Matériaux urbains issus de l'économie circulaire : vers des substrats innovants ?

Laura Bessouat

▶ **To cite this version:**

Laura Bessouat. Matériaux urbains issus de l'économie circulaire : vers des substrats innovants ?. Sciences du Vivant [q-bio]. 2018. dumas-01920508

HAL Id: dumas-01920508

https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-01920508

Submitted on 13 Nov 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.

Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License

AGROCAMPUS OUEST

☑ **CFR Angers**

☐ **CFR Rennes**

Année universitaire : 2017-2018

Spécialité : Paysage

Spécialisation : IEVU

Ingénierie des espaces végétalisés urbains

Option IVU

Mémoire de Fin d'Études

☑ d'Ingénieur de l'Institut Supérieur des Sciences agronomiques, agroalimentaires, horticoles et du paysage

☐ de Master de l'Institut Supérieur des Sciences agronomiques, agroalimentaires, horticoles et du paysage

☐ d'un autre établissement (étudiant arrivé en M2)

Matériaux urbains issus de l'économie circulaire : vers des substrats innovants ?

Par : Laura BESSOUAT

Soutenu à : Agro Campus Ouest Angers
le 14 septembre 2018

Devant le jury composé de :

Président : Jean-Charles Michel

Maître de stage : Elise Sorin

Enseignant référent : Laure Vidal-Beaudet

Autres membres du jury :

Claire Grosbellet , responsable recherche et développement - entreprise Florentaise

Les analyses et les conclusions de ce travail d'étudiant n'engagent que la responsabilité de son auteur et non celle d'AGROCAMPUS OUEST

Ce document est soumis aux conditions d'utilisation
«Paternité-Pas d'Utilisation Commerciale-Pas de Modification 4.0 France»
disponible en ligne http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.fr

Confidentialité

☑ Non ☐ Oui si oui : ☐ 1 an ☐ 5 ans ☐ 10 ans

Pendant toute la durée de confidentialité, aucune diffusion du mémoire n'est possible [1].

Date et signature du maître de stage [2] :

A la fin de la période de confidentialité, sa diffusion est soumise aux règles ci-dessous (droits d'auteur et autorisation de diffusion par l'enseignant à renseigner).

Droits d'auteur

L'auteur[3] **BESSOUAT Laura**

autorise la diffusion de son travail (immédiatement ou à la fin de la période de confidentialité)

☑ Oui ☐ Non

Si oui, il autorise

☐ la diffusion papier du mémoire uniquement(4)

☐ la diffusion papier du mémoire et la diffusion électronique du résumé

☑ la diffusion papier et électronique du mémoire (joindre dans ce cas la fiche de conformité du mémoire numérique et le contrat de diffusion)

(Facultatif) ☑ accepte de placer son mémoire sous licence Creative commons CC-By-Nc-Nd (voir Guide du mémoire Chap 1.4 page 6)

Date et signature de l'auteur :

Autorisation de diffusion par le responsable de spécialisation ou son représentant

L'enseignant juge le mémoire de qualité suffisante pour être diffusé (immédiatement ou à la fin de la période de confidentialité)

☐ Oui ☐ Non

Si non, seul le titre du mémoire apparaîtra dans les bases de données.

Si oui, il autorise

☐ la diffusion papier du mémoire uniquement(4)

☐ la diffusion papier du mémoire et la diffusion électronique du résumé

☐ la diffusion papier et électronique du mémoire

Date et signature de l'enseignant :

(1) L'administration, les enseignants et les différents services de documentation d'AGROCAMPUS OUEST s'engagent à respecter cette confidentialité.

(2) Signature et cachet de l'organisme

(3).Auteur = étudiant qui réalise son mémoire de fin

RAPPORT INTERMÉDIAIRE PAS DIFFUSER

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier l'institut technique de l'horticulture ASTREDHOR de m'avoir donné l'opportunité de réaliser ce stage, au sein de la station d'expérimentation AREXHOR Seine-Manche de Saint-Germain-en-Laye.

Merci à Guillaume Morel-Chevillet, de m'avoir permis de traiter ce sujet passionnant, et de ses conseils avisés lors de mes sollicitations.

Mes pensées vont tout particulièrement vers l'équipe de la station ASTREDHOR de Saint-Germain-en-Laye, je tiens à remercier :
Elias, pour son attention sans faille sur mes goutteurs, mais aussi son sourire et sa bienveillance,
Gabin, pour ses innombrables coups de pouce, sur le terrain, comme en dehors,
Bodo, qui sans le savoir nous a accompagnés pendant quelques mois,
enfin, un grand merci à Elise, pour ses heures d'écoute attentive, son regard toujours pertinent sur mon travail, et ses relectures minutieuses.

Je tiens également à remercier les membres du comité de pilotage du projet Techn'AU, pour leurs conseils et leurs avis critiques.

Merci à tous les partenaires et fournisseurs, qui ont permis la mise en œuvre de cet essai, et m'ont aussi beaucoup appris durant ces six mois.

Je remercie l'équipe enseignante d'AgroCampusOuest de m'avoir accompagnée tout au long de ma formation, ainsi que Madame Vidal Beaudet, responsable de notre spécialisation, toujours à l'écoute et réactive.

Enfin, merci à Corinne, pour sa lutte sans relâche contre mon orthographe désastreuse, et à Solange pour ses relectures et l'intérêt porté à ces travaux.

RAPPORT INTERMEDIAIRE - NE PAS DIFFUSER

TABLE DES MATIERES

1. INTRODUCTION 1
1.1 La gestion des déchets, une problématique cruciale en zone urbaine 1
1.1.1 Laville, génératrice de produits résiduaires 1
1.1.2 La ville, en recherche de solution pour la gestion de ses déchets 2
1.2 Le compostage urbain, une solution pour la gestion des déchets organiques 3
1.2.1 L'essor du compostage en ville 3
1.2.2 L'émergence d'un compostage professionnel de proximité 4
1.3 Le support de culture, recherche d'une approche plus durable 5
1.3.1 Le support de culture, marché actuel 5
1.3.2 L'AU professionnelle, une nouvelle conception du support de culture 6
1.4 Les solutions alternatives pour le support des plantes, état des lieux des recherches 7
1.5 Contexte de l'étude 8
1.5.1 Organisme d'accueil et projet de recherche 8
1.5.2 Objectifs, problématique et hypothèses de travail 8
2. DEMARCHE EXPERIMENTALE 9
2.1 Méthodologie de sélection des matériaux 9
2.2 Matériel 9
2.2.1 Facteur étudié : le substrat 9
2.2.2 Le matériel végétal : 10
2.3 L'expérimentation 10
2.3.1 Caractéristiques du site 10
2.3.2 Dispositif expérimental 11
2.4 Méthode d'évaluation des substrats 12
2.4.1 Qualité sanitaire – innocuité 12
2.4.2 Qualités agronomiques 12
2.4.3 Critères d'évaluation socio-économique 15
3. PRESENTATION ET ANALYSE DES RESULTATS 16
3.1 Caractérisation physico-chimique des substrats 16
3.1.1 Caractérisation physique 16
3.1.2 Caractérisation chimique 21
3.1.3 Caractérisation biologique 24
3.2 Evaluation du potentiel productif 25
3.2.1 Cinétique de développement 25
3.2.2 Evaluation de la production 26

RAPPORT INTERMEDIAIRE - NE PAS DIFFUSER

3.3 Evaluation des substrats in-situ – aspects pratiques 29
3.3.1 Conception des mélanges 29
3.3.2 Sensibilité aux ravageurs 29
3.3.3 Développement des adventices 29
3.4 Evaluation technico-socio-économique des substrats 30
3.4.1 Niveau de participation à une dynamique d'économie circulaire 30
3.4.2 Potentiel filaire 30
4. DISCUSSION 31
4.1 Les substrats construits à partir de produits résiduaires – contraintes et atouts 31
4.1.1 L'utilisation de déchets de construction 31
4.1.2 L'utilisation de composts 31
4.2 Les divers types de composts urbains –C1S1/C2S1/C3S1 33
4.2.1 Compost de déchets verts et apport des résidus de champignonnière 33
4.2.2 Compost de déchets verts et déchets alimentaires – C2S1/C3S1 33
4.3 Le lombricompost face au compost – C3S1/LC2S1 35
4.4 L'utilisation de déjections animales 36
4.5 L'agent structurant – quel intérêt ? de quelle nature ? 37
4.5.1 La nécessité d'ajouter un matériau structurant au mélange 37
4.5.2 L'emploi de compost seul 38
4.6 Synthèse 39
5. CONCLUSION 39
6. BIBLIOGRAPHIE ET SITOGRAPHIE 41

RAPPORT INTERMÉDIAIRE - NE PAS DIFFUSER

LISTE DES ILLUSTRATIONS

Fig. 1 - Production de déchets par activité économique en 2012 - Source : (ADEME, 2016)–données Eurostat RSD 1
Fig. 2 - Répartition des OMR en France en 2007 – Source (Compostplus, 2016) Campagne Modecom 2007 – ADEME 1
Fig. 3 – Schéma présentant les débouchés possibles pour les composts urbains. En encadré, l'objet de cette étude, présenté ci-après. 4
Fig. 4 - Données météorologiques (précipitations et T°) en fonction des semaines de culture. 10
Fig. 5 - Caractérisation des capacités de rétention en eau et en air des substrats issus de résidus urbains. Limites en traits continus fixées d'après (Michel,2014) 16
Fig. 6 - Dispositif de récupération des eaux. L.B le 25/08/18 à St-Germain-en-Laye 16
Fig. 7 - Niveaux de rétention en eau mesurés in-situ, confrontés aux valeurs de disponibilité en eau fournies par les analyses laboratoires. 17
Fig. 8 - Comparaison des volumes d'eau perdus en cours de culture. Axe de gauche : les volumes percolés en S1 et une moyenne des volumes mesurés durant les 12 semaines. Axe de droite : volumes totaux perdus, signalés par une barre. Tests statistiques : Shapiro-Wilk test : p-value =0.12 - Bartlett test : p-value =0.88 - Fisher test : p-value : 0.035. 17
Fig. 9 - Systèmes racinaires en fin de culture. De gauche à droite : C3S1, LC1S1, T. Photographie : L.B le 20/08/18 à St-Germain-en-Laye 18
Fig. 10 – Photographie des systèmes racinaires de tomates de C2S1 en bas et T en haut. L.B le 20/08/18 à St-Germain-en-Laye 18
Fig. 11 - Cinétiques de réhydratation des substrats à la suite d'un fort épisode de dessèchement (taux d'humidité initial 30%), représentées par les courbes en trait plein. Droites en pointillés : capacité maximale de rétention des substrats. 19
Fig.12 - Axe principal : Masses moyennes du système [pot + végétaux] en fin de culture, conduit sur une répétition (n=3)Axe secondaire : Données de masse volumique apparente sèche obtenues en laboratoire sur des échantillons pris à t=0.Tests statistiques : Shapiro-Wilk : p-value= 0.001 – Bartlett : p-value=0.06 - Kruskal-Wallis p-value = 0.006 20
Fig. 13–Teneurs en éléments majeurs NPK dans les substrats (sur MS). Test statistiques : Fisher : N p_{value} = 3.36e-11/P p_{value} = 4.19e-16/K p_{value} = 9.97e-11 21
Fig. 14 – Teneurs en azote sous ses diverses formes dans les substrats. 22
Fig. 15 – Evolution des paramètres chimiques des effluents de percolations générés par les substrats au cours du temps. (A) Valeurs de pH ; (B) Valeurs d'électro conductivité ; (C) Teneurs en nitrates .. 23
Fig. 16 - Cinétique de croissance des tomates. (B) Zoom sur les dernières valeurs de mesures. Tests statistiques pour la S12 : Shapiro-Wilk test : p-value =0.44 - Bartlett test : p-value =0.51 - Fisher test : p-value : 6.28e-06 25
Fig. 17 - Cinétique de croissance des basilics durant 12 semaines de culture. Note : les points de mesure pris après les tailles n'apparaissent pas sur ce graphique. 25
Fig. 18 - Compilation de photographies permettant d'apprécier le développement végétatif des plantes via le critère recouvrement (clichés des semaines 1,2,4,5 et 6). Sur la ligne du haut, la modalité C1S1, en bas C3S2. 26
Fig. 19 - Production totale de tomates cerises en 12 semaines, par unité expérimentale. Tests statistiques : Kruskal-Wallis test : p_{value} =0.0027 -Post-hoc Nemenyi test pour la formation des groupes (détails en ANNE IX). 26
Fig. 20- Cinétique d'évolution de la production de tomates sur 13semaines, suivant les modalités de substrats. 27
Fig. 21 - Productivité moyenne par unité expérimentale, en 12 semaines, suivant deux critères : la masse totale de la production (aplats de couleurs) et le nombre total de fruits produits (pointillés). 27
Fig. 22 – Représentation graphique des résultats de calibrage des tomates. Voir détail des catégories en ANNEXE VI 28

RAPPORT INTERMEDIAIRE - NE PAS DIFFUSER

Fig. 23 – Défaut de mûrissement sur tomates de la modalité témoin. LB le 08/08/18 à St-Germain-en-Laye 28
Fig. 24 - Masses totales cumulées de récolte de basilics sur 4 récoltes (en MF). Tests statistiques : Hypothèses du modèle linéaire non vérifiées. Kruskal-Wallis test p-value = 2.191e-05, puis test post-hoc de Nemenyi..... 28
Fig. 25 -Synthèse des niveaux de productivités totaux des mélanges mis à l'essai, pour les deux espèces mises en culture 32

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 - Calendrier d'irrigation mis en œuvre au cours des 12 premières semaines de culture..... 11
Tableau 2 - Tableau récapitulatif des critères de disponibilité des matériaux parentaux (prix et volumes disponibles) 30
Tableau 3 - Effets de l'intégration de 2 agents structurants différents au compost C3. Pour chaque paramètre sont indiqués les différences entre les valeurs moyennes obtenues pour les modalités C3S1 et C3S2 par rapport à C3 (n=3). 37
Tableau 4 - Classement des substrats selon des critères agronomiques et non agronomiques 39

GLOSSAIRE

- Agriculture Urbaine : consiste à cultiver des plantes et à élever des animaux à l'intérieur et aux alentours des villes. Elle fournit des produits alimentaires de divers types de cultures, des animaux ainsi que des produits non alimentaires. Elle comprend la sylviculture pour la production de fruits et de bois de feu ainsi que l'agroforesterie et l'aquaculture à petite échelle.
  Les produits de l'agriculture urbaine sont consommés par les producteurs ou vendus sur des marchés urbains.
- Compostage : procédé de transformation aérobie (contrairement à la méthanisation qui est une réaction anaérobie) de matières fermentescibles dans des conditions contrôlées. Il permet l'obtention d'une matière fertilisante stabilisée riche en composés humiques, le **compost.**
- Déchet inerte : déchet qui ne se décompose pas, ne brûle pas, ne produit aucune réaction physico-chimique et ne détériore pas d'autres matières de manière préjudiciable à l'environnement ou à l'humain (ADEME, 2011).
- Matière organique : ensemble des composés carbonés issus d'organismes vivants et déposés ou incorporés à la surface terrestre.
- Microfermes urbaines : fermes urbaines qui mettent sur le marché des denrées alimentaires qu'elles produisent, et offrent une diversité d'activités permettant de rémunérer au moins un salarié. Ce sont souvent des structures associatives.
- Ordures Ménagères Résiduelles (OMR) : déchets ménagers et assimilés qui restent après collectes sélectives ou apport en déchèterie. Elles concernent les foyers mais aussi les producteurs de petits volumes.
- Technosol : 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 (processus ou substances créés par la technologie humaine)
- Tourbe : matière spongieuse résultant de la fossilisation de matières organiques d'origine essentiellement végétale, sous l'action de micro-organismes, dans des milieux saturés en eau. Son processus de formation se compte en milliers d'années.
- Traitement-Mécano-Biologique. Mode de traitement largement décrié quant à la qualité des composts produits.

RAPPORT INTERMÉDIAIRE NE PAS DIFFUSER

LISTE DES ACRONYMES

ADEME : Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie

AU : Agricultures Urbaines

CEC : capacité d'échange cationique

DA : Déchets alimentaires

DV : Déchets végétaux

EC : Electroconductivité

ETM : Elément Trace Métallique

HAP : Hydrocarbures aromatiques polycycliques

ITOM : Installation de Traitement d'Ordures Ménagères

MO : Matière Organique

MS : Matière Sèche

MVap : Masse Volumique Apparente

OMR : Ordures Ménagères Résiduelles

SERAIL : Station d'Expérimentation et d'Information Rhône-Alpes Légumes

TMB : Traitement-Mécano-Biologique

Modalité	Composition
C1S1	60 % compost de DV
	20% de résidus de champignonnière
	20% de béton cellulaire
C2S1	80 % compost de biodéchets intra-urbain
	20% de béton cellulaire
C3	100% compost de biodéchets urbain
C3S1	80 % compost de biodéchets urbain
	20% de béton cellulaire
C3S2	80 % compost de biodéchets urbain
	20% de bois fragmenté
LC1S1	80 % de lombricompost de fumiers
	20% de béton cellulaire
LC2S1	80 % de lombricompost de biodéchets urbain
	20% de béton cellulaire
T	100% substrat horticole fertilisé avec en engrais à libération lente : Osmocote exact Hi end 8/9 mois ;

RAPPORT INTERMEDIAIRE - NE PAS DIFFUSER

1. INTRODUCTION

1.1 La gestion des déchets, une problématique cruciale en zone urbaine

1.1.1 Laville, génératrice de produits résiduaires

Les grands centres urbains actuels concentrent les populations, leurs activités mais aussi leurs rejets. Le mode de consommation des métropoles occidentales du XX^{ème} siècle a créé un modèle qui accroît la pression sur les ressources, intensifie et linéarise les flux de matières. En effet, la ville prélève et importe la majeure partie des ressources qui lui sont nécessaires, les consomme puis les exporte hors des centres urbains, sous des formes difficilement assimilables par l'environnement. Cette combinaison épuisement des ressources en amont - accumulation des rejets en aval, entraîne de graves dysfonctionnements environnementaux (Barles, 2010).

Depuis l'année 2008, plus de la moitié de la population mondiale est citadine (Rosenberg et al., 2016) et vit donc selon ce modèle, un chiffre qui devrait s'élever à 80 % en 2050 selon l'OMS.

La masse de déchets générée par les villes explose. Plus d'un million de tonnes de rejets collectés à Paris en 2016 (Mairie de Paris, 2017), soit 6 T/hab/an[1](Barles, 2010), leur gestion et leur traitement font naître de sérieuses problématiques environnementales, économiques mais aussi sociales.

Quels sont les déchets que nous accumulons ?

- Echelle nationale

A l'échelle du pays, le secteur du BTP est de loin le premier générateur de déchets (Fig. 1). Il s'agit à 80% de déchets inertes[2], c'est-à-dire des déchets minéraux du type béton, tuiles et briques, agrégats d'enrobés, déblais, vitrage.
L'expansion des villes, avec tout ce qu'elle implique de construction de bâti, réseaux et infrastructures, en est l'une des causes.

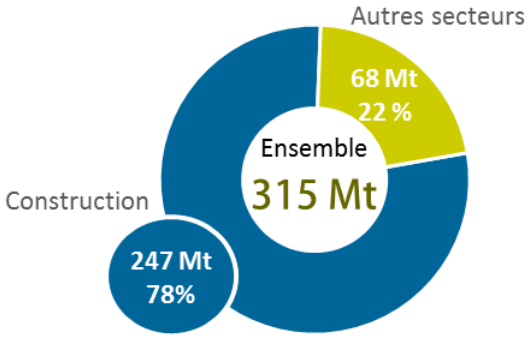


Fig. 1 - Production de déchets par activité économique en 2012 - Source : (ADEME, 2016)–données Eurostat RSD

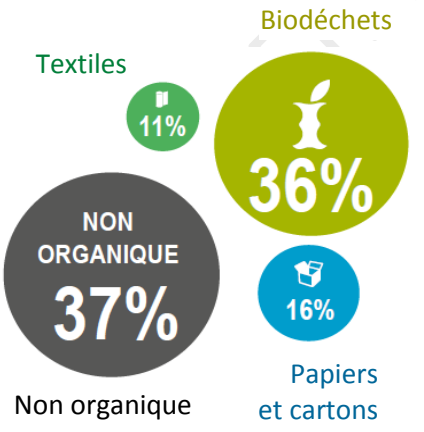


Fig. 2 - Répartition des OMR en France en 2007 – Source (Compostplus, 2016) Campagne Modecom 2007 – ADEME

- Echelle individuelle

En France, les Ordures Ménagères Résiduelles (OMR)[3] sont constituées à 36 % de matières organiques ou biodéchets (Fig. 2). Ce terme rassemble les « déchets végétaux (DV) de parcs et jardins, les déchets alimentaires (DA) et autres restes de cuisine générés par le milieu de la restauration, les magasins de vente au détail, les particuliers ou le secteur de la transformation alimentaire (*Code de l'environnement - Article L541-14-1*, 2017). Les déchets alimentaires représentent près du tiers de ce volume. Une proportion plus importante dans les centres urbains où la consommation est accrue et les possibilités de gestion domestique (compostage au jardin, alimentation animale) limitées. En cinquante ans, la poubelle des ménages Parisiens aurait doublé de volume (Mairie de Paris, 2017).

