was weighed in order to determine the precise biomass production.

Five trace metals (Cd, Pb, Cu, Zn and Hg) currently found in polluted urban garden soils were analysed (Alloway 2004)(Wong et al. 2006). A Polarized Zeeman Atomic Absorption spectrophotometer model Z5000 (HITACHI) was used by means of ETAAS (Electrothermal Atomic Absorption Spectrometry) to determine Cd, Pb and Cu and by means of FAAS (Flame Atomic Absorption Spectrometry) to determine Zn. Hg was analysed by means of CVAAS (Cold Vapor Atomic Absorption Spectrometry).

Three times a year the growing substrates were sampled layer by layer (12 or 16% of the box volume) and 500g of each layer were used for agronomic and pollutant analyses. Each substrate was dried at 40°C and sieved at 2mm by a crusher. The agronomic analysis (pH, OM, CaCO₃ etc.) was performed by a certified soil laboratory.

Climatic data were registered through an automatic station giving daily temperatures, rain and evapo-transpiration. Due to a technical problem at the meteorological station, the data for the two growing seasons are not yet complete (see **Annexe - Article Future of food - n° 3**).

I.6. Statistical analysis

Statistical analyses were performed on fresh biomass production (3 replicate boxes per treatment) using R software (R-3.1.1). The five treatments were compared through an analysis of variance (ANOVA) after ensuring normality of the data. A multiple comparison of means was determined by the ‘post-hoc’ Tukey test. A significance level of $P < 0.05$ was used. All the p-values from the analysis are presented in **Annexe - Article Future of food - n° 4**.

II. Results

II.1. Production levels



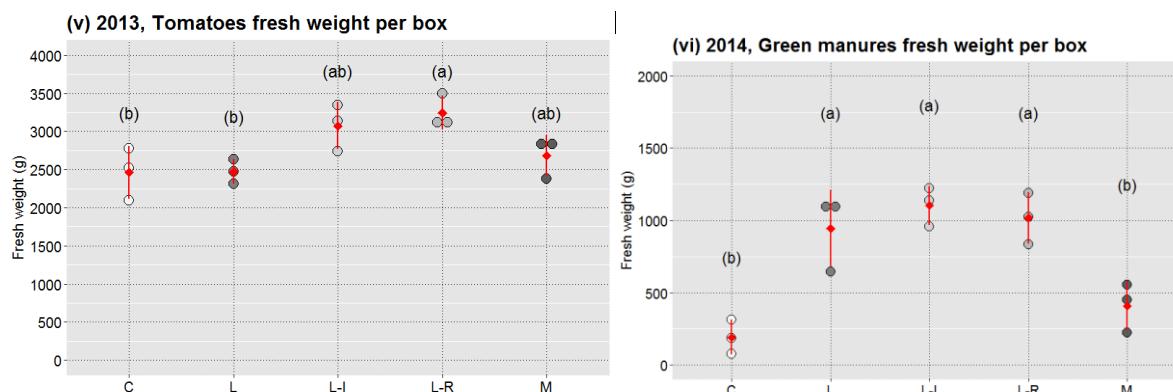


Figure 98 (i), (ii), (iii), (iv), (v) & (vi): Biomass production (edible: tomatoes and lettuce; above ground for green manures) per box during the two-year experiment T4P. On the graph different letters means significant differences; p -value < 0.05. The red dot symbolize the mean value and the red line show the standard deviation.

As **Figure 98** shows, higher yields were obtained every year for treatment L-I and L-R, which are the most diversified ones in terms of substrates and biological diversity. For green manure and tomatoes higher yields were observed in 2013 than in 2012, reaching $3.24 \text{ kg} \cdot \text{box}^{-1}$ of tomatoes for the L-R in average and $1.10 \text{ kg} \cdot \text{box}^{-1}$ of green manure in average for the L-I. The opposite situation was noted for lettuce, with higher yields in 2012 than in 2013. The lettuces weighted more than 540 g per piece for the L-R treatment.

By comparison with L-I and L-R, the control did not lead to good yields. Respectively four and six out of six harvest were significantly lower for the control than for L-I and L-R. This shows the interest of growing food on urban organic waste rather than potting soil.

Putting the different substrates in layers instead of directly mixing them seems to have a positive effect on yield. In fact, the yields were significantly higher for the L, L-I and L-R (in comparison with M) respectively for 3, 4 and 5 harvest out of six.

The inoculation of earthworm seems to have either a positive or no effect on yield. For L-I, the harvest was higher for only one harvest (and equal for 5th others). Remaining mycelium inoculation has as well either a positive or no effect on yields. Indeed, L-R showed higher yields than L, for three harvest.

II.2. Pollutant levels

Treatment	a- Cherry tomatoes				European Standard
	2012		2013		
	[Cd] ± SD	[Pb] ± SD	[Cd] ± SD	[Pb] ± SD	
	mg.kg ⁻¹ of FM	mg.kg ⁻¹ of FM	mg.kg ⁻¹ of FM	mg.kg ⁻¹ of FM	
C	0,009 ± 2,6E-04	0,005 ± 1,5E-03	0,002 ± 6,0E-05	0,03 ± 3,0E-03	0,2
L	0,002 ± 5,6E-05	0,008 ± 1,3E-03	0,003 ± 4,0E-05	0,1 ± 8,2E-03	
L-I	0,002 ± 7,9E-05	0,02 ± 8,2E-03	0,004 ± 2,3E-04	0,03 ± 2,1E-03	
L-R	0,003 ± 1,2E-04	0,01 ± 1,3E-03	0,003 ± 9,0E-05	0,03 ± 4,0E-04	
M	0,001 ± 1,02E-04	0,005 ± 8,4E-04	0,002 ± 6,4E-05	0,02 ± 2,2E-03	
Treatment	b- Lettuce				European Standard
	2012		2013		
	[Cd] ± SD	[Pb] ± SD	[Cd] ± SD	[Pb] ± SD	
	mg.kg ⁻¹ of FM	mg.kg ⁻¹ of FM	mg.kg ⁻¹ of FM	mg.kg ⁻¹ of FM	
C	0,008 ± 7,0E-04	0,05 ± 5,8E-03	0,009 ± 5E-04	0,08 ± 8,08E-03	0,3
L	0,006 ± 1,2E-03	0,04 ± 4,9E-03	0,009 ± 1,4E-04	0,04 ± 2,9E-03	
L-I	0,008 ± 4E-04	0,05 ± 4,1E-03	0,007 ± 1,4E-04	0,04 ± 2,2E-03	
L-R	0,02 ± 2,3E-03	0,06 ± 8,4E-03	0,008 ± 5,0E-04	0,05 ± 4,5E-03	
M	0,007 ± 1,1E-03	0,06 ± 2,9E-03	0,006 ± 3,5E-05	0,08 ± 9,2E-03	

Tableau 38 a and b: Cadmium and lead contents in cherry tomatoes (a) and lettuce (b) during the two-year experiment. European standard refers to the standard CE n°188-2006. FM = Fresh Matter and SD = Standard Deviation.

During the two seasons of the experiment we measured the concentration of five trace metals in the edible crops. Of these five elements, only Cadmium (Cd) and Lead (Pb) are regulated by a European standard that we take as a reference here. The content of Pb and Cd in lettuce (**Tableau 38 a & b**) and tomatoes was four to ten times lower than the European norms. Similar results were obtained for Cd and Pb levels in tomatoes: 0.001 to 0.003mg of Cd per kg and 0.005 to 0.02 mg of Pb per kg (fresh weight) to be compared with the EU limits 0.5 mg of Cd per kg and 0.1mg of Pb per kg (fresh weight). With the exception of treatment L in 2013 where the lead content was 0.11 mg.kg⁻¹, for which we have no satisfactory explanation at the moment.

The trace metal content in our parental substrate was under the applied standard in all cases (French standard NF U 44 551. Lead and cadmium concentrations were respectively 40mg.kg⁻¹ and 0.47mg.kg⁻¹

¹ in compost and 0.17mg.kg⁻¹ in potting soil. Over the two-year experiment there was no significant change in the trace metal content in any of the substrates.