[1] Les 6 T/hab/an annoncées incluent des déchets solides, liquides et gazeux
[2] Déchet inerte : déchet qui ne se décompose pas, ne brûle pas, ne produit aucune réaction physico-chimique et ne détériore pas d'autres matières de manière préjudiciable à l'environnement ou à l'humain (ADEME 2011).
[3] Les Ordures Ménagères Résiduelles (OMR) sont les déchets ménagers et assimilés qui restent après collectes sélectives ou apport en déchèterie. Elles concernent les foyers mais aussi les producteurs de petits volumes.

RAPPORT IMMEDIAT NE PAS DIFFUSER

1.1.2 La ville, en recherche de solution pour la gestion de ses déchets

1.1.2.1 L'Economie circulaire (EC), d'une logique déchet vers une logique produit

Les villes apparaissent comme des parasites, des systèmes non durables. Quelle(s) solution(s) ? L'urbaniste Sabine Barles préconise « d'identifier les excrétas qui pourraient constituer non plus des déchets mais des matières premières dont la valorisation permettrait de diminuer non seulement les rejets mais aussi la pression sur les ressources ». Cette logique s'inscrit dans le concept de l'Economie circulaire (EC), défini par (Cooper, 1999) comme l'ensemble des «activités visant à réduire, réutiliser, recycler les matériaux lors de la production, de la distribution et de l'utilisation ».

La ville de Paris s'engage dans cette voie, en créant en 2013 le comité francilien de l'économie circulaire. En 2015, elle signe le Pacte du Grand Paris pour l'économie circulaire et se dote d'une «Charte des événements éco-responsables» (Ville de Paris, 2018).

1.1.2.2 Politiques publiques de gestion des déchets

La Loi relative à la transition énergétique pour la croissance verte (LTECV) publiée au Journal Officiel du 18 août 2015, aborde l'enjeu du traitement des déchets au travers d'un plan d'action fixant des objectifs ambitieux à l'échéance 2025 : la France devra notamment « réduire de 50 % les déchets admis en installations de stockage, **orienter 65 % des déchets** non dangereux inertes vers **des filières de valorisation organique**, **recycler 70 % des déchets du BTP** et enfin réduire de 10 % les déchets ménagers» (Parlement, 2015). Dans ce but, des réglementations spécifiques instaurées :
- dans le secteur du BTP, conformément aux exigences Code de l'environnement*(Article L541-14-1, 2017)* , la région Île-de-France a élaboré son« plan régional de prévention et de gestion des déchets issus des chantiers du bâtiment et des travaux publics » (PREDEC), afin de coordonner les actions.
- pour les matières organiques, la Directive-Cadre européenne sur les déchets (art 22) du 19 novembre 2008, amorce la mise en place du tri à la source. A l'échelle nationale, deux lois en sont l'application :
La loi Grenelle II (art 204) de 2010 qui vise les producteurs de plus de 10T de bio déchets/an, les obligeant à trier séparément les résidus organiques et à en assurer le retour au sol
La LTECV qui vise les particuliers et les collectivités, avec pour objectif l'équipement progressif des professionnels et de tous les citoyens en solution(s) de collecte séparée.
A l'échelle de la ville, depuis plusieurs années, Paris met en place des plans de prévention des déchets[4]et nombre d'autres initiatives[5] visant à promouvoir une gestion plus écologique des résidus.

1.1.2.3 Gestion et valorisation des déchets en région parisienne, état des lieux

Les déchets inertes, qui représentent la majorité des résidus générés par le secteur de la construction, peuvent aujourd'hui être recyclés de diverses manières : sous forme de matériaux de construction ou pour une utilisation en technique routière.
Cependant, une part de ces résidus reste non valorisée : 34 % en 2012 selon l'ADEME, soit 241 millions de tonnes. Ces volumes sont non négligeables, et même si ces matériaux ne nécessitent pas de traitement particulier (contrairement aux déchets dangereux), leur transport et leur enfouissement pose question.
Concernant les matières organiques, d'après l'enquête ITOM[6] 2014 de l'ADEME, les déchets collectés auprès des collectivités et des entreprises sont traités comme suit : 22 % en centres de tri, 17 % en centres de compostage, 27 % en installations de production énergétique, 31 % en installations d'élimination/stockage, et 2 % en méthanisation. Depuis les années 70, le secteur de la valorisation est en plein essor (+ 55 % de centres de tri, +125 % de sites de compostage) et ceci s'accompagne d'une réduction des installations de stockage (- 43 %).

[4]Plan de Prévention des Déchets (PPD) (2006-2010), Programme Local de Prévention des Déchets (PLPD), puis nouveau Programme Local de Prévention des Déchets Ménagers et Assimilés (PLPDMA), en novembre 2017.
[5] ex : la stratégie "Zéro déchet", objectif : mettre fin à l'enfouissement et l'incinération des déchets pouvant être valorisés.
[6] ITOM : Installation de Traitement d'Ordures Ménagères

RAPPORT INTERMEDIAIRE - NE PAS DIFFUSER

La valorisation se met donc en place, mais dans les deux secteurs la part des déchets enfouis et incinérés reste importante. La marge de progression est grande. Pour les déchets organiques, la voie du compostage, peu coûteuse, est la plus plébiscitée par les villes. Elle est également encouragée par la LTECV. Peut-elle être la solution ?

1.2 Le compostage urbain, une solution pour la gestion des déchets organiques

Le compostage est « un processus de décomposition de matières biodégradables dans des conditions contrôlées, qui sont principalement aérobies et pour lesquelles la chaleur produite biologiquement permet une élévation de la température à des niveaux appropriés pour la croissance des bactéries thermophiles » (Saveyn et al., 2014). Tous les biodéchets peuvent être compostés : déchets verts, déchets ménagers, effluents d'élevage, déchets agroalimentaires et de cuisine.

1.2.1 L'essor du compostage en ville

1.2.1.1 Les modèles de compostage actuels, entre gestion centralisée et décentralisée

En 2014, la France produisait 3,1 millions de tonnes de compost (Desplats and Mahe, 2017), plus du double du tonnage enregistré en 2000. Les villes encouragent ce mode de traitement. Ainsi, Paris, intègre le Plan Compost parisien 2016-2020 à son Programme de Prévention des Déchets. En ville, le compostage prend de multiples formes, à des échelles, des niveaux de technicité et des fins diverses.

- Le compostage à petite échelle, une gestion décentralisée des biodéchets urbains

Depuis les années 2000, la pratique ancestrale du compostage, délaissée avec le développement de l'habitat résidentiel, revient dans les villes, sous la forme d'un compostage de proximité dit compostage partagé, via les composteurs collectifs en pied d'immeuble et les composteurs de quartier.

Ce type de compostage local implique peu de technicité. Malgré les efforts des collectivités et l'ADEME pour encadrer et promouvoir cette pratique (installations et distributions gratuites de composteurs, rédaction de guides, formations), le processus reste aujourd'hui encore peu maîtrisé. De fait, les composts produits sont très hétérogènes, et de qualités agronomiques et sanitaires non assurées.

Enfin, les volumes générés sont difficilement quantifiables, et l'utilisation qui en est faite très variable. On note souvent des excédents de compost sur les sites non couplés à des jardins (Bouin et al., 2016).

- Le compostage à large échelle, une gestion centralisée des biodéchets urbains

L'IDF compte 28 plateformes de compostage, gérées par les grands groupes spécialisés dans la collecte et le recyclage traditionnels (type Veolia (6 sites)) ou par des entreprises indépendantes, de taille plus modeste, spécialisées dans la collecte et le traitement de matières organiques (ex : Zymovert, Bionerval). Les centres de TMB[7] produisent également du compost.

Quelle que soit la technique employée, il s'agit de processus industriels à haut niveau de technicité, qui génèrent d'importants volumes. Les composts produits sont commercialisés (dans la mesure où ils respectent la NFU 44051), généralement à bas prix, et à destination de l'agriculture.

Toutefois, lorsque les OMR sont traitées en mélange, la qualité des composts produits pose question (présence d'indésirables (métaux, verre)). La norme à respecter autorise 5 kg de métaux et 2,75 kg de plastique par mètre cube de compost. Elle est souvent jugée trop laxiste par les agriculteurs.

- Le compostage en Agricultures Urbaines, le cas des microfermes urbaines[8]

En AU, le compostage est un processus nécessaire pour la gestion des déchets végétaux générés par la production, mais aussi une ressource indispensable à la mise en culture de sols souvent dégradés et infertiles (fonction d'amendement) et à la production hors-sol (fonction support).

[7] Traitement-Mécano-Biologique : qui vise à optimiser le traitement des OMRs en combinant opérations mécaniques (tri et dilacération) et biologiques (compostage). Il n'y a pas de collecte sélective des biodéchets avant traitement. Les volumes de compost produits sont importants, mais leur qualité est largement remise en question.

[8]Microfermes urbaines : fermes urbaines qui mettent sur le marché des denrées alimentaires qu'elles produisent, et offrent une diversité d'activités permettant de rémunérer au moins un salarié. Ce sont souvent des structures associatives.

RAPPORT INTERMEDIAIRE - NE PAS DIFFUSER

Les fermes franciliennes décrites par Daniel(2017), produisent leur propre compost, avec des déchets générés en interne et collectés aux alentours (invendus de marché, apports des adhérents etc).

Les volumes peuvent être conséquents ; Daniel (2017) fait état d'une production de 6 à 8 m^3 de compost en une année (soit 3.5 T) sur une ferme de 400m^2 avec 150m^2 d'installations agricoles.

Le niveau de technicité est intermédiaire (bonne connaissance du processus mais niveau d'équipement limité). Les composts produits ont de bonnes aptitudes agronomiques, mais leur qualité sanitaire est incertaine. Ils ne sont pas soumis à la norme, puisqu'intégralement utilisés sur les sites de production.

1.2.1.2 Les limites du compostage urbain

- L'acceptabilité des produits résiduaires urbains et les risques potentiels

En ville, le processus de compostage peut être décrié à cause des nuisances qu'il génère, difficilement acceptées par les citadins (nuisances olfactives, attraction d'animaux etc.), mais aussi à cause des risques liés aux dégagements de méthane et à la production de lixiviats qui lui sont associés. D'autre part, les termes de compost ou résidus « urbains » rassurent peu les utilisateurs potentiels, ils renvoient, consciemment ou non, à l'idée de produits malsains, dangereux. Les acteurs de l'AU se méfient des pollutions que ces matériaux pourraient contenir et les agriculteurs périurbains, quant à eux, « ne veulent pas être la poubelle de la ville » (représentante syndicat agricole, 3 avril 2018).

- La collecte séparative, difficultés de mise en œuvre

La mise en place d'une collecte séparative demande une logistique très complexe (fréquence de collecte élevée, collecteur spécialisé), mais aussi un changement des habitudes des citadins. En mai 2017, un projet pilote de collecte des déchets alimentaires a été lancé dans deux arrondissements de Paris. Il a vocation à être répliqué, cependant la filière de traitement séparé des biodéchets se développe lentement en IDF.

Alors quelle(s) solution(s) pour le compostage urbain ? Quel maillage imaginer ? Pour combiner niveau de technicité suffisant, qualité, localité et acceptation par le public visé ?

1.2.2 L'émergence d'un compostage professionnel de proximité

En réponse aux problématiques évoquées, des initiatives entrepreneuriales spécialisées dans la gestion des biodéchets voient le jour dans plusieurs métropoles françaises. A Paris on peut citer Les Alchimistes, Moulinot ou encore La Boîte à Champignons (fiches techniques décrivant ces entreprises et leurs pratiques en ANNEXE I). Ces structures mettent en place la **valorisation des biodéchets**, à une échelle locale, **dans la ville et pour la ville**. Spécialisées dans l'activité de compostage, elles peuvent assurer un bon niveau de technicité dans le processus et garantir la qualité des produits finis. Leur taille limitée et la pédagogie accompagnant leurs actions facilitent le tri des matières entrantes. La densité de population des centres-villes permet de collecter des volumes importants dans un rayon contenu, via des modes de transports écologiques (vélo, véhicule alimenté en biogaz).

Ces entreprises produisent depuis peu des composts stables, conformes à la NFU 44051. Ces produits 100 % locaux sont destinés à la ville, ce qui leur offre de nombreux débouchés (Fig. 3). Aux yeux de la réglementation, ces produits innovants sont des **amendements organiques**. En quoi et comment pourraient-ils remplir la fonction de support de culture ?

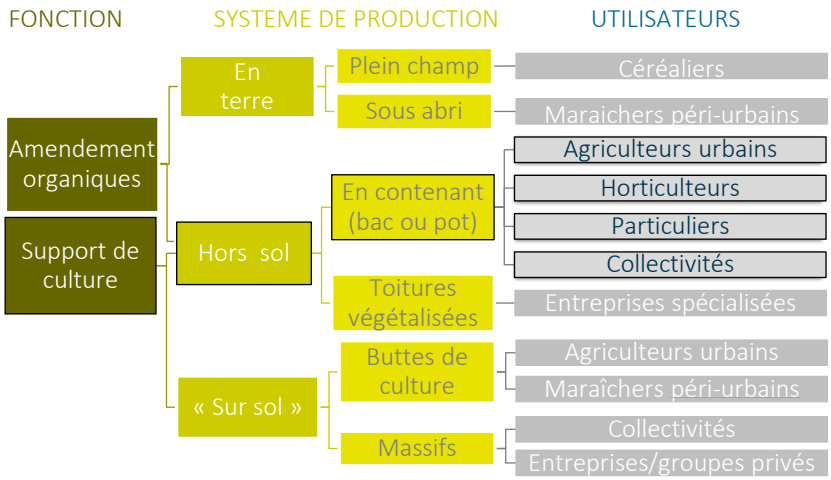


Fig. 3 – Schéma présentant les débouchés possibles pour les composts urbains. En encadré, l'objet de cette étude, présenté ci-après.

RAPPORT INTERMEDIAIRE – NE PAS DIFFUSER

1.3 Le support de culture, recherche d'une approche plus durable

Le terme support de culture désigne « les produits destinés à servir de milieu de culture à certains végétaux. Leur mise en œuvre aboutit à la formation de milieux possédant une porosité en air et en eau permettant aux plantes d'ancrer les organes absorbants mais aussi d'être en contact avec les solutions nécessaires à leur croissance » selon la définition de l'Afnor.

1.3.1 Le support de culture, marché actuel

1.3.1.1 Les usages et critères de qualité recherchés

Les supports de culture sont des produits destinés aux cultures dites hors sols, dont le système racinaire, confiné dans un espace limité, n'est jamais en contact direct avec le sol naturel. A la différence des amendements et des engrais, il n'a pas vocation à nourrir la plante. C'est un support que l'on fertilise par ajout d'un autre produit. Les fonctions de support et de nutrition sont segmentées pour être mieux maîtrisées. On recherche des matériaux poreux et aérés (capacité de rétention en air > 20 %), mais aussi rétenteurs en eau (disponibilité en eau > 25 %) et avec un pouvoir tampon de potentiel hydrique élevé (dont la réserve hydrique se vide progressivement) (Michel, 2012).

1.3.1.2 Les matériaux types utilisés

Le marché du support de culture Français présente environ 4.4 millions m^3/an. Avec 50 % des volumes vendus aux professionnels (pépinières 16 % et maraîchage 27 %, collectivités et paysagistes 11 %) et 50 % à destination du grand public (35 % pour le secteur de l'horticulture) (Michel, 2012).

La tourbe[9] est le produit le plus utilisé dans la constitution des supports de culture (77 % du volume total) car elle combine les principaux critères de qualité attendus en horticulture(Schmilewski, 2009).

Outre les tourbes, les substrats peuvent intégrer des matériaux organiques : fibres de coco ou de bois, les écorces, les composts de déchets verts ; ou bien minéraux : sables et graviers, pouzzolane, perlite, vermiculite ou encore argiles expansées. Ces matériaux présentent souvent des inconvénients (bonne rétention en eau mais faible rétention en air, ou inversement). De fait, les tourbes leurs sont souvent préférées. Les supports de culture à destination du grand public intègrent une part plus importante de matériaux non tourbeux que ceux destinés aux professionnels (respectivement 33% et 10%).

1.3.1.3 La durabilité des produits utilisés mise en question

La tourbe est une ressource non renouvelable. Son extraction endommage irrémédiablement les tourbières, qui sont des écosystèmes complexes et précieux à l'échelle de la planète. L'utilisation annuelle de tourbe s'élève à 158 M de m^3 à travers le monde (soit 2000 km^2 de tourbières détruites par an) et 20 % de ces quantités seraient employées par le secteur de l'horticulture (Michel, 2012).

Les autres matériaux utilisés proviennent majoritairement de roches volcaniques, une ressource disponible en quantité mais non renouvelable, et dont le transport et la transformation sont très coûteux en énergie. Enfin, la fibre de coco, bien que naturelle et biodégradable, nécessite avant utilisation un lourd processus de désalinisation, non sans impact sur l'environnement (Drewe, 2012).

Le monde horticole actuel connaît une demande sociale forte pour des pratiques plus écologiques. Les tendances sont au recyclage et la réutilisation des déchets biodégradables, avec une utilisation accrue de compost (pour le marché du grand public essentiellement). Les recherches de matériaux alternatifs donnent peu de résultats totalement satisfaisants. La tourbe peut être utilisée en association avec des matériaux complémentaires mais reste largement prédominante car les professionnels sont toujours en recherche de substrats de qualité « irréprochable » (Michel, 2012). D'après la fig 3, les professionnels et particuliers ne sont pas les seuls demandeurs de supports de cultures ; qu'en est-il des autres catégories d'utilisateurs, des acteurs de la végétalisation des villes ?

[9]La tourbe est un matériau combustible léger, brunâtre, formé essentiellement de l'accumulation de débris végétaux. (INRA) Elle se forme sous l'action de micro-organismes, dans des milieux saturés en eau, selon un processus de plusieurs milliers d'années.

RAPPORT INTERMEDIAIRE - NE PAS DIFFUSER

1.3.2 L'AU professionnelle, une nouvelle conception du support de culture

L'essor de l'AU ces dernières années fait émerger des systèmes de culture atypiques avec des besoins spécifiques qui parfois remettent en cause les modèles traditionnels. L'environnement urbain qui impose souvent la culture hors-sol, fait naître de forts besoins en substrats et en fertilisants.

1.3.2.1 Les usages et critères de qualité recherchés

Nourricière, récréative, pédagogique, l'agriculture urbaine est multifonctionnelle par essence (Ba and Aubry, 2011), elle attend de ses substrats qu'ils le soient également. C'est-à-dire qu'ils assurent leur fonction de support, mais soient aussi fertiles et si possible sur le long terme. Deux raisons à cela :

- des raisons idéologiques : l'AU, née à l'ère du développement durable et du recyclage, souhaite des supports vivants, favorisant la biodiversité

- des raisons logistiques : les projets d'AU investissent souvent des lieux difficiles d'accès (toits, zones au trafic dense). Un ré-apport annuel des composantes du système n'est pas ou peu envisageable, surtout pour le substrat qui est l'élément exogène le plus important, en volume comme en masse.

En somme, l'AU souhaite reconnecter les deux grandes fonctions du sol : fonction support et fonction nutrition. Elle demande la re-création de sols, dit Technosols.

Autre point, les installations sur/dans le bâti nécessitent des supports de faible densité.

L'AU cherche également des substrats écologiques, voire biologique. Par conviction d'abord, mais aussi pour répondre aux aspirations de son public citadin, en demande de « produits bio ». Cette proximité avec le public interdit également l'utilisation de produits potentiellement dangereux. L'innocuité du système et du support est la première préoccupation dans ce secteur.

Enfin, il y a une demande forte pour des produits d'origine locale. La localité est LA caractéristique sur laquelle tous les projets d'AU s'accordent, l'argument irréfutable qui justifie leur existence. Le manque d'accès à des intrants d'origine locale constitue une entorse à ce principe.

En contrepartie, l'AU est moins exigeante du point de vue des performances agronomiques du substrat, la production n'étant pas sa seule vocation, elle peut tolérer des rendements inférieurs. L'AU a donc un cahier des charges très particulier et, à ce jour, il n'existe pas de produit commercial qui remplisse l'intégralité des critères recherchés.

1.3.2.2 Les matériaux utilisés, problématiques d'approvisionnement

De nombreux agriculteurs et jardiniers urbains, inscrits dans une dynamique de recyclage, construisent leurs substrats à partir de produits de récupération (ballots de paille, drèches de bière, cartons, journaux) ou recyclés : compost de déchets verts, broyat de bois, sciure.

Le mélange « T4P » combinant résidus de support de culture de champignonnière, copeaux de bois et compost de déchets verts, testé par B. Grard (2017) dans ses travaux de thèse, est aujourd'hui adopté par certains professionnels du domaine (Cultures en ville, Cueillette urbaine).