III. Discussion

The difference of yields between 2012 and 2013 might be due to meteorological conditions (see **Annexe - Article Future of food - n° 3**) or to differences in substrate evolution although we have no available data yet. Note that our cropping period for tomatoes was shortened in mid-October because of green manure seedling periods. It is also noteworthy that our experimental device presents a low density of lettuce compared to professional producer's practices (five lettuces for 0.64m² against 7 to 11 for a professional producer (personal communication)).

Few studies focus on an evaluation of the potential for rooftop edible food production (Whittinghill et al. 2013)(Kortright 2001)(Orsini et al. 2014) and none focus on food production using only urban organic waste. We provide a first insight of this potential. During the two growing seasons we found three major patterns:

- Food production using urban waste (L, L-I, L-R and M in comparison of C) is significant. Indeed, in almost all harvests the potting soil was one of the less productive as well as the M. The fact that this potting soil offers the lowest yield may however be explained at least partially by the non-use of mineral fertilizer. A classical input in horticultural cropping systems ;
- The layout in lasagne beds has a positive effect (M in comparison with L, L-I and L-R) on the production, especially for L-I and L-R. One hypothesis could be made to explain this lasagne effect: the high C/N ratio of the crushed wood may immobilize all the nitrogen from the compost due to the microbial activity. It should be note that the effect was stronger on yield of lettuce and green manures compared to tomatoes so the rooting system could have an impact.
- Earthworms or coffee grounds with remaining mycelium inoculation have a mixed direct effect (positive or null) on the production level (L-I and L-R in comparison with L) and an impact on substrate evolution (i.e increase in water retention).

Our production results show the feasibility of growing food on a rooftop garden based only on local urban organic waste. Regarding the first experimental results, during the whole cropping season (April to October) and despite the limits explained above, we demonstrated good or even high levels of food, production. Thus, for L-I or L-R we produced around 4.8 to 7.5kg/m², equivalent to 48 to 75t/ha (see **Annexe - Article Future of food - n° 4**) without any fertilization other than that brought by the organic waste itself. The yields of L-I and L-R were higher than those obtained currently in “on the ground”

urban allotment garden where gardeners are cultivating mainly to produce food (Pourias 2013). This is also the case if we compare with professional open-air organic market gardens in the Parisian region: in 2012, 14 000 tons of lettuce were produced in the Parisian Region from May to October on 740 ha (i.e. with a mean yield about 20 t/ha). For tomatoes, regional data is not available but at the national level the mean yield of open air tomatoes is around 52 t.ha⁻¹ – while tomatoes cultivated in green houses reach a mean yield of about 236 t.ha⁻¹ (DRIAFF 2013)(Agreste 2013)

As presented above, we observed a strong decrease of the volume of substrate (- 10 to 15 cm after the first cropping season). This could result from a physical dynamics (compaction) or a biological one (biodegradation). This evolution contrasts with the classic behaviour of a peat-based substrate supposed to be physically stable over time. And highlights the question of the sustainability of growing substrate based on local urban waste. Especially the question of the possible (physical and/or chemical and/or biological) impediment to vegetable growth.

We designed our agro-ecological cropping system as a living ecosystem in which the resilience should increase with time. In doing so we observed the importance and benefits of greater diversity of soil fauna including higher yields. During experimental tests we measured the strong development of the epigeic species of worms (data not shown here). The focus on the specific influence and importance of biological diversity will be examined in another study. But even now, these results suggest the need to study the potential of these rooftop gardens to be an habitat for urban fauna such as arthropods (Madre et al. 2013).

Looking at a larger scale, many studies investigate ways to improve cities' resiliency and sustainability through food supply, energy, and nutrient cycles (MacRae et al. 2010)(Grewal and Grewal 2012)(Billen et al. 2008)(Orsini et al. 2014). By using urban organic waste we insert our cropping system into the urban metabolism, ensure cheap access to substrate for gardeners, and reduce the city's waste treatment costs. For instance, coffee grounds with mycelium are a residue of an urban farm producing mushrooms from a previously unprocessed waste which is very common but still largely unknown today as a potential fertilizer. As an illustration, the annual production of coffee grounds by an average Parisian café is estimated at around 4 tons (Urban Farm personal communication). But this data has to be consolidated. Other urban waste (organic and mineral) need to be tested, as it has been, to some extent, for other purposes (i.e. soil for urban trees, parks etc.) (Rokia et al. 2014)(Ostos et al. 2008). Possible optimal layout for production needs to be investigated. Apart from the advantages to use previously unvalorised urban waste, the ecosystem services potentially provided by this rooftop gardening (i.e. provisioning services such as food production or food quality or regulation services such as flood regulation, climate regulation, carbon storage etc.) and their potential optimisation need to be studied.

Cropping sequences with too short a return time of a given crop in the same location are known to be unsustainable, especially from a sanitary point of view regarding parasitic species or plant diseases. In order to avoid these problems, since March 2014 our research team choose to work on pertinent diversified cropping sequences and crops associations. Furthermore, as Boudreau (Boudreau 2013) emphasizes, the majority of our knowledge on intercropping species is empirical and there is a need of scientific work on this question.

The remaining pollutants in edible production of urban agriculture are a key aspect of its development. In their study Säumel et al. demonstrated the possible effect of urban pollution (mainly from urban soil) on urban allotment gardens crops that are likely to be contaminated by trace metals (Säumel et al. 2012). As our results indicate, it is possible to produce edible crops in a dense city like Paris, with regards to levels of trace metals. In addition we have to point out the site-specific limits of our experiment: not close to a busy road, on one of the highest roofs in the area, and no known source of pollutants close by. Further investigations are however needed including the measurement of other pollutants (especially organic pollutants). As well as the understanding of the potential correlation between the roof's altitude or proximity to a highway and pollution levels.

Conclusion

Green roofs have been studied extensively for their multiple benefits and generally consist of a thick layer of substrate with plants. There are currently 1.3 million m² of green roofs in France mostly made up of exogenous substrate generally with a sedum plant covering. In this article we propose a new kind of green roof: a productive garden which is a form of Zero-Acreage farming designed to participate in the urban metabolism, primarily through the use of local urban organic waste. This could be an opportunity for cities, urban planners and even private building owners to solve the problem of the scarcity of land in dense cities like Paris. It may also be a solution to urban soil pollution risks facilitating the creation of new urban allotment garden and satisfying urban dwellers' demand for arable land. We have stressed the food producing potential of this new cropping system as well as the possibility of using rooftops even in cities like Paris.

Throughout the first two years of the experiment we witnessed a growing interest in our research by the media as by, inter alia, architects, restaurants, and public stakeholders. Thanks to the experiment a firm called *Topager* has emerged in the Parisian region and is now a partner in the experiment. Further investigations are needed to determine the real potential of Paris and of its suburbs for such productive rooftops. Using local organic waste and considering our cropping system as a living ecosystem that should be as functional as possible, shows interesting patterns that encourage us to pursue the research

on different aspects, including the possible hurdles of such cropping systems (physical and/or chemical and/or biological); the influence and other possible biological inoculations; other urban substrates (mineral or organic) adapted to the local context; and the potential of rooftop gardening to be an habitat for urban plant and animal species. More generally, this underlines the necessity for research and quantification of the ecosystem services linked to this new type of green roof.

Climbing onto rooftops to create urban gardens is an opportunity to meet many needs of urban dwellers, and it offers new possibilities for urban planners.

Acknowledgements

This study would not have been possible without the essential support of the *AgroParisTech* scientific Council as well as the Chair Eco-conception Vinci – ParisTech and the free supply of urban waste substrates by two companies, *BioYvelinesService* for green compost and crushed wood, and *UpCycle®* for coffee grounds with mycelium. The whole team sincerely thanks them for their valuable participation. The authors also thanks the students that perform their internship on the experiment T4P and gave an essential daily help to maintain and monitor the experiment: Marie Garin, Noémie Burq, Sibylle Paris, Elisa Petit, Clémentine Jeanneteau and Antoine Juvin.