Les composts de déchets verts des plateformes de compostage franciliennes sont aussi beaucoup utilisés (Toit tout vert, Veni-Vedi). Mais l'approvisionnement depuis ces sites de production localisés en périphérie de la ville reste un défi logistique pour des installations situées en centre-ville.

Dans les microfermes bien établies, les composts autoproduits permettent une certaine autonomie mais, à l'installation, ou pour les sites où le compostage n'est pas possible, cette ressource manque.

Faute de filière organisée, les porteurs de projets peuvent avoir recours à des produits tels que : terre végétale, terreau de jardinerie, ballots de paille etc. Ces matières ne sont pas adaptées à leurs conditions et objectifs spécifiques mais sont surtout d'origine exogène à la ville, invalidant le caractère local et circulaire de leur système.

Les agriculteurs urbains, en France comme ailleurs, sont demandeurs de solutions alternatives mais n'ont souvent pas accès à un niveau de technicité suffisant pour y parvenir seuls (Boisseault, 2017).

RAPPORT INTERMEDIAIRE - NE PAS DIFFUSER

1.4 Les solutions alternatives pour le support des plantes, état des lieux des recherches

La nécessité de trouver des alternatives aux intrants agri/horticoles actuels pousse le monde de la recherche à explorer les aptitudes de matériaux autrefois considérés comme des déchets.

Des inventaires de déchets réutilisables ont été dressés, pour la production ornementale en pot (Abad et al., 2001) ainsi que pour la construction de sols fertiles (projet SITERRE) (Damas and Coulon, 2016).

De nombreuses études traitent de l'utilisation de résidus organiques pour la production végétale :

-certaines montrent par exemple l'intérêt d'associer des broyats de bois, matière organique à libération lente, avec des produits riches en nutriments, se dégradant rapidement (Benito et al., 2006).

-d'autres démontrent que le biochar pourrait remplacer jusqu'à 50 % de la tourbe de substrats sans perte de productivité (Dorais et al., 2016; Steiner and Harttung, 2014; Tian et al., 2012).

-enfin, le marc de café intéresse également; des essais sur l'utilisation de compost à partir de résidus de champignonnière (composés de marcs) montrent de bons résultats en terme de productivité (similaire à ceux obtenus avec de la tourbe) (Lemaire et al., 1985; Ronga et al., 2016).

Toutefois, dans le domaine du support de culture, la majorité des travaux est axée sur les composts. En 2016, plus de 11 000 publications sur ce thème, 10 fois plus que pour tous les autres composants alternatifs (Web of Science in April 2016 ; Kern et al., 2017). La majeure partie de ces publications s'intéressent aux composts de déchets verts, pour lesquels les auteurs rapportent des pH et EC élevés et des teneurs en NPK parfois faibles (Benito et al., 2006; Grard, 2017).

Les travaux identifiés concernant les substrats sont quasiment tous à destination du domaine de la floriculture. Pour les productions maraîchères, les recherches sont plutôt menées en pleine terre[10]. La SERAIL[11] a mis en œuvre une expérimentation de 15 années sur l'apport de matières fertilisantes organiques (divers composts, majoritairement composés de sous-produits animaux) sur système maraîcher. Elle montre que ces produits répondent aux besoins des plantes en matière de phosphore et de potassium mais qu'il est nécessaire de les compléter avec l'apport d'une fertilisation azotée, rapidement minéralisable avant la mise en place de la culture.

Enfin, des études s'intéressent aux composts de biodéchet intégrant des déchets ménagers, plus riches en azote que les composts de déchets verts (Farrell and Jones, 2010; Gong et al., 2018; Wilson et al., 2002). Ces travaux rapportent des problèmes d'excès de sels solubles, de phytotoxicité et de compaction lorsque ces produits sont utilisés seuls en tant que supports des cultures.

Pour pallier ces risques mécaniques, tout en restant dans une logique de recyclage, des travaux envisagent l'utilisation de produits résiduaires organiques et minéraux en mélange.

En effet, certains déchets de constructions peuvent avoir des propriétés drainantes intéressantes. Rincón et al., (2014) et Vila et al., (2012) prouvent que le caoutchouc recyclé pourrait remplacer la pouzzolane des couches de drainage des substrats de toitures végétalisées. Graceson et al., (2014) montre qu'en mélange avec des composts, des résidus de briques et tuiles pourraient permettre de réduire la densité totale du substrat mais aussi d'améliorer sa rétention en eau. L'étude de Nehls et al., (2013), quant à elle, traite la question de la stabilité chimique de ces produits, un critère important, afin de pouvoir les utiliser sans risque d'interférence avec les autres constituants du substrat. Il conclut à la stabilité chimique des résidus de briques testés.

Dans le cadre du projet SITERRE, Rokia et al., (2014) explore, via un outil de modélisation, les possibilités de combinaisons entre 11 déchets minéraux et organiques (mélanges binaires et ternaires), afin de définir les compositions (nature et proportions) idéales pour recréer des sols fertiles en ville. Enfin, les travaux de thèse de Grard, (2017), montrent que des mélanges à base de résidus organiques et minéraux peuvent aussi être adaptés à la culture de plantes potagères en bacs.

10 Une référence identifiée sur la culture de plantes maraîchères en pot : Pinamonti, Stringari, Zorzi (1997) testent la production de tomates et poivrons en hors-sol, mais n'intègrent que 50 % de compost aux supports.
11 SERAIL : Station d'Expérimentation et d'Information Rhône-Alpes Légumes.

1.5 Contexte de l'étude

1.5.1 Organisme d'accueil et projet de recherche

ASTREDHOR, l'Institut technique de l'horticulture, met en œuvre des programmes de recherche et d'innovation au service des professionnels de l'horticulture, de la fleuristerie et du paysage.

Depuis plusieurs années, l'institut affiche une forte volonté de se positionner sur le secteur de l'agriculture urbaine. Ainsi s'engage-t-il depuis 2017 dans le projet de recherche CASDAR TECHN'AU – Techniques d'Agricultures Urbaines – qui a pour mission la recherche et le « développement de solutions innovantes pour lever certains verrous technologiques et garantir la qualité des produits de l'AU ». Ce projet national associe structures de recherche, institut technique et entreprises privées, pour répondre au mieux aux problématiques des acteurs de terrain. Un descriptif détaillé du projet et des partenaires impliqués (comité de pilotage de cette mission) est présenté en ANNEXE II.

Les travaux présentés ici concernent l'action 2 du projet : « Substrats de culture et fertilisation » et plus spécifiquement la tâche 3 intitulée « Evaluation de matériaux issus d'économies urbaines ».

ASTREDHOR cherche à évaluer les possibilités agronomiques, environnementales et économiques de l'intégration de nouveaux gisements urbains en AU, et à produire des références qui pourront aussi être utilisées dans les cultures conventionnelles sous abris.

1.5.2 Objectifs, problématique et hypothèses de travail

1.5.2.1 Objectifs

Le but des travaux présentés ici est d'évaluer différents types de substrats élaborés à partir de mélanges de matériaux issus de l'économie circulaire urbaine. Les utilisateurs potentiels de ces substrats sont : les professionnels de l'AU, les particuliers ou encore les professionnels de l'horticulture. Les sous objectifs sont d'établir un comparatif des **performances agronomiques de tels mélanges,** de questionner la **faisabilité de leur mise en œuvre** et d'évaluer le **degré de participation à une dynamique d'économie circulaire.** Un essai a déjà été conduit sur ce sujet en 2017, le but de cette mission est de poursuivre et d'approfondir le travail entrepris, en testant de nouveaux mélanges.

Problématique : *Conception de substrats établis par mélange de matériaux issus du métabolisme urbain. Quelle(s) combinaison(s) optimale(s) au regard des qualités agronomiques et du niveau de participation à l'économie circulaire de ces mélanges ?*

Hypothèses de travail :

- Les aptitudes agronomiques d'un compost peuvent être influencées par :
  1) Les matières premières constitutives du produit (déchets verts, déchets alimentaires etc.)
  2) La technique de compostage employée (compostage en andain ou mécanique par exemple)
- Les composts sont des matériaux à fort risque de compaction. L'intégration d'un agent structurant permet d'aérer le substrat. Le type d'agent structurant utilisé pourrait avoir un impact.
- Les phénomènes de faim d'azote sont susceptibles de survenir.
- La performance d'un substrat est fonction de l'espèce végétale considérée.

Démarche mise en place :

Phase 1	1) Sélection des matériaux utilisables suivant : a. Les objectifs et contraintes liés au contexte et aux publics visés b. La disponibilité 2) Choix des mélanges et de leurs proportions
Phase 2	1) Mise en situation des mélanges (mise en culture) - 2) Collecte de données
Phase 3	1) Analyse des données - 2) Evaluation de l'acceptation par le public visé

RAPPORT INTERMEDIAIRE - NE PAS DIFFUSER

2. DEMARCHE EXPERIMENTALE

2.1 Méthodologie de sélection des matériaux

La construction de l'essai présenté ici a débuté par une phase de prospection des produits résiduaires urbains locaux. Les matériaux utilisés ont été sélectionnés selon la méthodologie suivante[12] :

1. Identification des interlocuteurs locaux
2. Identification de l'intérêt des acteurs pour le projet
3. Recensement des produits proposés par ces acteurs et de ceux potentiellement utilisables
4. Sélection des produits présentant un intérêt pour une utilisation en tant que support de culture
5. Sélection des produits présentant un intérêt dans le cadre du projet TECHN'AU.

Les critères primordiaux étaient les suivants : Innocuité - Caractère innovant – Produit différent des autres produits testés - Potentiel filière (volumes suffisants et intérêt du producteur).

2.2 Matériel

2.2.1 Facteur étudié : le substrat

Dans cet essai sont testés 8 substrats différents issus de la combinaison de 8 matériaux parents d'origines diverses.

2.2.1.1 Matériaux parents

- Des résidus urbains

Dans les codes utilisés par la suite : C = compost – LC = lombricompost – S = agent structurant

- Un **c**ompost de déchets verts (DV) , codé C1a
- Des résidus de champignonnière ; codé M

} Codé C1

- Un **c**ompost de bio-déchets urbains ; codé C2
- Un **c**ompost de bio-déchets urbains ; codé C3
- Un **l**ombri**c**ompost de biodéchets urbains ; codé LC2
- Un **l**ombri**c**ompost de fumiers ; codé LC1
- Du concassé de béton cellulaire Siporex (Copolight®) ; codé S1
- Des plaquettes forestières 0/20 ; codé S2

- Un produit commercial :

- Un substrat horticole classique : Klasmann W913, provenant de l'entreprise Klasmann-Deilmann ;

2.2.1.2 Les mélanges

Huit modalités distinctes mises à l'essai (présentées avec le code couleur utilisé par la suite)

C1S1 : 60 % compost de DV + 20% de résidus de champignonnière+ 20% de béton cellulaire

C2S1 : 80 % compost de biodéchets intra-urbain + 20% de béton cellulaire

C3 : 100% compost de biodéchets urbain

C3S1 : 80 % compost de biodéchets urbain + 20% de béton cellulaire

C3S2 : 80 % compost de biodéchets urbain + 20% de bois

LC1S1 : 80 % de Lombricompost de fumier + 20% de béton cellulaire

LC2S1 : 80 % de Lombricompost urbain + 20% de béton cellulaire

T : 100% substrat horticole Klasmann + fertilisé avec engrais à libération lente : Osmocote exact Hi end 8/9 mois.

[12] Pour les matériaux organiques, la plupart des interlocuteurs avaient déjà été identifiés en année 1 du projet. La méthodologie présentée correspond davantage à la sélection des produits minéraux.

RAPPORT INTERMEDIAIRE - NE PAS DIFFUSER

- Raisonnement concernant les proportions :

Les matériaux minéraux et les plaquettes forestières ont vocation à aérer les substrats. En horticulture, la perlite peut assurer cette fonction. Les mélanges classiques en contiennent 20% et les substrats drainants jusqu'à 40%. Un essai précédemment mené à l'institut visait à tester ces deux fractions. Les modalités avec 20 % de fraction minérale ayant donné de meilleurs résultats, cette proportion est sélectionnée et mise en œuvre pour tous les substrats, sauf le témoin et C3.

- Raisonnement concernant les modalités choisies :

Nous cherchons à évaluer les aptitudes de nouveaux composts composés de biodéchets que sont C2 et C3. Nous les confrontons à un mélange de déchets organiques déjà testé C1 (C1S1 est une réplique du « T4P » (en mélange et non en lasagne) avec remplacement du bois par du béton cellulaire concassé (pour une comparaison plus facile des résultats avec les autres modalités)).
Nous souhaitons évaluer l'effet du processus de lombricompostage via la comparaison de C3 et LC2 qui sont deux produits obtenus à partir des mêmes matières entrantes, sur le même site.
Nous souhaitons évaluer l'intérêt des rejets animaux par rapport aux biodéchets, via une comparaison LC2S1/LC1S1.
Enfin, avec la modalité C3 et ses variantes C3S1 et C3S2, nous questionnons l'intérêt de l'ajout d'un matériau drainant dans le compost et l'effet de la nature (organique ou minérale) de ce matériau.

2.2.2 Le matériel végétal :

Deux variétés ont été sélectionnées pour cet essai : **la tomate cerise** - *Solanum lycopersicum* 'Donna F1', une variété compacte, adaptée à la culture en pot et **le basilic** - *Ocimum basilicum L.* 'Grand Vert', une variété condimentaire parmi les plus commercialisées par le fournisseur choisi : l'EARL Haberschill.

Ces plantes tests ont été choisies car : (1) ce sont des espèces à croissance rapide, permettant de mener des observations sur une durée limitée; (2) elles font partie des espèces les plus cultivées en AU(Pourias, 2014) et sont productives sur de faibles surfaces; (3) elles ont des exigences différentes : la tomate est un légume rustique exigeant d'un point de vue nutritif, permettant de mettre en évidence les différences de fertilité chimique ; le basilic est plus sensible aux stress hydriques, il permettra d'apprécier la fertilité physique des mélanges. Cette espèce permet aussi de bien appréhender certaines carences en éléments, (4) la comparaison entre un légume fruit et feuille pourra être intéressante lors des analyses de pollutions (degré d'accumulation des éléments différents).

2.3 L'expérimentation

2.3.1 Caractéristiques du site

2.3.1.1 Localisation et environnement de la parcelle

Adresse : Arexhor Seine-Manche, Exploitation du lycée horticole Route forestière des princesses 78100 Saint-Germain-en-Laye. Coordonnées GPS : 48°53'46.3"N 2°02'53.1"
Le terrain ne présente aucun facteur aléatoire notable, il n'y a pas d'hétérogénéités pouvant créer des conditions différenciantes (haie, aspérités), mis à part une faible pente orientée nord-ouest.

2.3.1.2 Données météo

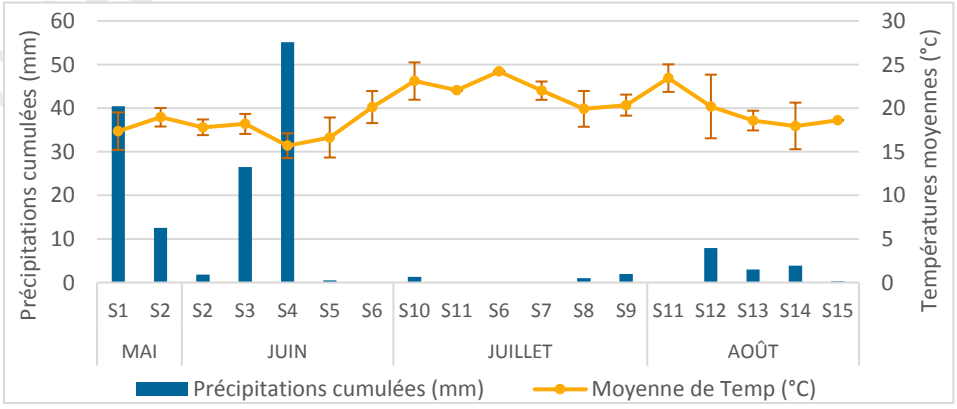


Fig. 4 - Données météorologiques (précipitations et T°) en fonction des semaines de culture.

Les données présentées ont été collectées par la station météorologique d'une exploitation agricole de Feucherolles, située à quelques kilomètres du site d'expérimentation.

RAPPORT INTERMEDIAIRE - NE PAS DIFFUSER

2.3.2 Dispositif expérimental

2.3.2.1 Système de production

Le contenant choisi est un pot de grand format : diamètre 45 cm, hauteur 30 cm, contenance 36 L. (Gamme Pepia, provenant de l'entreprise Chapelu). Le but est de se rapprocher du système de culture en bac ou en sac, souvent pratiqué en AU. Tomate et basilic sont associés au sein d'un même pot. Cette combinaison, reconnue pour donner de bons résultats en système permacole, est également très courante en AU (Daniel, 2017). Chaque pot est planté d'un seul plan de chaque espèce.

2.3.2.2 Unité expérimentale et répétitions

Une unité expérimentale correspond à un pool de 3 pots. De fait, chaque unité expérimentale comprend 3 pieds de tomates et 3 pieds de basilic. Ce sont des sous-répliques qui permettent de faire des répétitions de mesure. Pour une variable donnée, nous effectuons 3 mesures sur les 3 pieds et les valeurs sont moyennées pour donner une valeur unique à une unité. Ainsi cette valeur est plus robuste et les variances résiduelles entre les individus sont limitées.
L'expérimentation comporte 8 traitements et 4 répétitions.

2.3.2.3 ²Plan d'expérimentation

Dans cet essai un seul facteur est à l'étude : le substrat ; il existe un léger gradient d'hétérogénéité sur la parcelle (la pente). De fait, un plan d'expérimentation de type **dispositif en bloc aléatoire complet** est adopté. Une répétition correspond à un bloc qui suit le sens du gradient repéré. Il y a donc 4 blocs, à l'intérieur desquels les traitements sont répartis de manière totalement aléatoire. Le plan du dispositif est présenté en ANNEXE III.

Irrigation - L'irrigation est conduite en goutte à goutte. Chaque pot est associé à un goutteur ayant un débit de 8L/h, divisé en 4 capillaires.

Paillage - La variété de tomate sélectionnée étant tapissante, un recouvrement rapide de la surface du pot est attendu. En outre, l'ajout d'un paillage pourrait induire des phénomènes de faim d'azote, générant un biais supplémentaire pour l'essai. De fait, aucun paillage n'est mis en place.

Système de récupération des eaux -Un bac de gros volume est placé sous un pot de chaque modalité [13] afin de collecter et comptabiliser les eaux percolées des pots sur des temps longs. Voir (Fig. 6), p.16.

2.3.2.4 Pratiques culturales

Aucun facteur aléatoire lié aux interventions culturales n'est supposé entrer en jeu. De fait, toutes les modalités ont été conduites de manière similaire.

Calendrier de culture - Les tomates et basilics, reçus au stade jeunes plants, en mottes collées, ont été transplantés directement dans le contenant final, 3 jours après réception. Les cultures ont été mises en place le 18 mai 2018, l'essai devait s'arrêter à la fin du mois de septembre (18 semaines de culture).

Irrigation - Toutes les modalités ont reçu exactement les mêmes doses d'arrosage, afin de pouvoir comparer les performances des substrats sur ce point. Des impossibilités techniques ont amené à modifier plusieurs fois le mode d'irrigation.

Tableau 1 - Calendrier d'irrigation mis en œuvre au cours des 12 premières semaines de culture

Semaine	Type d'irrigation	Fréquence	Volume
S1 à S4	Précipitations	Selon les précipitations. Averse 1 fois/jour	Cf météo
S5 à S7	Automatique, déclenché manuellement	2 fois 20 minutes/jour si besoin	4L/jour
S7	Pilotée par évapotranspiration	En fonction de la météo. 3 fois 10 puis 15 minutes/jour les jours de forte chaleur	4L/jour
S8	Irrigation automatique programme fixe	4 fois 15 min/jour (8h-12h-16h-20h)	8L/jour
S9 à S12	Irrigation automatique programme fixe	3 fois 15 min/jour (10h-14h-16h)	6L/jour

[13]Les pots reposent sur des coupelles retournées permettant à la fois un écoulement de l'eau dans le bac de récupération (sans que le bas du pot ne stagne dans l'eau) et un isolement des racines vis-à-vis de l'air.

RAPPORT INTERMEDIAIRE - NE PAS DIFFUSER

Taille –Les tomates, de variété retombante, n'ont pas été taillées. Les basilics ont été taillés tous les 15 à 20 jours après la première récolte (taille générale).
Lutte contre les ravageurs– Trois traitements de lutte biologique ont été appliqués tout au long de la culture (Ferramol/Lâché d'auxiliaires/Bacillus thuringiensis) (calendrier et détails en ANNEXE III)

2.4 Méthode d'évaluation des substrats

2.4.1 Qualité sanitaire – innocuité

Les matériaux parents sélectionnés sont des produits commercialisables ; à ce titre, ils respectent les normes de mise sur le marché. Le site de l'expérimentation n'est exposé à aucune source de pollution atmosphérique, l'innocuité des mélanges semble donc assurée. Des analyses ETM et HAP des substrats sont prévues en fin de culture afin de s'en assurer (non effectuées à ce jour).