Supplementary materials – Article “Recycling urban waste as possible use for rooftop vegetable garden

Annexe - Article Future of food - n° 1 - Description of the partner of the experiment T4P
BioYvelinesServices (<http://www.bioyvelines.fr/>) is a social-integration firm working for the valorization of green waste from the municipality of Versailles.

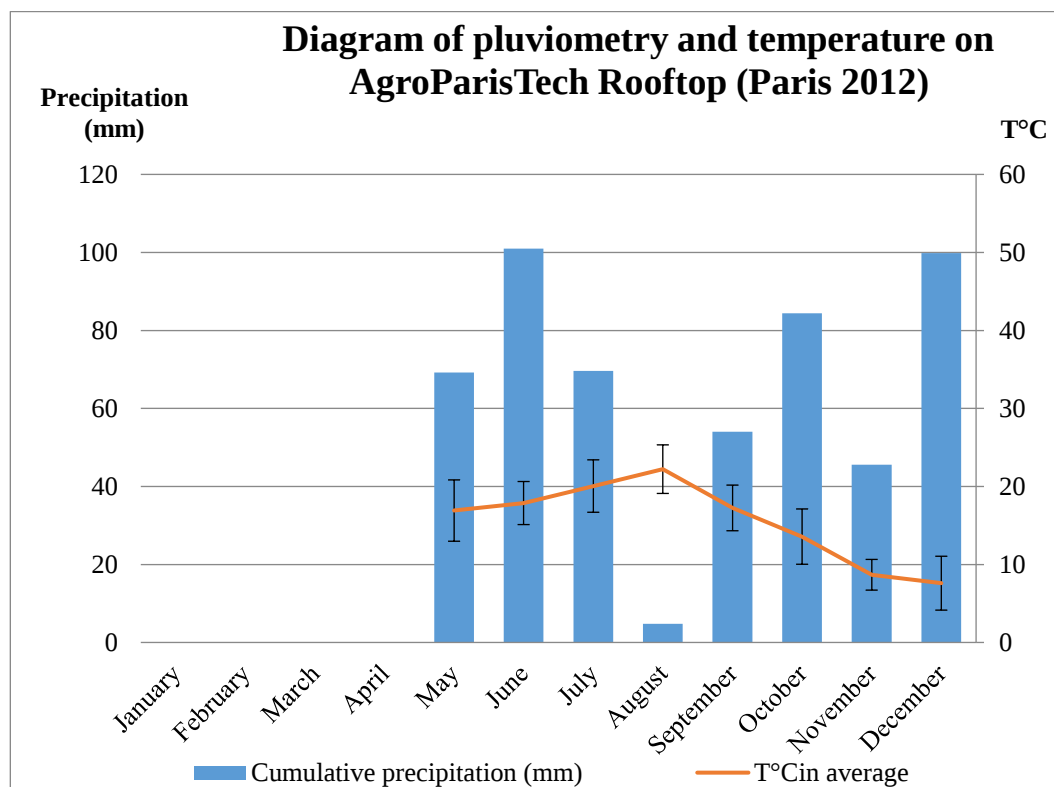
UpCycle (<http://www.laboiteachampignons.com/upcycle/>) is a new and innovative urban farm that produces mushrooms (*Pleurotus Ostreatus* mainly) on coffee grounds for selling to gourmet restaurants. The firm operates in a social and solidarity economy involving disabled persons in the production cycle.

Annexe - Article Future of food - n° 2 - Potting soil composition

Potting soil “Terre à planter” Or brun brand.

Composition: Topsoil, blond sphagnum peat moss, composted bark, brown peat, horse manure and composted seaweed.

Annexe - Article Future of food - n° 3 - Meteorological condition for almost the entire two growing seasons



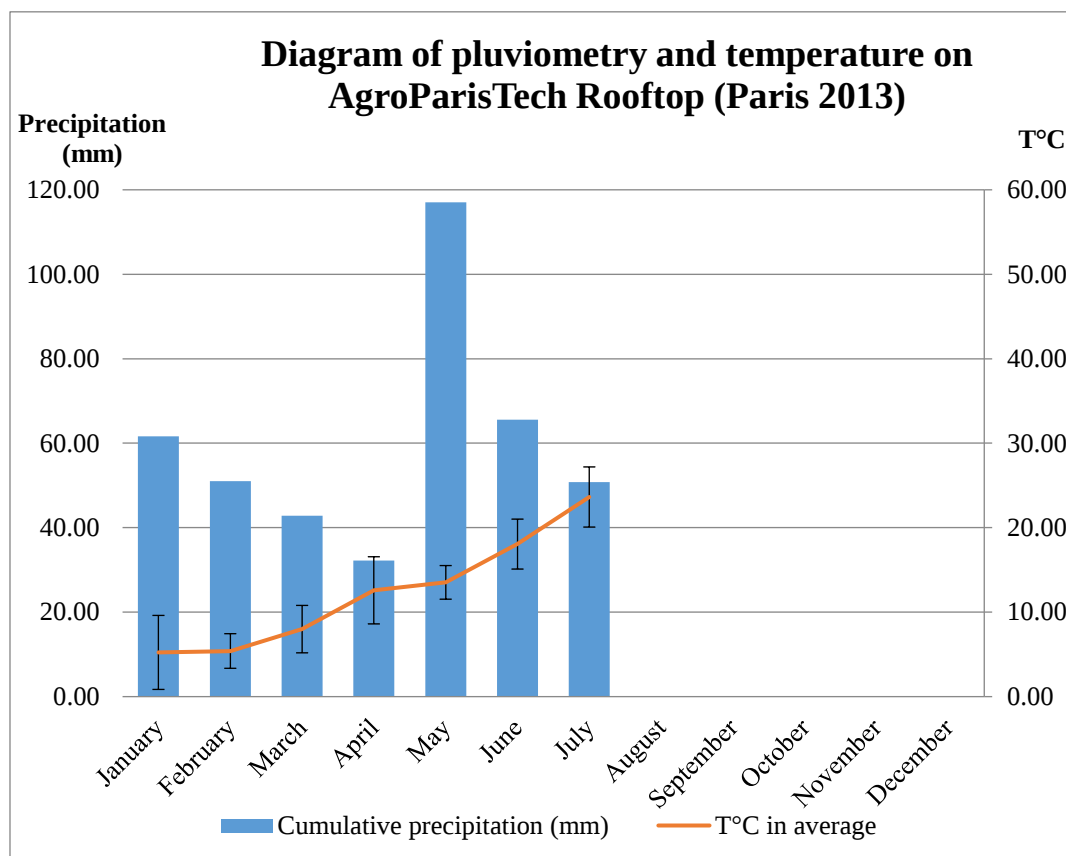


Figure 99 : Rain and temperature for almost the entire two growing seasons. Unfortunately, the data are not complete due to a problem with the meteorological stations on the roof.

Annexe - Article Future of food - n° 4 - P-value from the ANOVA comparing the biomass production of each treatment

	T1	T2	T3	T4
C	0.38	0.00010	0.00092	0.84
T1	p-value	0.00093	0.013	0.90120
T2		p-value	0.38	0.00031
T3			p-value	0.0037
Comparison of yield per box of green manures per treatment in 2013				

	T1	T2	T3	T4
C	0.0031	0.0007	0.0016	0.59
T1	p-value	0.81	0.99	0.029
T2		p-value	0.97	0.006
T3			p-value	0.013
Comparison of yield per box of green manures per treatment in 2014				

	T1	T2	T3	T4
C	0.020	0.0035	0.000001	0.00045
T1	p-value	0.7626363	0.000026	0.12
T2		p-value	0.000088	0.55
T3			p-value	0.0005
Comparison of yield per box of tomatoes per treatment in 2012				

	T1	T2	T3	T4
C	1.00	0.11	0.03	0.85
T1	p-value	0.11	0.03	0.87
T2		p-value	0.93	0.42
T3			p-value	0.15
Comparison of yield per box of tomatoes per treatment in 2013				

	T1	T2	T3	T4
C	0.63	0.50	0.008	0.12
T1	p-value	1.00	0.071	0.014
T2		p-value	0.10	0.010
T3			p-value	0.00023
Comparison of yield per box of lettuce per treatment in 2012				