2.4.2 Qualités agronomiques

2.4.2.1 Caractérisation des substrats

Les substrats construits sont évalués sur leurs aptitudes potentielles, prédites par les analyses de laboratoire, et sur leurs performances réelles, évaluées grâce à la mise en situation sur le terrain.

Analyses de laboratoire :
L'analyse des caractéristiques chimiques des substrats a été réalisée par le laboratoire d'analyse des sols INRA d'Arras[14]. Les analyses des caractéristiques physiques (pF) et organiques ont été conduites par le laboratoire AUREA[15].
Des analyses de capacité à la réhumectation ont été effectuées au laboratoire de l'UP EPHor d'AgrocampusOuest centre d'Angers.

Caractérisation in situ :
Les données de suivi de routine (diamètre, stades de la plante, récolte, ect.) sont collectées sur l'ensemble du système. Pour les mesures destructives, la saison de culture n'étant pas terminée, une seule répétition complète a été détruite en S13, la R4 (soit 3 pots de chacune des 8 modalités). Dans ce cas et pour ce rapport, nous sommes contraints de considérer qu'un pot représente un individu.

- Caractéristiques chimiques des substrats

Analyses de laboratoire :(détail des méthodes mises en œuvre en ANNEXE IV)

Carbone organique (g.kg^{-1}) ;
Azote total (g.kg-1) ; **Azote nitrique** (N de $NO3^-$) ; **Azote ammoniacal** (N de $NH4^+$) ;
pHeau ; **Conductivité totale** sur extrait 1/25 (m/v) à 25°C (mS.cm^{-1}) ;
Capacité d'échange cationique (spectrophotométrie)(cmol+.kg^{-1}) ;
Phosphore Olsen (P2O5) (g.kg^{-1}) ; **Phosphore (P_2O_5) total** HF (ICP-AES; g.100g^{-1});
Potassium (K) échangeable (ICP-AES) (cmol+.kg-1) ; **Potassium total** HF (ICP-AES; g.100g^{-1}) ;
Calcaire ($CaCO_3$) total (g.kg^{-1}) ; **Magnésium total** HF (ICP-AES; g.100g^{-1}); **Manganèse extractible** à l'EDTA-BCR (mg.kg^{-1}).

Mesures in situ :
Les valeurs de pH et EC des substrats ont été relevées in-situ à 3 dates différentes, avec des instruments de terrain (pHmètre -ECmètre portatifs de la marque Combo). Méthode employée : dilution d'un volume de substrat dans 1.5 volume d'eau distillée, agitation, prise de mesure.

- Caractéristiques physiques des substrats

Analyses de laboratoire :

Granulométrie 5 fractions sans décarbonation ; **Matière sèche** (%) ; **Masse volumique apparente** (g/l brut) ; **Propriétés physiques à pF 1.0,1.7et2.0** ; **Capacité à la réhumectation**.

[14] Laboratoire accrédité COFRAC (https://www6.lille.inra.fr/las)
[15] AUREA Agrosciences (https://www.aurea.eu/)

RAPPORT INTERMEDIAIRE- NE PAS DIFFUSER

Détail concernant les mesures de capacité à la réhumectation :

Les matières organiques présentent, dans leur majorité, une tendance à l'hydrophobie, c'est à dire qu'il est particulièrement difficile de les réhydrater après dessiccation. Dans ce cas, à la suite d'une période de sécheresse, l'infiltration de l'eau est ralentie ; celle-ci s'écoule exclusivement par un (ou des) chemin(s) qu'elle se fraie à travers le support, sans être disponible pour les racines de la plante.
L'aptitude à la réhumectation, ou mouillabilité, est un critère de qualité primordial pour les substrats horticoles et un paramètre particulièrement important pour les mélanges étudiés ici, composés quasi exclusivement de MO.
Il n'existe pas de norme officielle décrivant une méthode générale d'analyse de ce paramètre.
Dans cette étude nous avons appliqué une méthode mise au point par (Fields et al., 2014), mise en œuvre dans les laboratoires de l'UP EPHor d'AgrocampusOuest centre d'Angers, sur les 8 modalités testées (avec 4 ou 3 répétitions d'analyses par modalité). Le protocole suivi est décrit en ANNEXEV.

Mesures in situ :

Masse du système :
Afin d'évaluer la masse globale du système (pot + plantes à maturité), les substrats de la répétition 4 ont été saturés en eau (irrigation de 40 minutes), puis pesés avec une balance de terrain.
Effondrement :
Pour noter d'éventuelles pertes de volume des mélanges, les niveaux des substrats ont été mesurés en semaine 13, avec une règle posée en équilibre sur les rebords des pots et un mètre, permettant de mesurer l'écart entre le substrat et la règle. Les valeurs ont été prises en 5 points par pot et moyennées.

- Caractéristiques organiques des substrats

Analyses de laboratoire :
ISB Extraction Van Soest (soluble, cellulose, hémicellulose et lignine) ; **Matière organique**[16] (% de MS)

Mesures in-situ : un comptage de vers a permis d'évaluer le développement de la vie du sol. Pour ce faire, des échantillons de sol ont été prélevés dans des cylindres de 6 cm de diamètre par 15 cm de hauteur dans chaque pot de la répétition N°4. Les observations ont donc été menées sur 3 cylindres X 3 pots, soit 9 échantillons par modalité.

- Caractéristiques culturales

Mesures in-situ

Afin d'émettre un avis sur le niveau de praticité de mise en œuvre de ces matériaux.
Sensibilité aux attaques de ravageurs :
Ce critère a été évalué via des notations qualitatives effectuées chaque semaine et des observations journalières de la santé générale des plants.
Développement des adventices :
Lorsque la pression adventice est devenue forte (concurrence possible des cultures), un désherbage général a été effectué, avec comptage de la flore spontanée sur l'ensemble des pots.

2.4.2.2 Caractérisation des effluents de percolation

Les eaux de percolation correspondent aux eaux non retenues par les substrats. En culture hors-sol en ville, si aucun système de récupération n'existe, elles ruissellent sur les surfaces imperméabilisées, avant de rejoindre les systèmes de collecte ou l'environnement. Ces eaux sont potentiellement chargées en éléments fertilisants et pourraient représenter une pollution azotée.

Deux informations sont donc intéressantes au niveau des percolats : le volume d'eau percolé et la composition des eaux relarguées.

[16]Matière organique : ensemble des composés carbonés issus d'organismes vivants et déposés ou incorporés à la surface terrestre.

RAPPORT INTERMEDIAIRE NE PAS DIFFUSER

- Les mesures de volume :

Chaque semaine, les bacs de récupération étaient vidés et les volumes d'eau percolés mesurés en litres. Ensuite les bacs étaient remis en place, sous des pots différents d'une semaine sur l'autre.

- Analyses de composition chimique :

Un jour par semaine, des coupelles étaient placées sous 3 pots de chaque modalité, (1 pot par répétition, sur 3 répétitions). Une irrigation conséquente était déclenchée afin que chaque substrat lessive un volume d'eau suffisant pour pouvoir prélever un échantillon dans chaque coupelle. Ces échantillons de lixiviat ont été conservés au frigo jusqu'à analyse.

Celles-ci ont été conduites en interne, au laboratoire de biologie du lycée horticole de Saint-Germain en Laye, avec des pH-mètre et EC-mètre de paillasse. Les concentrations en NO_3^- ont été mesurées avec des bandelettes Test Nitrates MQuant™ 10–500 mg/L NO_3^- de la marque Merck, et un réflectomètre Nitrachek 404, en 4 points de mesure, correspondant aux grandes étapes du cycle de culture de la tomate (plantation, développement végétatif, floraison, mûrissement des fruits).

2.4.2.3 Caractérisation de la production

- Croissance végétative

Des mesures hebdomadaires sur tous les plants ont été menées jusqu'à la 13ème semaine de culture.
Pour le basilic : Mesure de hauteur en cm, du collet au sommet de la tige, sans prise en compte des potentielles inflorescences.
Pour la tomate : Mesure de hauteur la première semaine puis mesure de largeur par la suite (s'agissant d'une variété à port retombant, la mesure de la hauteur est jugée non représentative).

- Potentiel productif

L'un des postulats de départ est que les particuliers et la plupart des acteurs d'AU tolèrent une moindre qualité visuelle des produits, tandis que les producteurs suivent des cahiers des charges stricts. Ainsi, il paraît intéressant de traiter l'aspect quantité mais aussi qualité des productions.

Pour les tomates : les fruits sont récoltés à maturité complète, plusieurs fois par semaine. En fin de semaine, les fruits sont calibrés, pesés et classés suivant des critères de qualité visuels. Le protocole suivi, basé sur les données du Codex Alimentarius, est présenté en ANNEXE VI.

Pour le basilic : pour des questions pratiques il a été décidé de toujours récolter l'intégralité des modalités en même temps, lorsque la majorité des pieds étaient prêts. Les récoltes ont été triées afin de séparer les parties jugées commercialisables des non commercialisables.

Nous n'avons pas trouvé d'informations officielles concernant les critères de qualité pour la commercialisation de ces aromatiques. Il n'existe visiblement pas de règles communes, le marché fonctionne sur la base d'accords producteur-distributeur. Nous nous sommes donc basés sur un exemple de cahier des charges communiqué oralement, demandant : « des branches de 3 entre-nœuds minimum, avec des feuilles de dimension inférieure à la pomme de la main ».

Après ce tri, les plants ont été pesés en MF. La teneur en eau étant un critère de qualité important pour les aromatiques, des mesures de matière sèche ont aussi été effectuées sur cette espèce, uniquement sur la récolte finale en raison d'indisponibilité du matériel plus tôt dans la saison. Trois plants par modalités ont été coupés au collet, séchés à 105°C à l'étuve durant 48h.

- Développement racinaire

La destruction de certains pots a permis une évaluation qualitative du développement racinaire, avec des notations sur l'existence de marques d'asphyxie et l'homogénéité du développement racinaire.

Traitement statistique des données : Les analyses statistiques ont été conduites sous Rstudio-1.0.44. Après vérification des postulats de normalité et d'homoscédasticité, avec les tests de Shapiro-Wilk et Bartlett, le test de Fisher (Anova) a été réalisé, complété par un LSD-test afin de classer les individus. Pour les jeux de données ne respectant pas les hypothèses de la loi normale, le test non paramétrique Kruskal-Wallis a été utilisé, complété par un test de Newman-Keuls, afin de constituer des classes.

RAPPORT INTERMEDIAIRE - NE PAS DIFFUSER

2.4.3 Critères d'évaluation socio-économique

2.4.3.1 Niveau de participation à une dynamique d'économie circulaire

Evaluer le niveau de participation à l'économie circulaire d'un produit, d'un processus ou d'une entreprise est complexe, car la notion d'économie circulaire fait intervenir un grand nombre de paramètres et de variables interconnectées. Sur la base d'indicateurs de suivi des projets d'économie circulaire, définis par le Conseil national de l'industrie, nous avons pris le parti de nous baser sur quelques informations basiques, et relativement simples à collecter pour tenter de définir le niveau de participation à l'économie circulaire des matériaux testés, en suivant la grille suivante :

• Caractéristiques environnementales	• Caractéristiques sociales
Données déchets Type de déchets valorisés Volume annuel de déchets traités Données produit Volume annuel de produits générés Données efficacité de production Etapes du processus de production La durée du processus L'énergie nécessaire à la mise en place du processus Caractère local Secteur de collecte / Mode de collecte /Secteur de distribution	Nombre d'emplois générés par l'activité Implication dans des actions sociales et solidaires (pédagogie, sensibilisation) Acteurs territoriaux impliqués

2.4.3.2 Evaluation du potentiel filière

Le potentiel de création d'une filière autour des résidus utilisés a été évalué par les points suivants :

- la disponibilité de la ressource (volume du gisement et prix du produit)
- la réplicabilité du processus de fabrication
- l'intérêt des parties prenantes

Des informations renseignées grâce à la bibliographie et/ou des échanges avec les acteurs du secteur.

2.4.3.3 Perception et acceptabilité des substrats, proposition de méthodologie

L'étude du degré d'acceptabilité des supports de culture imaginés par les utilisateurs apparaît comme une étape essentielle du processus d'analyse globale des substrats testés.

Des ateliers interactifs ont été imaginés pour recueillir les avis et perceptions du public. Ils n'ont pas pu être mis en œuvre dans le temps du stage, mais nous présentons ici la méthodologie construite.

- Objectifs

- Présenter les produits identifiés et communiquer autour des solutions alternatives possibles
- Comprendre les perceptions et représentations de ces produits, afin d'évaluer le potentiel filière
- Recueillir les avis pour améliorer ces produits (principe de l'apprentissage en double boucle (Argyris et Schön,1978))
- Identifier les conditions d'acceptabilité.

La population ciblée pour cette enquête se divise en 3 classes : les professionnels de l'horticulture (« pro-producteurs"), les particuliers (jardiniers urbains, aguerris ou non), les professionnels de l'agriculture urbaine.

- Hypothèses et protocole d'évaluation

Les cibles identifiées étant très différentes, il serait nécessaire de construire des ateliers spécifiques pour chaque groupe. En ANNEXE VII, nous proposons un protocole imaginé pour des professionnels de l'Agriculture Urbaine.

RAPPORT INTERMEDIAIRE - NE PAS DIFFUSER

3. PRESENTATION ET ANALYSE DES RESULTATS

3.1 Caractérisation physico-chimique des substrats

3.1.1 Caractérisation physique

3.1.1.1 Caractéristiques hydriques

- Capacités de rétention

Analyses de laboratoire

Les substrats mis à l'essai présentent tous une porosité totale supérieure à 80 %, comme la majorité des produits utilisés en horticulture.

Le substrat C2S1, avec 90 % d'espace poral, égale le témoin, tandis que les autres matériaux sont légèrement moins poreux (autour de 80 %) (données non présentées). Le rôle de ces pores est d'offrir aux racines un bon équilibre entre l'accès à l'eau et la disponibilité en air.

Les mélanges testés sont dans l'ensemble bien aérés, mais présentent une faible disponibilité en eau (environ 15 % du volume contre 25 % attendu pour un support de culture classique).

Ainsi, C2S1, nous l'avons vu, est très poreux, mais retient principalement de l'air et peu d'eau (Fig. 5).

LC1S1, composé de fumiers, se distingue des autres mélanges ; il offre une meilleure disponibilité en eau mais semble très peu aéré, laissant craindre des phénomènes d'asphyxie racinaire.

LC2S1 affiche des propriétés de rétention en air satisfaisantes, mais seulement 10% de son volume est disponible pour une réserve d'eau. Il nécessite donc théoriquement des arrosages très fréquents.

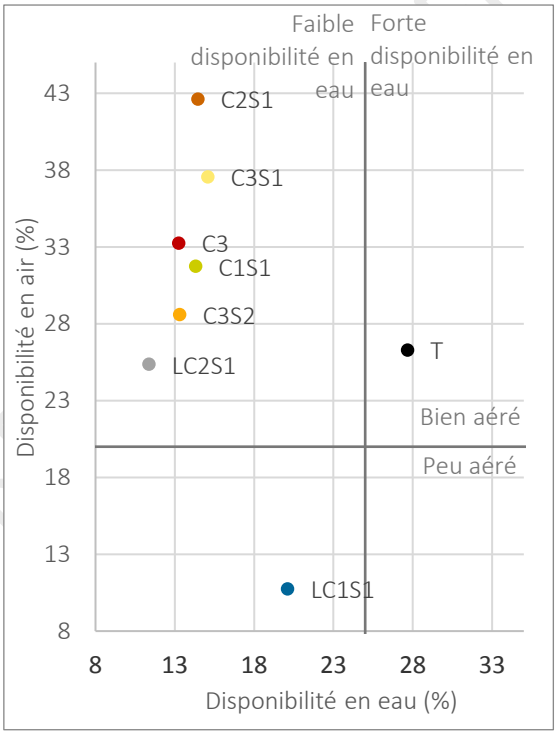


Fig. 5 - Caractérisation des capacités de rétention en eau et en air des substrats issus de résidus urbains. Limites en traits continus fixées d'après (Michel,2014)

L'ajout du béton cellulaire dans le compost C3 rend théoriquement le mélange C3S1 plus rétenteur en air comme en eau ; en revanche, l'introduction de bois dans ce même compost (C3S2) ne semble pas avoir d'influence sur la disponibilité en eau et réduirait légèrement la disponibilité en air.

Les substrats testés ont majoritairement un pouvoir tampon de potentiel hydrique entre 3.5 % et 5 % du volume (données non présentées), des valeurs correctes, qui correspondent au potentiel d'une tourbe blonde irlandaise (10-20mm). Le témoin et LC1S1 affichent un pouvoir tampon légèrement supérieur (autour de 7 %). Leur réserve en eau devrait donc se vider moins vite, autorisant des apports d'eau moins fréquents.

Mesures in-situ

L'installation de bacs collecteurs des eaux de percolations (Fig. 6) a permis la quantification des volumes d'eau non retenus par les substrats tout au long de la culture, données présentées en Fig. 8 ci-après.

Fig. 6 - Dispositif de récupération des eaux. L.B le 25/08/18 à St-Germain-en-Laye.

RAPPORT INTERMEDIAIRE - USER

En début d'expérimentation, des pots sans plantes, contenant les mêmes mélanges que les pots plantés ont reçu un arrosage au goutte à goutte de 60 minutes, soit 8L d'eau.

La Fig. 7 présente les volumes d'eau non percolés, c.à.d retenus par le substrat (en aplat de couleur), ainsi que les valeurs de disponibilité en eau, calculées à partir des analyses de laboratoire, présentées en Fig. 5. Les substrats ayant théoriquement la plus grande réserve en eau (LC1S1 et T), ont effectivement retenu 5 et 5.8 litres sur les 8 litres fournis, tandis que les autres substrats ont laissé s'écouler plus de 50% du volume apporté.

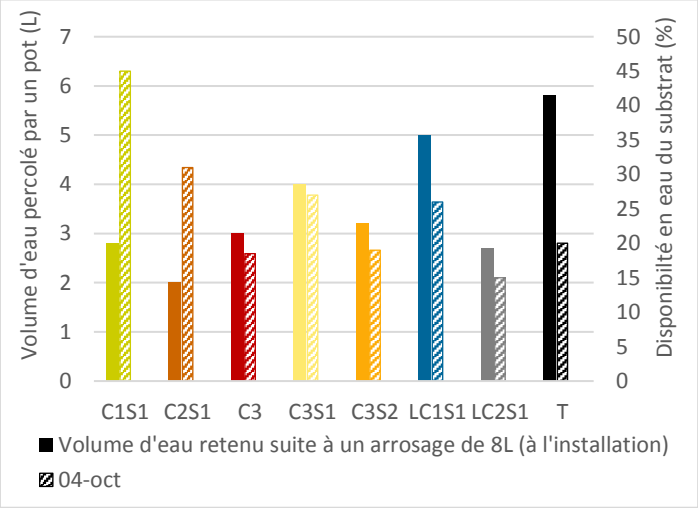


Fig. 7 - Niveaux de rétention en eau mesurés in-situ, confrontés aux valeurs de disponibilité en eau fournies par les analyses laboratoires.

Les C3S1 et C2S1, ayant théoriquement une capacité de rétention en eau quasi-similaire, ont réagi différemment à cette première irrigation. C3S1 a retenu 4L contre seulement 2L pour C2S1.

Ces deux données (laboratoire et in situ) se basent sur une seule mesure par modalité. Elles permettent de dégager des tendances, confirmées par un suivi des eaux de percolation sur un temps long, (Fig. 8) ci-dessous.

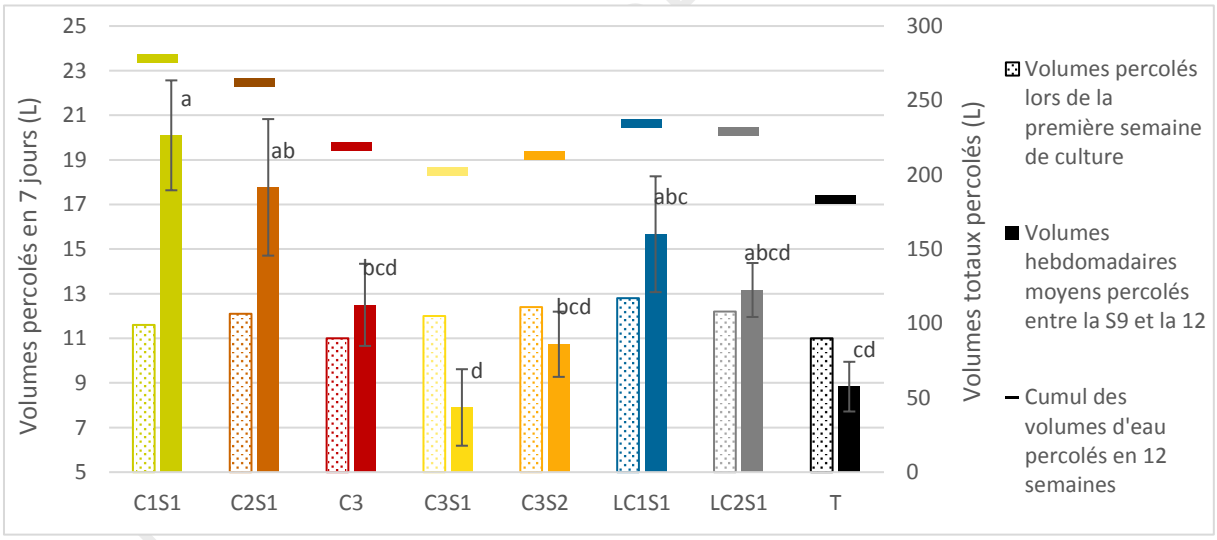


Fig. 8 - Comparaison des volumes d'eau perdus en cours de culture. Axe de gauche : les volumes percolés en S1 et une moyenne des volumes mesurés durant les 12 semaines. Axe de droite : volumes totaux perdus, signalés par une barre. Tests statistiques : Shapiro-Wilk test : p-value =0.12 - Bartlett test : p-value =0.88 - Fisher test : p-value : 0.035.

La première semaine, les aptitudes de rétention en eau des diverses modalités sont très proches (histogrammes en pointillés Fig. 8). Le témoin et le substrat C3 (100% compost) retiennent mieux l'eau reçue.

En fin de culture, (histogrammes en aplat de couleur, Fig. 8) les écarts se creusent entre les modalités. Ces différences peuvent être attribuées aux hétérogénéités dans le développement des plantes, captant, de fait, plus ou moins d'eau. C'est le cas du mélange C1S1, pour lequel les plantes ont montré d'importants retards de croissance. Ce substrat perd donc une grande partie de l'eau fournie.

Par ailleurs, les observations confirment que C2S1 retient peu l'eau (volume total percolé le plus important après C1S1) malgré sa forte porosité totale. A contrario, les pots de la modalité C3S1 ont le moins percolé, avec 20 litres perdus en 12 semaines. Les volumes cumulés sont plus faibles pour la

modalité intégrant du béton cellulaire (C3S1) que pour C3 et C3S2, en accord avec les résultats des analyses de laboratoire qui prévoyaient une meilleure rétention en eau (Fig. 5). Mais ces différences restent non significatives au sens statistique. Au regard des volumes d'eau perdus cumulés (traits supérieurs sur le graphe), le lombricompost de fumiers (LC1S1) semble moins bien retenir l'eau que les (lombri)composts à base de déchets alimentaires et déchets verts.

Impact sur la culture

L'observation des systèmes racinaires renseigne sur le confort hydrique offert aux végétaux durant la culture. En fin de saison, nous constatons que les racines des tomates sortent généralement des pots, attestant de la taille insuffisante des contenants pour ce type de culture.

Nous observons un bon enracinement de la totalité des substrats. Les racines des végétaux plantés dans les mélanges à base de résidus urbains sont blanches et saines. Aucun pourrissement n'est noté.

Fig. 9 - Systèmes racinaires en fin de culture. De gauche à droite : C3S1, LC1S1, T. Photographie : L.B le 20/08/18 à St-Germain-en-Laye

La modalité C3S1 montre un développement racinaire particulièrement important. Contrairement à ce que pouvaient laisser craindre les analyses de laboratoire, le substrat à base de fumier (LC1S1) n'a pas provoqué d'asphyxie des racines (Fig. 9). En revanche, les racines des pots contenant le substrat horticole montrent des colorations légèrement orangées, pouvant laisser penser à un manque d'oxygène, résultant certainement d'un excès d'eau. Il faut cependant noter que cela n'a pas gêné le développement aérien des plantes.
Enfin, différence notable : les végétaux plantés sur le substrat C2S1 ont développé un système racinaire beaucoup plus ramifié que tous les autres plants, avec une production de très nombreuses radicelles, permettant l'encrage sur ce substrat plus grossier, Fig. 10.

Fig. 10 – Photographie des systèmes racinaires de tomates de C2S1 en bas et T en haut. L.B le 20/08/18 à St-Germain-en-Laye

- Aptitude à la réhumectation

Les manipulations effectuées dans cette partie fournissent deux informations présentées en Fig. 11 :
- Des données sur le caractère rétenteur des substrats, via le calcul de capacité au champ des matériaux (capacité de rétention maximale en eau), présentées par les courbes « CC », en pointillés
- Des données sur la capacité du substrat à se réhumecter, via l'analyse des teneurs en eau d'échantillons soumis à une série d'irrigations consécutives à un épisode de fort dessèchement (courbes en trait continu, Fig. 11).

Capacité au champ

Les tests présentés ici montrent que LC1S1 et T sont les matériaux les plus rétenteurs en eau, (CC > 60 % sur la Fig. 11), tandis que C2S1 présente la capacité au champ la plus faible, proche de 40%. Enfin, les autres substrats ont tous une CC intermédiaire, comprise entre 50 et 60% du volume. Notons que ces valeurs sont en accord avec celles mesurées par le laboratoire AUREA.

Aptitude à la réhumectation

Un substrat supportant bien la sécheresse doit retrouver (rapidement) ses capacités de rétention maximales après un fort dessèchement, c'est-à-dire, qu'après un épisode de déshydratation, une irrigation doit suffire pour que le volume d'eau contenu dans le substrat égale sa CC. D'après (Fields et al., 2014), si après 10 arrosages de 5 minutes la capacité au champ n'est pas atteinte, le substrat ne

RAPPORT INTERMEDIAIRE - NE PAS DIFFUSER

retrouvera jamais ses propriétés initiales, quel que soit le volume et le nombre d'arrosages mis en œuvre.

Comme établi par (Michel et al., 2017) nous pouvons classer les 11 substrats dans 4 grands groupes (le groupe « A » n'est pas présenté dans ce rapport).

Le groupe B, rassemble les substrats C1S1, C3S1, C3S2 et LC2S1, des matériaux à tendance hydrophobique, lentement réversible. Ils sont dits hydrophobes car ils n'acceptent que partiellement l'eau apportée lors des premiers arrosages. Mais cette hydrophobie est jugée « lentement réversible » dans la mesure où ces matériaux retrouvent leurs capacités initiales après 7 à 8 épisodes d'irrigation. Soit 7x5=35 minutes d'arrosage (débit 2,4 L/h). Ce sont des substrats à surveiller, pour lesquels un dessèchement n'est pas souhaitable, mais pourrait être corrigé.

Le groupe C se compose des mélanges LC1S1 et C2S1, qui peuvent être dits hydrophobes quasi-réversibles, car après 10 épisodes d'irrigation, les substrats sont très proches de leur état initial mais ne ré-atteignent pas complètement leur CC. Un épisode de sécheresse entraîne une perte irréversible de 5 à 7% des aptitudes. Ce sont des matériaux à risques, mais le risque reste modéré.

Le groupe D, rassemble les substrats T et C3, ceux-ci sont dits hydrophobes irréversibles, en effet après 10 irrigations ils restent bien en deçà de leur capacité maximale de rétention. Après une forte dessiccation, ces matériaux perdent environ 20% de leurs aptitudes, de manière définitive. Ce sont des matériaux à risque pour lesquels une erreur de pilotage de l'irrigation peut avoir des conséquences importantes.

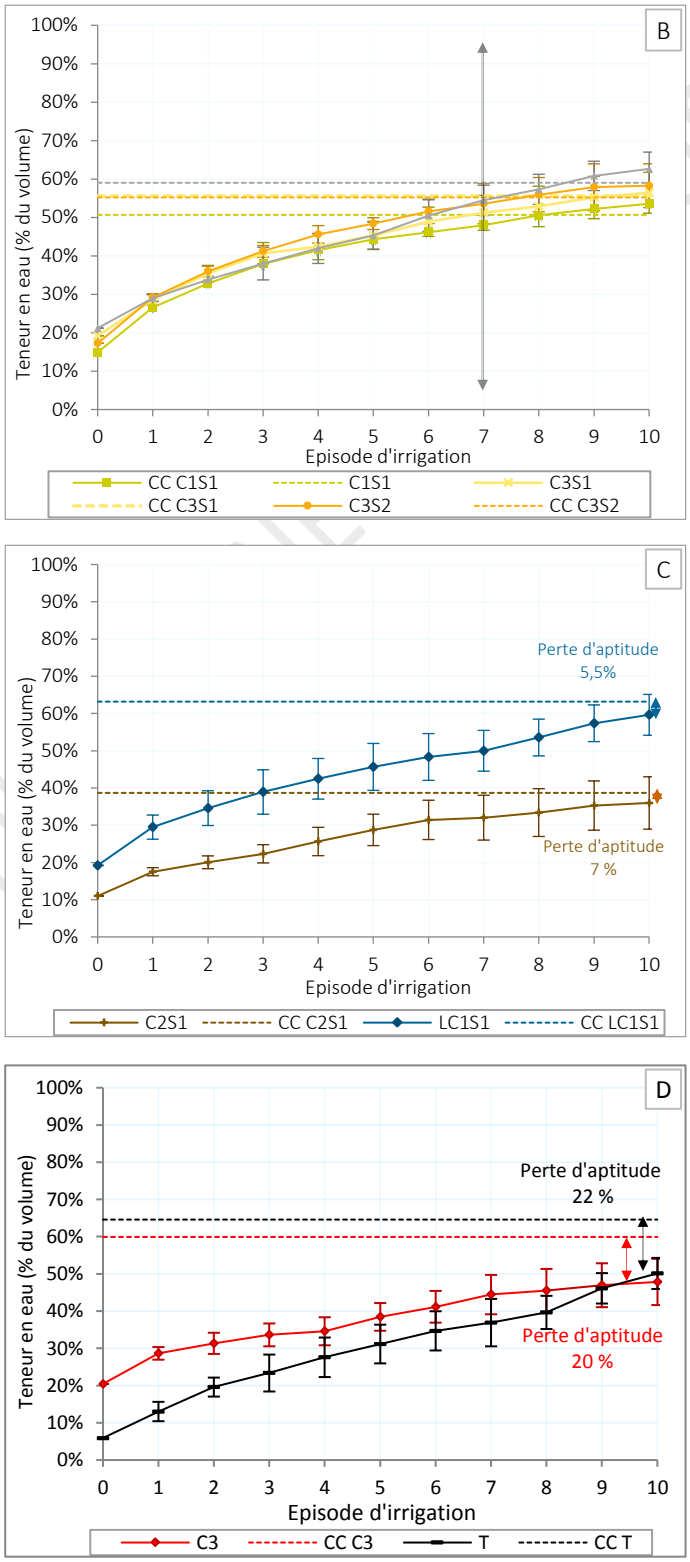


Fig. 11 - Cinétiques de réhydratation des substrats à la suite d'un fort épisode de dessèchement (taux d'humidité initial 30%), représentées par les courbes en trait plein. Droites en pointillés : capacité maximale de rétention des substrats.

RAPPORT INTERMEDIAIRE NE PAS DIFFUSER

3.1.1.2 Caractéristiques mécaniques

- Masse

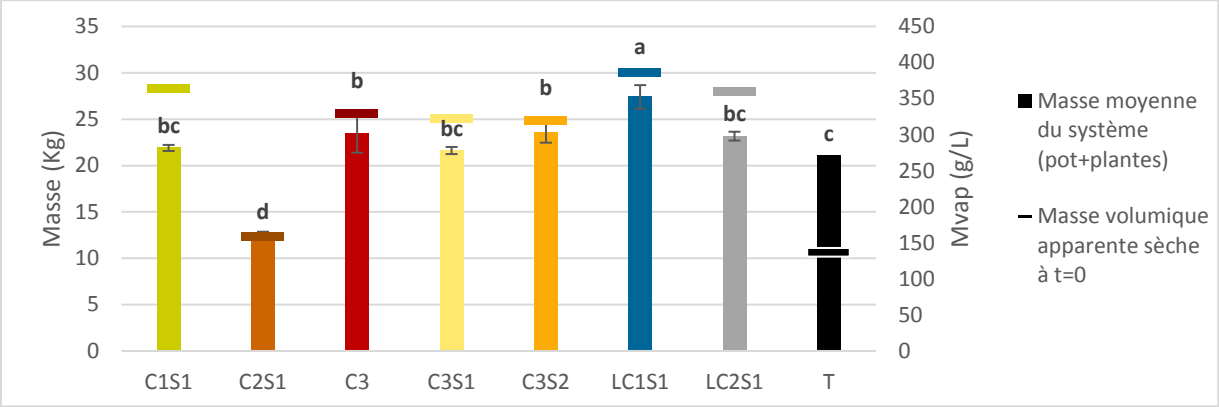


Fig.12 - Axe principal : Masses moyennes du système [pot + végétaux] en fin de culture, conduit sur une répétition (n=3)Axe secondaire : Données de masse volumique apparente sèche obtenues en laboratoire sur des échantillons pris à t=0.Tests statistiques : Shapiro-Wilk : p-value= 0.001 – Bartlett : p-value=0.06 - Kruskal-Wallis p-value = 0.006

Analyses de laboratoire

Les substrats à base de (lombri)composts sont beaucoup plus lourds que la majorité des matériaux horticoles, qui sont conçus et sélectionnés entre autres pour leur légèreté. Ici nous observons majoritairement des M_{vap} entre 300 et 360 g/L, deux fois plus importantes que le témoin. Seul le mélange C2S1 a une densité initiale similaire au mélange T (environ 150 g/L).

Résultats in-situ

Au terme des 13 semaines de culture, une pesée du système complet [pot + plante], après mise à saturation (40 minutes à 8L/h), permet de donner une idée de la charge maximale que de telles installations pourraient représenter in-situ[17]. Nous nous plaçons en effet dans le cas d'un développement maximal du végétal, avec fructification, et d'un épisode d'irrigation très important.

Les différences de masses entre les 8 modalités sont significatives(p-value=6.18e-13). Les valeurs varient du simple au double entre les extrêmes. Les pots C2S1 sont les plus légers, avec 12.6 kilos/pot en moyenne, tandis qu'un pot rempli du mélange LC1S1 peut peser jusqu'à 29 kilos.

Tous les autres pots pèsent entre 20 et 25 kilos en fin de culture. Le témoin horticole, initialement très peu dense, est compris dans cet intervalle, du fait d'un très fort développement des plants.

C2S1 est plus léger, d'une part car il permet un développement végétatif plus faible (point présenté par la suite) mais surtout en raison de son caractère peu rétenteur en eau.

L'intégration de béton cellulaire dans le compost C3 permet d'alléger le mélange (- 3kg/pot en moyenne pour C3S1 par rapport à C3), tandis que l'ajout de bois semble sans effet. Les tests statistiques indiquent qu'il n'existe pas de différence significative entre ces 3 modalités.

- Volume - Mesures de l'effondrement

L'effondrement est estimé par une mesure du niveau de la surface du substrat en fin de culture. Cette donnée permet d'estimer le pourcentage de substrat total « perdu » en une saison.

En 12 semaines de cultures, les variations de volumes sont très faibles pour l'ensemble des modalités testées (entre -0.86% et -3.85%). Les mesures confirment le léger abaissement de la surface des supports de culture C2S1 et C1S1, visible à l'œil nu (perte de moins de 4% du volume total). En revanche le substrat de lombricompost à base de purins n'a pas du tout été affecté par la culture (0.86% du volume perdu).

[17]Des mesures de charge à Capacité Maximale en Eau (CME) seraient nécessaires pour obtenir des données plus solides.

RAPPORT INTERMEDIAIRE NE PAS DIFFUSER

3.1.2 Caractérisation chimique

3.1.2.1 pH, EC et CEC

Le pH (potentiel hydrogène) et l'EC (électro conductivité) sont des paramètres qui permettent de caractériser des solutions. Dans le cas d'un substrat, elles donnent une indication sur les propriétés et la composition de la phase liquide du milieu.

Le pH mesure l'acidité d'une solution, paramètre qui détermine l'assimilabilité des éléments minéraux par la plante. Globalement, les mélanges à base de résidus organiques ont tous un pH dépassant la neutralité. C3S2 et C3 ont des pH légèrement inférieurs à 8, tandis que tous les autres oscillent de 8.2 à 8.5 (pour le lombricompost de fumier). Le témoin en revanche a un pH de 5.85.

La conductivité électrique (EC) caractérise l'aptitude d'un matériau à permettre le passage d'un courant électrique, transmis par des ions. Les valeurs d'EC dépendent de la concentration et de la nature des ions présents. Dans notre cas, la mesure de l'EC donne une indication sur le pool d'ions dans la phase liquide des substrats, sans pour autant permettre de les caractériser finement.
La conductivité des substrats créés varie entre 1.4 mS/cm pour C2S1, et 0.65 mS/cm pour C1S1. Le témoin affiche une EC bien supérieure de 2.4 mS/cm

	EC (mS/cm)
C1S1	0,65
LC2S1	0,77
LC1S1	0,88
C3	0,99
C3S2	1,04
C3S1	1,17
C2S1	1,37
T	2,36

La CEC (capacité d'échange cationique) correspond à la quantité totale de cations qu'une matrice peut fixer puis restituer au milieu, dans des conditions de pH spécifiques. Dans un sol, ces cations (K^+, Ca^{2+}, Mg^{2+}, Na^+) se fixent à la surface des argiles et des matières organiques, à leur libération, ils sont disponibles pour la plante.
Le témoin affiche la CEC la plus importante et C2S1 la plus faible. On note que l'ajout de béton cellulaire abaisse la CEC du compost C3 (-13cmol+/kgen moyenne pour C3S1), tandis que l'ajout du bois induit peu de variations (la CEC de C3S2 est proche de C3).

	CEC (cmol+/kg)
C2S1	40,50
LC1S1	55,06
C3S1	57,76
C1S1	60,93
LC2S1	64,46
C3S2	65,20
C3	70,07
T	74,83

3.1.2.2 Composition en macroéléments

- Concentration en Azote Phosphore et Potassium

Les deux composts de DA et DV affichent les plus importantes teneurs en azote.

Le lombricompost de fumiers, le compost C1 et le témoin ont des taux beaucoup plus faibles. Les moindres teneurs en Ndans C3S1 et C3S2 et LC2S1 par rapport à C3 sont dues à l'introduction d'agents structurants, moins riches en azote.

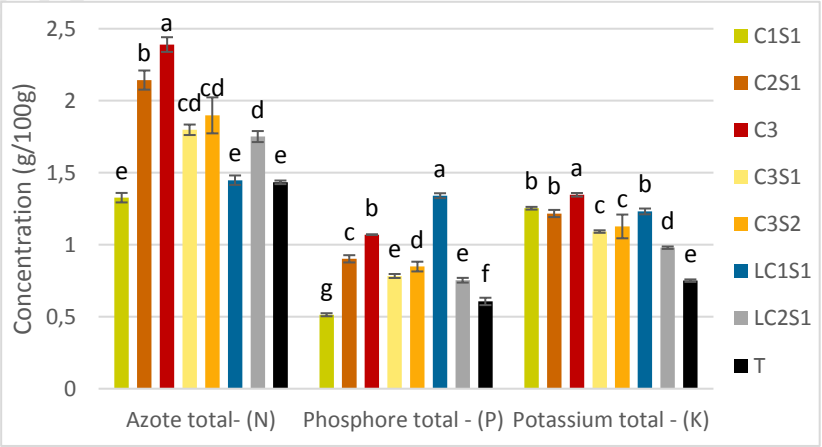


Fig. 13–Teneurs en éléments majeurs NPK dans les substrats (sur MS). Test statistiques : Fisher : N p_{value} = 3.36e-11/P p_{value} = 4.19e-16/K p_{value} = 9.97e-11

Concernant les autres éléments : le lombricompost de fumier (LC1S1) contient beaucoup plus de phosphore que tous les autres substrats, dont la distribution générale est identique à celle observée pour l'azote.

Le potassium est significativement plus concentré dans le compost C3. Tous les autres matériaux montrent des teneurs assez proches les unes des autres, à l'exception du témoin, qui contient presque 2 fois moins de potassium que la moyenne des autres mélanges au moment de la prise de mesure.

RAPPORT INTERMEDIAIRE - NE PAS DIFFUSER

- Concentrations en Azote sous ses diverses formes

Les données présentées concernant les teneurs d'azote doivent être nuancées, car tout l'azote présent dans le milieu n'est pas nécessairement disponible pour la plante. De fait, nous distinguons ici les concentrations en azote sous forme nitrique (NO_3^-) (parties inférieures des histogrammes empilés Fig. 14), directement assimilable par la plante, de l'azote sous forme ammoniacale ($NH4^+$) (parties hachurées Fig. 14) qui constitue plutôt une réserve mobilisable après minéralisation.