	T1	T2	T3	T4
C	0.19	0.040	0.23	0.35
T1	p-value	0.84	1.00	0.0095
T2		p-value	0.78	0.0022
T3			p-value	0.012
Comparison of yield per box of lettuce per treatment in 2013				

Tableau 39 : p-values from the statistical analysis of the biomass production during the two growing seasons

Annexe - Article Future of food - n° 5 - Fresh extrapolate weight for the first crop sequence during the two growing seasons

Treatment	Green manure ± SD		Lettuce ± SD		Tomatoes ± SD	
	kg.m ⁻²		kg.m ⁻²		kg.m ⁻²	
	2013	2014	2012	2013	2012	2013
C	0.13 ± 0.04	0.3 ± 0.19	1.85 ± 0.39	1.38 ± 0.91	0.87 ± 0.08	3.8 ± 0.11
T1	0.28 ± 0.1	1.48 ± 0.41	2.61 ± 0.33	2.29 ± 0.51	1.78 ± 0.09	3.86 ± 0.12
T2	0.75 ± 0.17	1.72 ± 0.21	2.74 ± 0.25	2.67 ± 0.4	2.06 ± 0.12	4.8 ± 0.12
T3	0.6 ± 0.07	1.59 ± 0.28	4.28 ± 0.33	2.23 ± 0.5	3.94 ± 0.33	5.07 ± 0.16
T4	0.21 ± 0.04	0.64 ± 0.26	0.38 ± 0.32	0.63 ± 0.26	2.42 ± 0.18	4.19 ± 0.12

Tableau 40 : Projected production for the cropping season 2012-2013 and 2013-2014. S-D: standard deviation

Titre : Des Technosols construits à partir de produits résiduaux urbains : services écosystémiques fournis et évolution.

Mots clés : Agriculture Urbaine, Technosol, Toiture végétalisée, Service écosystémique, Produit résiduaire urbain, Matière organique.

Résumé : Les villes ne cessent de se densifier au détriment des espaces de nature qui corrélativement se réduisent, tout comme les services écosystémiques qui leur sont associés. Face à ce constat, la végétalisation du bâti apparaît comme une alternative indispensable. Dans ce cadre, les toitures végétalisées font partie des outils d'aménagement des villes qui sont en pleine expansion. Ces toitures revêtent différentes formes, s'adaptant aux contraintes et enjeux urbains. Depuis quelques années, une nouvelle forme de toiture végétalisée a émergé : les toitures végétalisées productives (e.g. de biomasse alimentaire). Encore peu développée et mal connue, l'intérêt concernant cette forme de toiture ne cesse de croître. Leur conception, leur aménagement et surtout les services écosystémiques qu'elles peuvent rendre sont aujourd'hui encore mal connus et nécessitent d'être mieux appréhendés. Clé de voûte des toitures végétalisées, le sol en place influence directement et indirectement les services écosystémiques rendus par celles-ci. En dépit du rôle majeur de ces sols, peu d'études leur sont consacrées. Par ailleurs, des produits non renouvelables tels que la pouzzolane, l'argile expansée ou la tourbe sont aujourd'hui très majoritairement utilisés dans leur composition.

Nous avons étudié des Technosols, c'est à dire des sols reconstitués, de toitures productives composés uniquement de produits issus de résidus du milieu urbain. Ce travail a eu une double ambition : (i) évaluer quantitativement les services écosystémiques rendus et (ii) comprendre les premières phases d'évolution des Technosols. Pour cela, trois dispositifs expérimentaux, installés sur la toiture « Bertrand Ney » de l'école AgroParisTech ont été utilisés.

Il s'agit de bacs de cultures dans lesquels des sols sont construits, avec des agencements divers de cinq résidus urbains :

un compost de déchet vert, du bois broyé, de la brique et de la tuile concassée, un résidu de champignonnière et un compost de biodéchet. Nous avons étudié l'effet des différents types de Technosols construits sur (i) les services écosystémiques rendus, (ii) la production alimentaire (quantitative et qualitative), (iii) la fertilité physico-chimique et (iv) leur évolution temporelle.