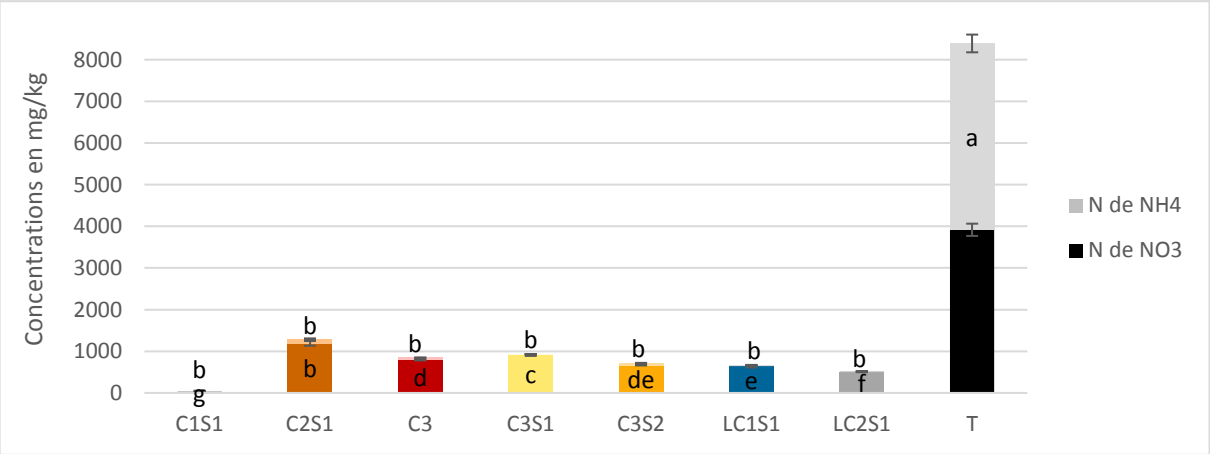


Fig. 14 – Teneurs en azote sous ses diverses formes dans les substrats.
Tests statistiques : Kruskal-Wallis test : NO3 p_{-value} =0.003 / NH4 p_{-value} = 0.002

Les teneurs en N de NO3 et N de NH sont beaucoup plus importantes pour le témoin que pour les autres modalités. Ces résultats diffèrent de ceux présentés en Fig. 13, concernant le N tot. Les substrats à base de biodéchets contiennent donc une importante fraction d'azote sous une forme autre que les formes nitriques et ammoniacales.

Concernant la répartition $NH4^+$ $NO3^-$, le témoin affiche 4400mg/kg de N de NH4 et presque 4000mg/kg de N de NO3, assurant une bonne disponibilité en azote directement assimilable et une réserve importante.

Les substrats à base de résidus urbains affichent des disponibilités en azote directement mobilisable 100 fois plus faibles. Avec des différences significatives entre le substrat C2S1 qui contient 1 100 mg/kg d'azote directement mobilisable et les autres substrats qui ont des teneurs plus faibles. C1S1 quant à lui contient seulement 6 mg/kg de N de NO3.

Mesures in-situ

Les teneurs en $NO3^-$ mesurées directement dans les substrats, 2 semaines après la mise en place du système (plantes encore peu développées), sont proches de celles des analyses de laboratoire. Des mesures in-situ, avec du matériel adapté, pourraient donc suffire pour appréhender ce paramètre de façon plus pratique et immédiate.

RAPPORT INTERMEDIAIRE

3.1.2.3 Evaluation in-situ des effluents de percolation

L'analyse des eaux de percolation donne une idée des propriétés de la fraction liquide des substrats, mais vise surtout à évaluer les rejets, pollutions, générés par le système mis en place.

Les premiers lixiviats des modalités composées de biodéchets ont des pH élevés, entre 7.5 et 8, en cohérence avec le caractère basique des substrats, démontré par les analyses laboratoires. Le pH a tendance à diminuer au cours du temps, avec des pH compris entre 7 et 7.5 en fin de culture.
A l'inverse, les pH mesurés dans les lixiviats du témoin, globalement plus faibles (entre 6.5 et 7), ont tendance à s'élever au cours du temps.

A la première percolation, les conductivités des lixiviats sont hautes, pour tous les substrats : entre 4 et 12 mS/cm. C3S1 et LC1S1 drainent des eaux plus chargées en éléments que C1S1 et le lombricompost de biodéchets.

Les valeurs d'EC baissent fortement jusqu'en semaine 5, où elles se stabilisent autour de 1 mS/cm jusqu'à la fin des observations.

Les données de teneurs en nitrates, ions négatifs contribuant à la charge électrique globale du milieu, sont cohérentes avec les valeurs d'EC relevées aux mêmes dates.

Globalement, nous observons une diminution de la charge en nitrates dans les lixiviats au cours des semaines, mis à part pour le substrat C1S1, qui en rejette continuellement de très faibles taux.

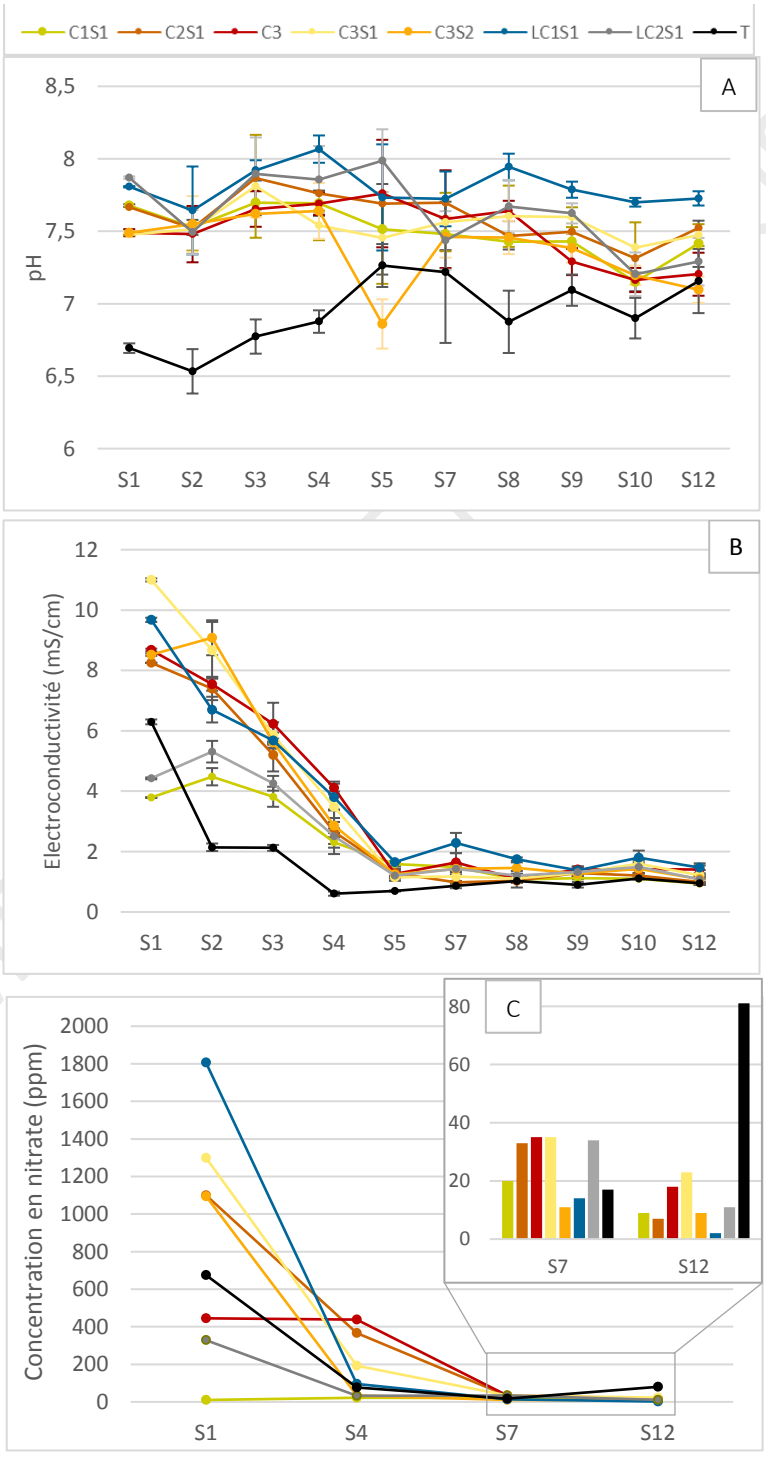


Fig. 15 – Evolution des paramètres chimiques des effluents de percolations générés par les substrats au cours du temps. (A) Valeurs de pH ; (B) Valeurs d'électro conductivité ; (C) Teneurs en nitrates

Il semble que les pots de substrat LC1S1 perdent toutes leurs réserves de $NO3^-$ dans les premières semaines. Nous n'observons pas de différences notoires entre les variantes de la modalité C3 (C3S1/C3S2). Enfin notons qu'en S12 le témoin perd davantage de nitrates que les autres substrats, attestant de réserves azotées encore importantes par rapport aux mélanges de déchets.

RAPPORT INTERMÉDIAIRE

3.1.3 Caractérisation biologique

L'une des spécificités des mélanges mis en œuvre ici est qu'ils contiennent une réserve nutritive d'origine organique. Ces matières doivent subir une dégradation avant d'être disponibles pour la plante ; étudier leur nature et leur comportement apparaît donc essentiel pour l'analyse des capacités agronomiques de tels mélanges.

Note : les analyses de MO et ISB ont été réalisées par le laboratoire AUREA sur 1 seul échantillon. Les méthodes mises en œuvre nécessitent un tamisage des matériaux, écartant les agents structurants. Les valeurs fournies correspondent donc aux produits C1, C2, C3 LC1 et LC2 plutôt qu'aux mélanges.

3.1.3.1 Le pourcentage de matières organiques MO

Le témoin et le compost C2 ont des teneurs en MO très élevées, respectivement 90 % et 80 % de la matière sèche. Les autres produits contiennent entre 40 % et 45 % de MO. Enfin, il n'y a pas de différence notable entre les lombricomposts et composts.

	MO (%MS)
C1	40,44
LC2	40,85
LC1	44,42
C3	46,32
C2	81,36
T	89,02

3.1.3.2 Le rapport C/N

Le rapport entre les concentrations en carbone organique (Corg) et en azote total (Ntot) est un critère de qualité important pour les matières fertilisantes d'origine organique. En effet, C et N doivent être présents dans des proportions équilibrées, et avoir des cinétiques de dégradation équivalentes, pour que la décomposition de la MO stimule l'activité microbienne de manière bénéfique pour les plantes. Les analyses de laboratoire des échantillons initiaux indiquent que :

- Les substrats composés de DA + DV (C3, C3S1, C2S1 et LC2S1) ont des C/N proches de 10.
-LC1S1 a un C/N légèrement plus élevé de 13.4.
L'introduction de plaquettes forestières dans le compost C3 porte la valeur du C/N de mélange C3S2 à 16. En effet les matériaux ligneux sont très riches en carbone.
-C1S1 présente le C/N le plus élevé des matériaux recyclés (autour de 17).
- Enfin, le témoin a un C/N de 31.6, quand la littérature rapporte un rapport de 30 pour la tourbe noire.

3.1.3.3 L'indice de Stabilité Biologique ISB- ISMO

L'ISB estime le pourcentage de matière organique susceptible de résister à la dégradation. Ainsi, plus sa valeur est élevée et plus le potentiel amendant de la MO du produit est important. A l'inverse, un ISB faible est synonyme de dégradation rapide de la matière.

Les produits analysés sont classés dans l'ordre suivant : LC2=0.77 < C1=0.78 < C3=0.84 < C2 =0.86

Ces valeurs sont très proches les unes des autres. Elles classent les produits testés dans la catégorie des amendements organiques plus que des engrais organiques. Les échantillons T et LC1 ont été jugés non adaptés au calcul de l'ISB par le laboratoire (leur analyse renvoyant des valeurs supérieures à 1).

3.1.3.4 Développement de la vie du sol

A l'installation du système, seul le lombricompost LC2S1 était colonisé par des vers.

Lors des prélèvements de lixiviats, il a été constaté la présence systématique de lombrics dans les coupelles remplies d'eau (1 à 4 individus en moyenne), pour plusieurs modalités, laissant présager un fort développement de la faune.

En fin de culture, la recherche des vers épigés du genre Eisenia (et de leurs œufs) a montré que la plupart des substrats n'étaient pas colonisés. En effet, sur n=4 échantillons de 1 709 cm^3 prélevés par modalité, nous avons dénombré en moyenne : 4 vers, dans les pots de la modalité LC2S1 comprenant du lombricompost issu d'un mélange DA + DV, 2.5 vers dans les pots de la modalité C1S1 et aucun œuf dans les deux cas. Les pots des autres modalités ne contenaient aucun lombric.
Notons enfin une forte présence de cloportes dans les pots de la modalité C2S1 et deux larves de hannetons dans un des 3 pots du substrat témoin.

RAPPORT INTERMEDIAIRE – NE PAS DIFFUSER

3.2 Evaluation du potentiel productif

3.2.1 Cinétique de développement

3.2.1.1 Mesures de hauteurs et diamètres

- Tomates

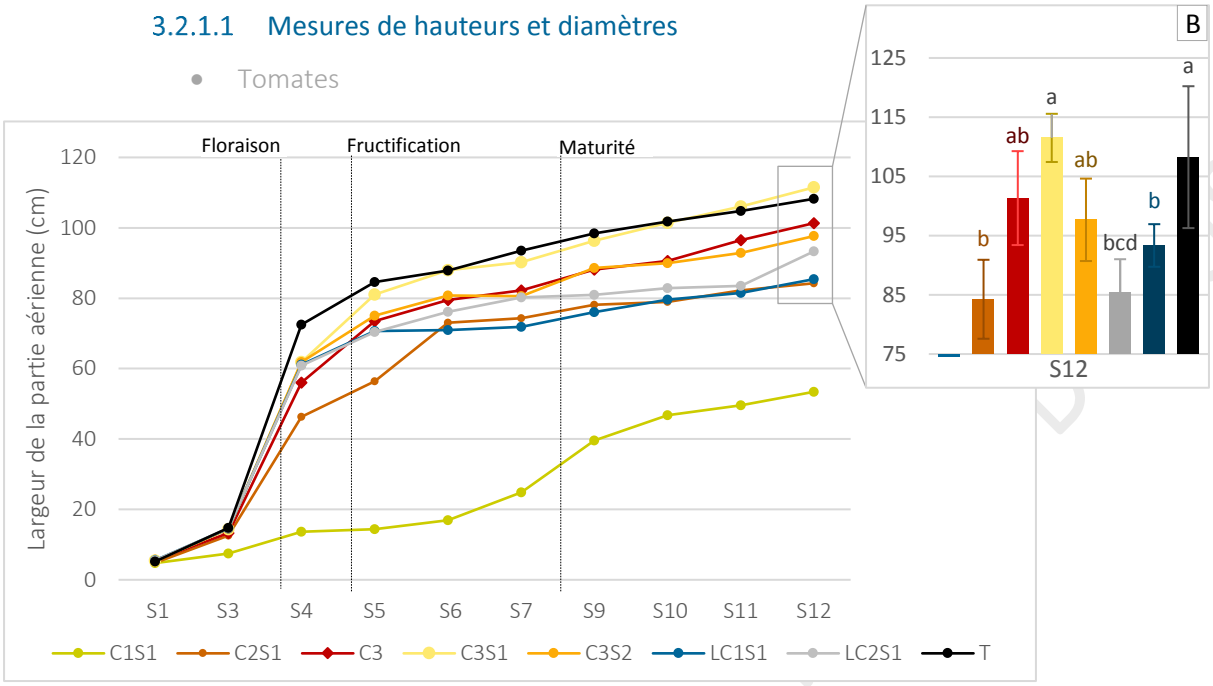


Fig. 16 - Cinétique de croissance des tomates. (B) Zoom sur les dernières valeurs de mesures. Tests statistiques pour la S12 : Shapiro-Wilk test : p-value =0.44 - Bartlett test : p-value =0.51 - Fisher test : p-value : 6.28e-06

Le traitement statistique des données indique une différence significative de croissance dès la troisième semaine (Voir détail ANNEXE IX). Alors que toutes les plantes amorcent leur développement, les tomates plantées sur le substrat C1S1 restent bloquées. Entre les semaines 3 et 4, on note une très forte croissance (+ 40 cm de diamètre en moyenne) pour toutes les modalités, sauf pour C1S1. Les écarts continuent de se creuser jusqu'en semaine 7, où les tomates C1S1 commencent leur développement. En fin de culture, les tomates des substrats C3S1 et T ont un diamètre significativement plus important que les lombricomposts et le substrat C2S1 (voir zoom, Fig. 16). Enfin, en 12 semaines, les tomates de la modalité C1S1 n'ont pas rattrapé leur retard de croissance.

- Basilic

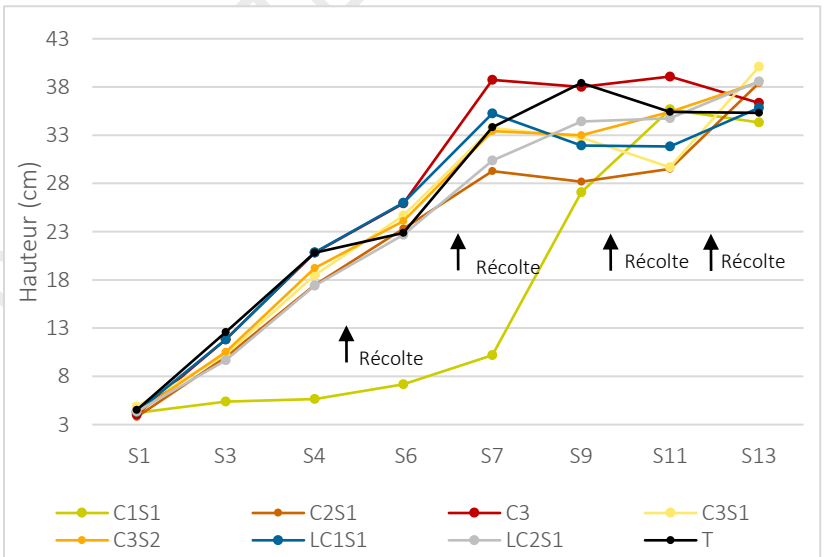


Fig. 17 - Cinétique de croissance des basilics durant 12 semaines de culture. Note : les points de mesure pris après les tailles n'apparaissent pas sur ce graphique.

Les basilics ont été récoltés 4 fois en 12 semaines.

La première récolte a eu lieu dès que les plants les plus développés ont nécessité d'être taillés (basilics des modalités T et C3 à 20 cm de hauteur). Par la suite, les récoltes ont été déclenchées lorsque la majorité des pieds étaient prêts à monter à graine (soit autour de 30-40 cm). De fait la conduite des récoltes des aromatiques n'a pas été optimale (les pieds très poussants ont souvent été récoltés trop tard).

Comme pour les tomates, le graphique met en avant le blocage de croissance sur le substrat C1S1 jusqu'en semaine 7. A partir de cette date nous notons une pousse très rapide des plants de basilic qui atteignent le même niveau de croissance que les autres plants en S12, contrairement aux tomates, dont le cycle de développement est plus long.

Pour les autres modalités, nous observons une homogénéité dans le développement jusqu'à la deuxième récolte, à partir de laquelle les résultats sont plus épars. Sur l'ensemble de la saison le substrat C3 semble permettre une meilleure croissance, mais les différences ne sont pas nettes.

Enfin, il faut noter que le critère hauteur est peu adapté pour évaluer le basilic qui est une plante à port en touffe. L'obtention de plants de grande hauteur n'est pas forcément synonyme de qualité. Le recouvrement semble un critère plus adéquat pour rendre compte du développement des plantes.

3.2.1.2 Evaluation du recouvrement

La prise de photographies hebdomadaires permet de bien appréhender l'évolution des deux variétés sélectionnées au cours du temps. En Fig. 18, les photographies montrent de manière très nette le retard de développement de C1S1. La planche de photographies complète (ANNEXE VIII) permet de constater que le caractère ramifié et couvrant des tomates est beaucoup plus marqué pour les plants du substrat horticole témoin par rapport à tous les autres substrats.

Fig. 18 - Compilation de photographies permettant d'apprécier le développement végétatif des plantes via le critère recouvrement (clichés des semaines 1,2,4,5 et 6). Sur la ligne du haut, la modalité C1S1, en bas C3S2.

3.2.2 Evaluation de la production

3.2.2.1 Production de tomates

- Masses totales récoltées

Les données présentées en Fig. 19 correspondent aux résultats obtenus sur 4 récoltes.
La première récolte a eu lieu le 9 juillet, soit près de 8 semaines après la mise en culture, puis les fruits ont été récoltés chaque semaine.
La production totale sur cette période va de 9,5 kilos (soit 791.6 g/pied en moyenne) pour la modalité la plus productive : LC1S1, à 226 g (soit 18.8 g/pied) pour la modalité C1S1, la moins productive.

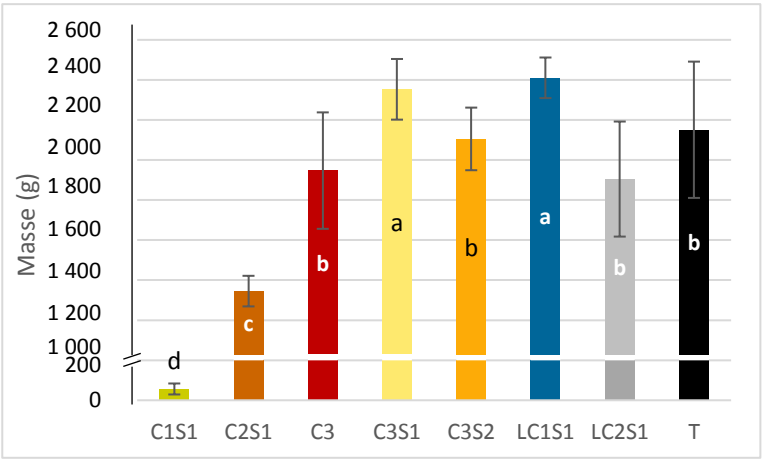


Fig. 19 - Production totale de tomates cerises en 12 semaines, par unité expérimentale. Tests statistiques : Kruskal-Wallis test : p_{-value} =0.0027 - Post-hoc Nemenyi test pour la formation des groupes (détails en ANNE IX).

RAPPORT INTERNE PAS DIFFUSER

Les tests statistiques indiquent que le lombricompost à base de fumier et le compost de déchets alimentaires C3 en mélange avec du béton cellulaire (C3S1) donnent les meilleurs rendements. Ils se placent devant le témoin horticole, dont le rendement moyen est de 707 g/pied, valeur proche des substrats C3, C3S2 et LC2S1, tous issus du même site de production et constitués des mêmes matières entrantes.

La modalité C2S1 donne des rendements bien moindres, avec 438 grammes de tomates par pied en moyenne, presque la moitié de la modalité la plus productive. Enfin, les rendements de C1S1 sont quasi nuls, avec une vingtaine de fruits récoltés au terme des 12 premières semaines.

L'introduction d'une fraction structurante minérale dans le compost C3 semble permettre d'obtenir de meilleurs rendements (+2 kg en cumulé pour C3S1 par rapport à C3). Le substrat C3S2, avec la fraction structurante organique paraît également plus productif que le compost seul, mais sans que les différences ne soient significatives. Le lombricompost de biodéchets a un niveau de production équivalent aux modalités C3 et C3S2, constituées de compost de biodéchets ayant la même origine.

Les conclusions formulées sont à nuancer par rapport à la temporalité de cette étude. Comme le montre la Fig. 20, la modalité T affiche un des rendements les plus faibles en R1 et R2 mais les plus élevés en R4.

La maturation des fruits a été plus longue mais les rendements en fin de production devraient être plus importants.

Enfin notons que la productivité augmente au cours du temps pour toutes les modalités sauf C2S1 qui stagne à partir de la R3.

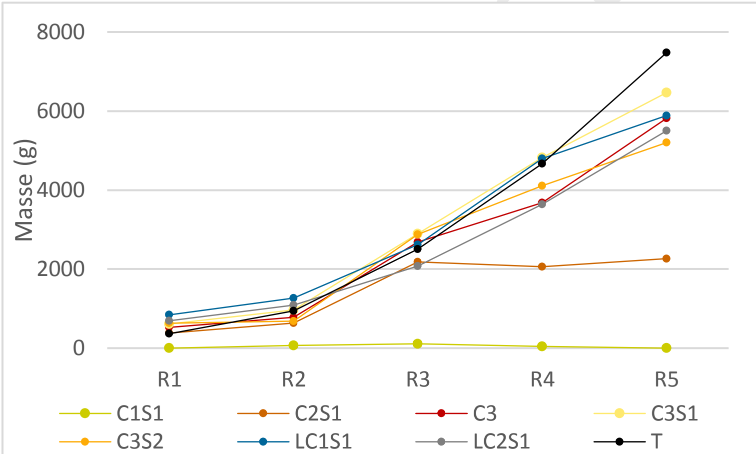


Fig. 20- Cinétique d'évolution de la production de tomates sur 13semaines, suivant les modalités de substrats.

- Nombre de fruits récoltés

Si l'on considère la performance en nombre de fruits produits, LC1S1 reste le plus productif, avec 50 tomates récoltées par pied en moyenne, soit 10 fruits de plus que la majorité des autres modalités

Le nombre de fruits récoltés sur le substrat témoin est significativement plus faible (30 tomates/pied en moyenne).

A contrario, la modalité C2S1 a un rendement en masse très faible, mais produit beaucoup de tomates. Avec 41 fruits/pied, elle se place au même niveau que C3S2 ou LC2S1.

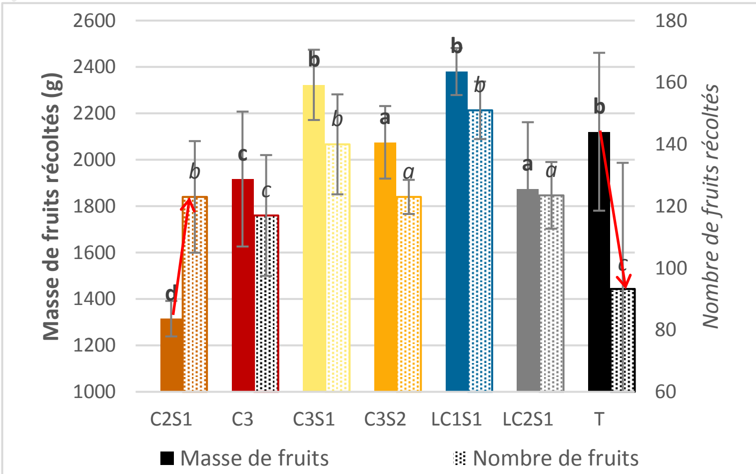


Fig. 21 - Productivité moyenne par unité expérimentale, en 12 semaines, suivant deux critères : la masse totale de la production (aplats de couleurs) et le nombre total de fruits produits (pointillés)

La Fig. 21 met en avant les deux modalités pour lesquelles les résultats de productivité en masse et en nombre de fruits diffèrent le plus. Le substrat horticole a produit des fruits plus gros, avec un temps de maturation plus long, engendrant un décalage de la récolte d'environ 2 semaines.

- Critères de qualité

Uniformité de la récolte

Toutes modalités confondues, l'espèce de tomate 'Donna F1' produit majoritairement des fruits de catégorie 2 et 3 (75 % de la production totale). Il ressort de la Fig. 22 que :

-C2S1 produit majoritairement des fruits de catégorie 2, ce qui correspond à un petit calibre, tandis que le témoin donne de gros fruits.
-C3 a la production la plus homogène, avec plus de 60% de fruits d'un même calibre, tandis que les fruits produits sur le substrat C3S1 sont également répartis entre les catégories 2 et 3.
L'introduction de l'agent structurant, en modifiant la rétention en eau du substrat, pourrait jouer sur la taille des fruits.

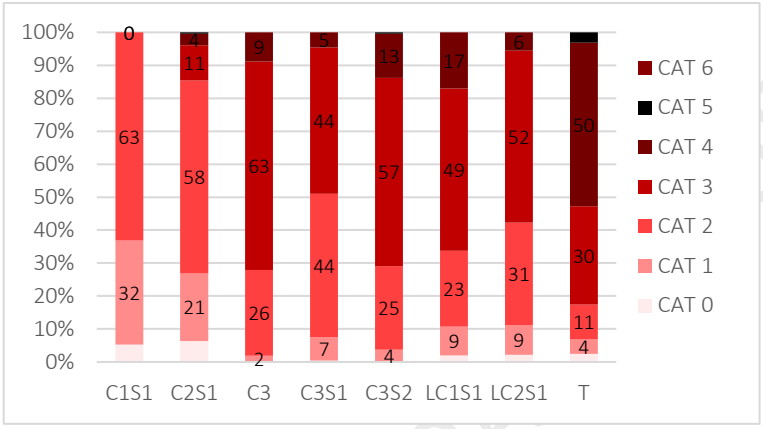


Fig. 22 – Représentation graphique des résultats de calibrage des tomates. Voir détail des catégories en ANNEXE VI

Les données concernant la modalité C1S1 se basent sur le faible nombre de fruits récoltés. De fait, les proportions renseignées ne sont pas réellement représentatives du potentiel de ce substrat.

Qualités visuelles des fruits

Tous les fruits ont été récoltés à maturité complète. Sur l'ensemble des modalités, nous avons pu noter des petites imperfections sur les fruits (crevasses cicatrisées, microfissures, petits points de couleur jaune). Ces défauts auraient pu être de nature à déclasser certains fruits, dans l'optique d'une commercialisation avec des exigences très strictes, mais pas à les rendre impropres à la consommation.
Les tomates de la modalité T ont montré d'importants défauts de maturation tout au long de la culture. La zone pédonculaire des fruits restait ferme, même après mûrissement, avec une coloration jaune-orangée. Enfin, notons une qualité dégradée des fruits en fin de culture, particulièrement sur cette modalité (plus de fruits éclatés).

Fig. 23 – Défaut de mûrissement sur tomates de la modalité témoin. LB le 08/08/18 à St-Germain-en- Laye

3.2.2.2 Production de basilic

- Masses totales récoltées

Les résultats présentés se basent sur la somme des 4 récoltes menées au cours des 12 semaines de culture. La première récolte a eu lieu environ un mois après la mise en pot et les suivantes périodiquement tous les 15 à 20 jours.

Comme laissaient à penser les données de croissances Fig. 17, la modalité C3 permet un développement de basilic bien plus important que tous les autres mélanges. Les rendements sont identiques à ceux du témoin horticole, viennent ensuite le lombricompost à base de fumier, puis les autres substrats.

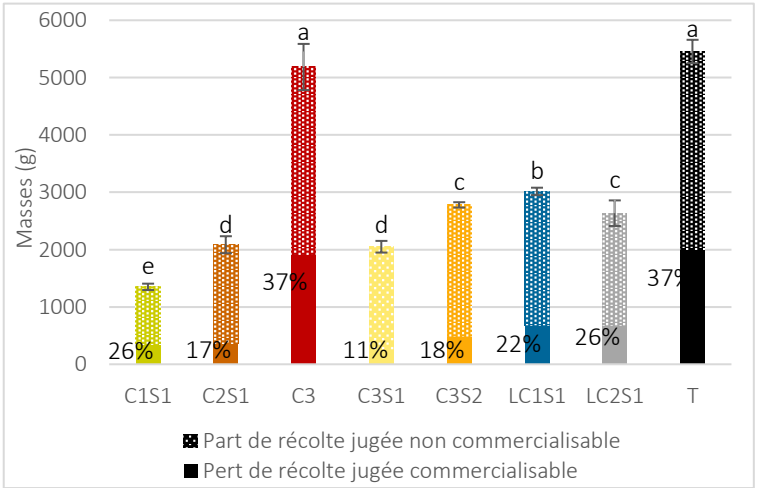


Fig. 24 - Masses totales cumulées de récolte de basilics sur 4 récoltes (en MF). Tests statistiques : Hypothèses du modèle linéaire non vérifiées. Kruskal-Wallis test p-value = 2.191e-05, puis test post-hoc de Nemenyi

RAPPORT INTERMEDIAIRE – NE PAS DIFFUSER

La faible masse totale fournie par la modalité C1S1 vient du retard de développement des plans installés sur cette modalité, dès le début de la culture.

L'ajout d'une fraction structurante ne semble pas bénéficier à la culture du basilic, au contraire, la modalité C3, composée uniquement de compost, donne les meilleurs rendements.

- Critères de qualité

Aspect visuel

En pointillés sur la Fig. 24, apparaissent les fractions des récoltes jugées non commercialisables. En effet, la majorité des basilics produits, malgré un développement foliaire important, ont montré des défauts (décoloration, trous, taches, dégâts occasionnés par des ravageurs). A l'étape du tri, toutes les branches présentant un défaut ont été écartées, mais la majorité restait consommable.

Il faut noter par ailleurs que les conditions de culture n'étaient pas optimales pour le basilic, qui est une plante aromatique de mi-ombre, ici cultivée en extérieur, avec des températures et une exposition au soleil particulièrement importantes tout au long de la saison de culture (voir données météo (Fig. 4)). Cependant, toutes les modalités ayant subi ces conditions, la comparaison des niveaux de qualité reste possible.

Les substrats T et C3 paraissent produire plus en quantité, mais aussi en qualité avec près de 40 % de la production jugée commercialisable en moyenne. De fortes différences de colorations ont été notées entre les basilics témoins, verts sombres, ceux du substrat C3 s'en rapprochant et toutes les autres modalités, beaucoup plus jaunes. Voir planche photos en ANNEXE VIII.

Teneurs en eau

Les calculs de matière sèche, menés sur les basilics, nous permettent d'évaluer la teneur en eau de ces aromatiques. Les proportions sont homogènes, toutes comprises entre 83 % d'eau en moyenne pour C2S1 et 88 % pour les basilics de LC1S1. Enfin, les basilics C1S1 affichent les taux d'humidité les plus hauts (avec 88.4 % d'eau en moyenne). Notons cependant que lors de cette mesure, les plants C1S1 démarraient seulement leur croissance, tandis que les autres avaient déjà subi plusieurs tailles.

3.3 Evaluation des substrats in-situ – aspects pratiques

3.3.1 Conception des mélanges

A la mise en place du système le mélange des matériaux parents a fait émerger les points suivants :
La granulométrie grossière du compost C2 rend le mélange avec le béton cellulaire plus compliqué, pouvant aboutir à un produit fini moins homogène.
À l'opposé, les matériaux de la modalité C1S1 se mélangent aisément. Le substrat obtenu est coloré, diversifié et bien équilibré. Il présente un attrait visuel notable.

3.3.2 Sensibilité aux ravageurs

Sur la totalité de l'essai, les tomates ont connu deux attaques généralisées : de pucerons en semaine 2, puis de doryphores en semaine 6, toutes deux stoppées par l'utilisation de produits de biocontrôle. Les limaces et escargots ont également causé quelques dégâts sur les basilics de plusieurs modalités (LC2S1, C3, C3S1 et C2S1). Ces attaques n'étant pas ciblées, nous ne tirons pas de conclusion quant à la sensibilité d'un ou des substrat(s) en particulier.

En semaine 5, des traces de mildiou ont été relevées sur certains pieds de tomates. Six individus ont été particulièrement touchés, sur les modalités T (2 pieds), C3S1(2 pieds) et C3 (1 pied). Dans les pots de la modalité T, la composition fibreuse du substrat couplée au très fort développement foliaire des tomates a pu favoriser la mise en place d'un milieu humide, propice au développement de la maladie. Pour C3S1, les pots attaqués étant tous accolés les uns aux autres, il semble qu'il s'agisse davantage d'une attaque localisée, non reliée à la composition du substrat.

3.3.3 Développement des adventices

Seul le substrat LC1S1 a montré un développement d'adventices significatif. Elles ont été arrachées au stade de plantules au fur et à mesure de leur apparition. Une fois les cultures bien implantées, aucun désherbage n'a été nécessaire.

RAPPORT INTERMEDIAIRE - NE PAS DIFFUSER

Le 3 août, la pression adventice a été jugée plus importante et de nature à gêner les cultures en place. Un désherbage général a été effectué, avec comptage des adventices.

Le comptage confirme les observations, le lombricompost LC1S1 est colonisé par 8 fois plus d'adventices que les autres substrats (total de 83 individus sur 12 pots). Ensuite viennent le témoin (16 individus) et le lombricompost de DA+DV (LC2S1) (12 individus). Sur les autres modalités en 5 et 7 adventices ont été dénombrées.

3.4 Evaluation technico-socio-économique des substrats

3.4.1 Niveau de participation à une dynamique d'économie circulaire

Les fiches synthétiques ont été construites pour renseigner toutes les informations relatives à ce critère, pour chacun des matériaux utilisés. Elles sont consultables en ANNEXE I.

3.4.2 Potentiel filaire

3.4.2.1 Disponibilité de la ressource (données **estimatives**, amenées à évoluer)

Tableau 2 - Tableau récapitulatif des critères de disponibilité des matériaux parentaux (prix et volumes disponibles)

Prix (Appliqués pour les volumes de cette étude)		Prix (€/T) * indique des prix prévisionnels	Production (T/an)
C1a - Compost de déchets verts	8€/100L	-	20 000
M - Résidus de champignonnière	2€/18L	-	24,57
C2 - Compost de biodéchets intraurbain	-	Pro : 300 €/T*- Particuliers : 1400 €/T*	3
C3 - Compost de biodéchets urbain	-	Pro : 250 €/T *	500
LC1 - Lombricompost de fumiers	24€/25kg	Pro : 500 €/T - Particuliers : 960€/T	400
LC2 Lombricompost urbain	-	Pro : 500 €/T*- Particuliers :>1000 €/T*	500
S1 - Béton cellulaire concassé	-	Particuliers : ≈20 €/100 L (Ø20/40 mm)	5 000
S2 - Plaquettes forestières	12€/100L	-	1 082

3.4.2.2 Intérêts des parties prenantes

Nous rapportons ici les points de vue et dires d'acteurs des différentes filières potentiellement impliquées dans la construction de substrats à base de déchets.

Professionnel du secteur des déchets du bâtiment : Pierre LAGUÉRIE – Déchetterie Pichetta

L'entreprise est **toujours en recherche de nouvelles filières de revalorisation** de ses déchets.
La problématique première est le placement des déchets non inertes, ceux-ci doivent être enfouis ou incinérés, ce qui engendre un coût pour l'entreprise. Les déchets inertes, eux, sont valorisés à 100% par cette structure, ils sont recyclés en matériaux de construction, par des processus jugés efficaces. En somme, travailler avec une filière « création de sol ou substrat » n'est **pas une nécessité** pour cette entreprise, mais représente une **opportunité intéressante**, dans la mesure où le traitement et l'utilisation locale des déchets permettrait de réduire les coûts de transport des matières.

Professionnels du secteur des substrats : Claire Grosbellet - Responsable R&D - Florantaise

La valorisation des déchets intéresse les entreprises spécialisées dans le substrat, à condition que la **ressource** soit **fiable**, c'est à dire **disponible** de manière **régulière**, en **quantité,** et de **qualité** constante.

Producteurs de compost urbain :

Les producteurs de compost urbain se montrent prêts à s'**adapter** afin de créer les produits qui répondent au mieux à la demande.

3.4.2.3 Freins identifiés

Plusieurs **obstacles** se posent à la mise en place d'une filière de construction de substrats à base de déchets urbains : **le prix** des composts urbains, beaucoup plus haut que des composts de déchets verts classiques Tableau 2, en raison d'une nécessaire logistique de collecte et tri ; **la disponibilité**, les volumes générés sont encore faibles Tableau 2 ; la **confiance** des utilisateurs, ceux-ci doivent être convaincus de la qualité supérieure de ces supports pour les préférer à des produits concurrents moins chers.

RAPPORT INTERMEDIAIRE NE PAS DIFFUSER

4. DISCUSSION

4.1 Les substrats construits à partir de produits résiduaires – contraintes et atouts

4.1.1 L'utilisation de déchets de construction

L'intégration de déchets de construction dans des supports de culture peut se faire sous deux conditions : leur **innocuité** (absence de contaminant) et leur caractère **inerte** (stabilité dans le temps). Dans le milieu du traitement des déchets, les matériaux sont dits inertes s'ils respectent les limites fixées à l'annexe 2 de l'*Arrêté du 15 mars 2006 […]*. Ces **seuils** ont été **établis** afin de prévenir les **risques** de **pollution** des **eaux souterraines** lors du stockage, mais ne prennent pas en compte les risques liés à **d'autres usages** (ex : risques associés à l'ingestion des terres).

Par ailleurs, utilisés en tant que substrat, ces matériaux sont soumis à des conditions particulières : mise en solution, mise en contact avec des matières organiques etc., qui peuvent provoquer des réactions chimiques imprévues, libérant des molécules supposées piégées dans la matrice. De fait, le caractère **inerte** d'un déchet n'est **pas garant** de son **innocuité parfaite**. Des tests répétés de mise en situation seraient donc nécessaires pour l'utilisation de chaque nouveau matériau, afin de confirmer que dans ces situations particulières ils restent non nocifs.

4.1.2 L'utilisation de composts

L'essai mené ici confirme un certain nombre de caractéristiques propres aux (lombri)composts, bien identifiées et rapportées dans les travaux liés à l'utilisation de ce type de matériau.

4.1.2.1 Des propriétés de rétention différentes des produits classiques

D'après la littérature, l'intégration de compost dans des substrats tourbeux entraîne une réduction de la porosité totale et de la disponibilité en eau (Gong et al., 2018). Nous avons en effet pu noter une **porosité totale légèrement réduite** dans les mélanges innovants par rapport au témoin, avec des niveaux restant supérieurs à 80% du volume, conformément aux standards horticoles (Michel, 2012).

En revanche, la **disponibilité en eau est réellement plus faible dans les substrats à base de déchets :** environ 15 % du volume total, quand de Boodt and Verdonck, (1972) préconisent 20 à 30 %.

Enfin, dans la littérature il a été montré que les substrats recyclés offrent proportionnellement une **disponibilité en air supérieure par rapport aux substrats classiques** (Hicklenton et al., 2001). Dans le cadre de notre étude, la majorité des substrats testés dépassent même les valeurs standards fixées, entre 20% et 30%, pour de la production horticole en pot (de Boodt and Verdonck, 1972). De fait, ces substrats ont des **taux d'humidité inférieurs** à des produits à base de tourbe (Farrell and Jones, 2010).