Les Technosols construits sont fertiles et permettent une production alimentaire conséquente sur une à cinq années, caractérisée par de faibles teneurs en éléments traces métalliques équivalentes à celles de la moyenne des productions maraîchères. L'évaluation quantitative de services écosystémiques (production alimentaire, recyclage de résidus urbain, rétention des eaux de pluies et qualité des eaux de percolations (C et N), a souligné le caractère multifonctionnel des systèmes étudiés et met en évidence un disservice, qui est une altération de la qualité des eaux de percolation par lixiviation du carbone, pouvant être liée à celle d'autres éléments. Une première phase de pédogénèse rapide et intense est observée, marquée par une forte biodégradation des matériaux et une forte lixiviation. Nos travaux ont mis en évidence l'existence d'un double compromis dans la conception d'un Technosol productif, entre (1) la biodégradation des matériaux (assurant la fourniture des nutriments minéraux aux plantes) et le maintien de la structure et porosité du matériau, donc de sa fertilité physique d'une part et entre (2) la fourniture d'éléments nutritifs par biodégradation et la lixiviation, se traduisant par une perte de ces éléments et une altération de la qualité des eaux de percolation d'autre part. La connaissance des propriétés des matériaux utilisés et de ses liens avec les services écosystémiques attendus permet déjà de concevoir des toitures productives multifonctionnelles à partir de résidus urbains et de les gérer de manière durable.

Titre : Productive Technosol made of urban waste : delivered ecosystem services and evolution.

Keywords : Urban Agriculture, Technosol, Green roof, Ecosystem Services, Urban waste, organic matter.

Abstract : Cities are becoming denser at the expense of nature spaces that are correspondingly decreasing, as are the ecosystem services associated with them. Faced with this observation, the greening of buildings appears as a valuable alternative.

Nowadays, green roofs have become a planning tool in urban planning. These roofs take different forms, adapting to urban constraints and challenges. In recent years, a new form of green roof has emerged: productive green roofs (i.e. of edible biomass). Despite a growing interest, rooftop farming is still poorly developed and known. Their design, their development and especially, the ecosystem services they could deliver are still poorly understood and need to be known. Keystone to green roofs, the soil in place directly and indirectly influences the provided ecosystem services. Despite, it's key role, soil is still poorly studied. Furthermore, non-renewable products such as pozzolan or expanded clay or peat are today mostly used in their composition.

In this work we have studied constructed soils, named Technosols, for productive roofs made only of urban wastes. The objectives of this thesis were: (i) to achieve a quantitative assessment of delivered ecosystem services (ii) analyze the first stages of Technosol pedogenesis. In order to do so, three experimental devices were implemented on the "Bertrand Ney" rooftop of the technical University AgroParisTech in Paris. The experimental devices consist of multiple plots filled with different disposal of five urban wastes: green waste compost, shredded woods, crushed tiles and bricks, spent

coffee grounds used to grow mushroom and a biowaste compost.

The impact of the different Technosols on (i) ecosystem services, (ii) food production (quality and quantity), (iii) fertility) and (iv) temporal evolution, were assessed.

Constructed Technosol are fertile and allow a consistent food production over one to five years. The level of food production was equivalent to that of a professional producer and food quality regarding trace metal element was below existing norms. The quantitative assessment of ecosystem services (food production, urban waste recycling, rainwater retention and overflow quality (C and N)), highlighted the multifunctional nature of productive green roofs. However, we identified an ecosystem disservice which is an alteration in the quality of the leachates due to carbon leaching and presumably other elements. A first phase of rapid and strong pedogenesis was observed marked by an intense biodegradation and lixiviation of the Technosols. Our works identified two trade-offs in the design of a productive Technosol: between (i) the biodegradation or organic materials (ensuring the supply of mineral nutrient to plants) and the maintenance of the structure and porosity of the Technosol (i.e. its physical fertility) and (ii) the supply of nutrients by biodegradation and leaching, resulting in a loss of these elements and an alteration of the quality of percolation waters on the other hand. Knowledge of the properties of the materials used to build Technosols and on their link with the expected ecosystem services already makes it possible to design multifunctional productive rooftop based on urban waste and manage them sustainably.