4.1.2.2 Des contraintes mécaniques plus importantes

Nous avons pu constater que les mélanges à base de résidus organiques sont **plus lourds et plus denses** que des produits classiques(Farrell and Jones, 2010; Gong et al., 2018; Wilson et al., 2002), Avec des masses volumiques en moyenne autour de 320 $g.L^{-1}$, ils rentrent dans les recommandations formulées par Nappi and Barberis, (1993)et Abad et al., (2001)(entre 150 et 500 $g.L^{-1}$), mais dépassent le seuil de 300 $g.L^{-1}$ fixé par(Joiner, 1981)(des références relatives à des cultures horticoles.)

4.1.2.3 Des propriétés chimiques modifiées par rapport aux standards

Comme rapporté dans la littérature, les substrats des biodéchets analysés ici ont des **pH basiques**, entre 7 et 8. Le témoin possède initialement un pH acide, correspondant aux valeurs attendues en horticulture, entre 5 et 6.5 (Michel, 2012). De manière typique, cette valeur augmente durant la culture, jusqu'à rejoindre le pH des substrats de (lombri)composts (Farrell and Jones, 2010).

La salinité est une préoccupation importante dans l'étude des composts. Différents travaux rapportent des concentrations en sels solubles fortes, pouvant se révéler toxiques pour les plantes (Farrell and Jones, 2010; Garcia et al., 1992; Wilson et al., 2002). Les produits testés ici affichent des **niveaux de salinité raisonnables**, avec des valeurs d'EC mesurées en laboratoire autour de 1 $mS.cm^{-1}$, identiques à celles rapportées par Gong et al., (2018) sur des produits similaires. Selon les analyses

menées en laboratoire, L'EC initiale du substrat témoin est légèrement supérieure à 2 mS.cm^{-1}. Un chiffre surprenant étant donné que la tourbe (constituant majeur de ce substrat) a normalement une EC de 0.5 mS.cm^{-1} (Zaller , 2017). Par ailleurs, cette valeur dépasse l'intervalle de 0.6-2 mS.cm^{-1} défini comme optimum pour la croissance de plantes de pépinières en pots (Wright, 1986).

Lemaire et al., (1985) fixe à 3.5 mS.cm^{-1} la limite pour l'utilisation d'un compost en contexte de production. A t=0, nous enregistrons in-situ des valeurs **d'EC jusqu'à 11 mS.cm^{-1}** dans les percolats, sans que cela n'affecte le développement des plantes. En effet, les espèces cultivées (la tomate notamment) tolèrent des EC plus hautes que les recommandations habituelles (Dorai et al., 2001). Par ailleurs, il semble que les premiers arrosages permettent de lessiver les **sels en excès,** puisque les EC se stabilisent au bout d'un mois de culture, offrant aux plantes un environnement moins extrême. Toutes ces observations sont également rapportées par Hicklenton et al., (2001) dans des travaux menés sur des substrats similaires.

Concernant le potentiel nutritif des substrats à base de déchets recyclés, les **concentrations en nutriments** sont **variables** d'un produit à l'autre, mais globalement **plus importantes dans les composts que** dans des supports « classiques » (Farrell and Jones, 2010; Gong et al., 2018), des différences ici bien observées entre les substrats innovants et le **témoin**, fertilisé avec un engrais à libération lente (Fig. 13).Enfin, à la différence de substrats inertes, les composts peuvent contenir des inhibiteurs de pathogènes (Tilston et al., 2002). Un point que nous n'avons pu démontrer ici.

4.1.2.4 Des cinétiques de dégradations très différentes

Les substrats à base de biodéchets sont **moins riches en MO** que des substrats classiques constitués de tourbe (Farrell and Jones, 2010). En effet, ici, nous enregistrons des teneurs en MO quasiment deux fois plus élevées dans le témoin que dans les autres substrats. La capacité d'échanger des cations et la MO étant liées, les substrats innovants montrent également des **CEC globalement inférieures** au témoin (autour de 40 cmol$^+$/kg, contre 70 cmol$^+$/kg pour le substrat T). Ces données sont conformes à des valeurs enregistrées dans des composts : variant de 40 à 60 cmol$^+$/kg entre le début et la fin du processus de compostage (Iglesias Jiménez and Perez Garcia, 1989).

La **cinétique de dégradation** de ces matières organiques est en revanche beaucoup plus **rapide** dans les produits à base de déchets, affichant des rapports C/N très faibles (entre 10 et 15) face à des produits classiques comme la tourbe noire (C/N=30) (Francou, 2003).

4.1.2.5 Des niveaux de production pouvant être équivalents

Les rendements obtenus avec des supports de culture à base de biodéchets peuvent être équivalents à ceux du témoin horticole (Fig. 25). Cependant, les niveaux de productivité sont variables suivant les modalités, car les caractéristiques générales décrites ci-dessus varient d'un mélange à l'autre. Nous proposons à présent de discuter ces différences à la lumière des résultats obtenus.

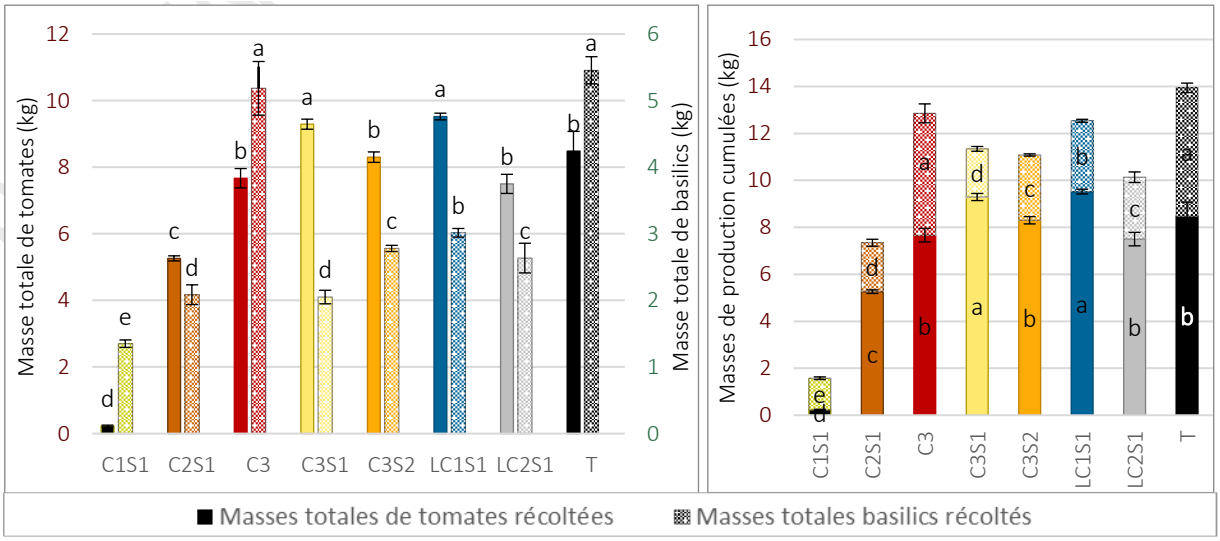


Fig. 25 -Synthèse des niveaux de productivités totaux des mélanges mis à l'essai, pour les deux espèces mises en culture

4.2 Les divers types de composts urbains –C1S1/C2S1/C3S1

4.2.1 Compost de déchets verts et apport des résidus de champignonnière

La majorité des composts utilisés à ce jour en horticulture sont des composts de **déchets verts**. Très concentrés en carbone, ces produits se caractérisent par une dynamique de **dégradation lente** et une grande **stabilité**. Ce sont de bons amendements mais ont un pouvoir **fertilisant faible**.

Dans le mélange C1S1, un compost de déchets verts a été mélangé avec des résidus de champignonnière, contenant 50% de marc de café. Le **marc de café** usagé est un composé organique facilement dégradable. Il a des **teneurs élevées en azote** (2,3%), en phosphore (0.87%) et en potassium (1.53%)[18], qui en font un produit **intéressant** pour la **nutrition des plantes**.

Pourtant, la modalité **C1S1**, s'est révélée la **moins productive**. En cause : un **blocage** de la croissance des végétaux durant presque **2 mois**. Aucune des propriétés physiques de ce mélange n'est assez différenciée des autres substrats pour expliquer un tel retard.

Au niveau des paramètres chimiques, certains auteurs rapportent des risques de phytotoxicité, liés à l'utilisation de résidus de marc de café (Batish et al., 2008). Cependant, avec des conductivités bien en dessous de toutes les autres modalités (en laboratoire comme in-situ dans les lixiviats), le mélange C1S1 ne semble pas avoir souffert de ce problème. Concernant le pouvoir fertilisant du produit C1S1, l'**azote** est présent dans des concentrations similaires à d'autres modalités (Fig. 13) mais **pas sous une forme disponible** pour la plante (Fig. 14) (Concentrations en $NO3^-$ de 6mg/kg pour C1S1, contre 1000 mg/kg environ pour C2S1 et C3S1).

Ces données sont à relier au rapport C/N du mélange. C1S1 est composé de matériaux parentaux riches en carbone organique, avec des rapports C/N proches de 20 (respectivement 18.7 et 19,6 pour les résidus de champignonnière et le compost de DV), qui donnent un **C/N** de **17** au mélange.

Or, d'après le laboratoire AUREA, un C/N supérieur à 14 correspond à un sol à l'activité biologique réduite, entraînant une dégradation lente de la M.O, et au-delà de C/N=20, il y a un risque **d'immobilisation de l'azote**. Celui-ci est utilisé par les micro-organismes du milieu pour dégrader les molécules carbonées et ne peut de fait plus servir au développement de la plante (phénomène de « faim d'azote »). C1S1, sans atteindre cette la valeur « critique » de 20, a un C/N plus élevé que les autres modalités. Ceci laisse supposer que l'immobilisation momentanée de l'azote est la cause du blocage temporaire observé. Ce phénomène est **souvent rapporté** lors d'études sur les **composts à base de bois** ou d'écorces (Grard, 2017 ; Hicklenton et al., 2001). Carlile, (2008) souligne notamment l'importance d'un compostage préalable (6 mois) avant utilisation de ces matériaux et fait état d'un fort degré d'incertitude face à l'instabilité de ces matières.

L'ISB associé au mélange C1 est de 0.78. Cette donnée est conforme à des valeurs ISB couramment rapportées pour des composts de DV (entre 0.6 et 0.8) (Grosbellet, 2008). Elle indique que 78 % de la matière organique du milieu est stable, laissant présager une dégradation lente du matériau.

4.2.2 Compost de déchets verts et déchets alimentaires – C2S1/C3S1

4.2.2.1 L'intérêt des déchets alimentaires

Les déchets de cuisine et de table présentent des caractéristiques intéressantes pour la production végétale : ils sont **plus riches en MO** que les déchets verts, ont des teneurs en **azote** et en **phosphore** environ **deux fois supérieures** et enfin un pH plus acide (souvent <5). Cependant, ils présentent des niveaux de **salinité** très forts (EC de 7 $mS.cm^{-1}$, contre 1 $mS.cm^{-1}$ en moyenne pour les DV), et des **teneurs en eau** allant jusqu'à 90% du volume total, bien supérieures aussi aux DV (Adhikari et al., 2008 ; Farrell and Jones, 2010)). Cette humidité très importante contraint à composter les déchets alimentaires en mélange avec des composés plus secs (bois broyé, carton, papier) qui abaissent les taux d'azote global du compost ainsi produit.

[18]Les matériaux constitutifs du mélange C1S1 (compost de déchets verts et résidus de champignonnière) n'ont pas pu faire l'objet d'analyses de laboratoire. Les valeurs rapportées ici sont issues des travaux de Grard, (2017).

Malgré cela, les composts intégrants des déchets alimentaires conservent un C/N particulièrement faible, de l'ordre de 10, contre des valeurs plus proches de 20 pour les composts de DV (Grard, 2017 ; Hicklenton et al., 2001). Ce ratio bas signifie une **dégradation très rapide de la matière**, adaptée pour une **nutrition immédiate des plantes**, un critère recherché pour les cultures de cycle court.

Concernant les caractéristiques physiques, les composts intégrant des résidus alimentaires ont des **densités plus importantes** que les composts de déchets verts classiquement employés. Effectivement, les composts de DV ont des masses volumiques autour de 250 g/l (Hicklenton et al., 2001), quand nous notons des Mvap entre 320 et 360 g/l pour les composts de (DA+DV), des valeurs proches de celles de composts d'OMR (370 à 446 g/L d'après Hicklenton et al., (2001)).

Enfin Fitzpatrick and Kahn (2001) montrent, dans leurs travaux, que les composts à base d'OMRs sont moins sujets à la compaction que d'autres composts, permettant une meilleure croissance des plantes. Un point qui n'a pas réellement pu être vérifié sur le temps court de notre étude.

4.2.2.2 Les variabilités possibles entre deux composts de déchets alimentaires

C3S1 et C2S1 sont deux modalités très semblables, avec 80% de composts (DA+DV) et 20 % d'agent structurant S1. Les analyses chimiques révèlent des **concentrations en éléments nutritifs** très **proches** pour ces modalités, avec toutefois des taux de (NPK) et MO significativement supérieurs pour C2S1.

Les différences de concentration en **MO** sont très marquées : **80 % pour C2S1**, contre environ **40 % pour C3S1** (tous les autres composts ont un taux de MO proche de 40%).

Il a été démontré que le taux de MO décroît au cours du processus de compostage, de manière variable suivant les conditions de compostage et la durée du processus (Francou, 2003). Les différences observées pourraient donc être dues au **composteur électromécanique** utilisé pour produire C2, ou bien à une **différence de maturité** entre ces composts. Cette hypothèse semble probable ; en effet, le compostage de C2 a duré environ 8 semaines, contre plus de 5 mois pour C3.

La modalité **C3S1** a donné des **rendements** de tomates presque **deux fois supérieurs** (Fig. 25) et une production de basilic équivalente.

Outre l'analyse des caractéristiques chimiques de ces mélanges, il faut rappeler un point de divergence important : le compost **C2** a été criblé à **0.20 cm**, tandis que **C3** a une granulométrie de **0.1 cm**. Or, la **structure d'un support** de culture définit sa **fertilité physique**. Elle détermine de nombreux paramètres essentiels pour le développement de la plante : la capacité de rétention de la matrice, les échanges d'air et d'eau qui s'y mettent en place, ainsi que sa densité (Michel, 2012).
Il a été démontré que plus la **taille** des **particules augmente**, plus **la porosité totale** du support est **grande**, mais plus sa **capacité de rétention** en eau **diminue** Duggan-Jones, 2012 ; Michel, 2012).

Ceci explique la majorité des différences observées entre C2S1 et C3S1 : un taux d'humidité 2 fois supérieur pour C2S1, une capacité de rétention en eau réduite et donc un volume d'eau total percolé supérieur (+40% par rapport à C3S1). Nous avons également pu noter une masse volumique initiale 2 fois plus faible pour C2S1, en cohérence avec une masse finale du système [pot+plantes] bien moindre en fin de culture (-9kg/pot par rapport à C3S1). Enfin, l'effondrement est légèrement supérieur en fin de saison pour C2S1.

Le fractionnement granulométrique conduit en laboratoire (non présenté ici) montre bien que C2S1 se distingue des autres mélanges par une **forte teneur en particules grossières**. Il révèle également des proportions très différentes entre des classes granulométriques voisines (46% de sables grossiers, puis 4% de sables fins par exemple), tandis que dans un substrat de bonne qualité, les particules doivent avoir une répartition graduelle entre les divers classes granulométriques (Raviv et al., 2002).

Concernant la production de fruits : Duggan-Jones, (2012), étudiant l'impact de la taille des particules d'un substrat sur des cultures de tomates, montre que les pieds plantés dans les **substrats plus grossiers** produisent significativement **moins de fruits** et des **fruits de plus petite taille**. Nos observations sont similaires concernant le calibre des fruits ; C2S1 a effectivement produit des tomates

beaucoup plus petites Fig. 22, mais pas sur les nombres de fruits produits. En effet, **C2S1** est la modalité ayant donné le **plus grand nombre de tomates** sur les 8 substrats testés. Ce mélange est donc **productif**, mais du fait de sa faible aptitude à la rétention, les fruits produits se gorgent moins en eau. Ce point n'est pas nécessairement un désavantage, les fruits sont plus petits, mais les récoltes homogènes (calibres variant peu). Il serait possible de constituer des barquettes de fruits harmonieuses pour la vente.

Notons qu'entre les semaines 3 et 5, les **rendements stagnent** pour cette modalité C2S1, en masse, comme en nombre de fruits produits, tandis que la productivité de toutes les autres modalités continue d'augmenter (Fig. 20- Cinétique d'évolution de la production de tomates sur 13semaines, suivant les modalités de substrats.. Nous pourrions supposer un **épuisement des réserves azotées**. En effet, entre les semaines 7 et 12, nous notons une forte diminution du taux de $NO3^-$ dans les eaux de percolation des pots de C2S1, une baisse proportionnellement plus importante que pour les autres substrats (Fig. 15).

Enfin, concernant la donnée d'ISB, les valeurs fournies par le laboratoire sont de 0.82 pour C2 et 0.83 pour C3. Des résultats surprenants, quand la littérature fait état d'ISB entre 0.4 et 0.6 pour des composts de biodéchets (de compositions similaires à C2 et C3) (Francou, 2003 ; Leclerc et al., 2008). Ces résultats amènent à s'interroger sur la méthode d'analyse utilisée. Grosbellet, (2008) dans ses travaux, indique que l'équation permettant le calcul de l'ISB n'est pas adaptée à nos conditions d'expérimentation, mais plutôt aux cas d'apports minimes de composts dans le sol. Toutefois Grard, (2017), se plaçant dans des conditions similaires à cette étude, montre que l'indicateur de stabilité de la matière organique émet des prédictions en accord avec les mécanismes de dégradation observés sur une année. Dans notre cas, ces données semblent douteuses.

4.3 Le lombricompost face au compost – C3S1/LC2S1

Le compost C3 et le lombricompost LC2 sont issus d'un **même compost jeune** (ayant fermenté pendant 2 mois). La différence entre ces produits réside dans le fait que des lombrics ont été ajoutés lors de la phase de maturation de LC2 (durant plusieurs mois), quand le compost C3 a poursuivi sa maturation sans lombrics.

Les résultats révèlent une production de masse fraîche de **basilics plus importante pour le lombricompost**, tandis que les **tomates** cultivées sur **compost** ont donné de **meilleurs résultats** en termes de croissance végétative et de masse totale de fruits produite (Fig. 25).

Les études relatives à l'utilisation de lombricompost en production de plantes d'ornement, s'accordent sur le potentiel très intéressant de ce produit. Les bons rendements obtenus sont souvent reliés à la structure des supports. En effet, grâce à l'action des lombrics, broyant les particules dans leur tube digestif, les lombricomposts auraient une distribution granulométrique plus fine que les composts (Gong et al., 2018, Lazcano et al., 2009 ; Zaller, 2007). Cette amélioration de la structure offrirait aux substrats une meilleure fertilité physique et permettrait le développement accru des microorganismes qui dégradent la matière et rendent les éléments disponibles pour la plante (Arancon et al., 2008).

Dans notre cas, **LC2 et C3** ont tous deux étés **criblés** à une **même granulométrie** en fin de cycle de production (0.10 cm), et nous n'observons **aucune différence entre leurs distributions granulométriques**. De fait, la meilleure rétention en eau des lombricomposts, rapportée dans plusieurs travaux, n'a pas été observée ici. Au contraire, le cumul des volumes d'eau perdue sur 12 semaines est plus important pour LC2S1 que pour C3S1 (148L contre 175L).

Concernant le pouvoir nutritif de ces produits, Gong et al., (2018) et Lazcano et al., (2009) rapportent des concentrations en macroéléments plus hautes dans des lombricomposts que dans des composts, supposées liées à une meilleure dégradation de la MO pas les lombrics.

Nous observons en effet des **taux de matières organiques 10% plus faibles dans LC2S1 que dans C3S1**, mais ces différences ne se traduisent pas au niveau des concentrations en éléments totaux **(NPK), quasiment identiques.**

En revanche, les **concentrations en NO_3^-,** initiales et mesurées en cours de culture, sont significativement **plus importantes** pour le mélange à base de **compost**, de même que les EC (labo et in-situ). Ces facteurs pourraient expliquer les meilleurs rendements en tomates observés pour C3S1.
Zaller, (2007), étudiant également la tomate, conclut que l'utilisation de **lombricompost a** surtout un impact sur la **qualité des fruits** : circonférence, teneur en eau, fermeté de la peau, des paramètres qu'il serait intéressant d'étudier pour tirer des conclusions plus avancées sur l'intérêt du lombricompost.

4.4 L'utilisation de déjections animales

Le mélange LC1S1 se distingue par la nature des MO qui le composent : des fumiers ovins et équins, alors que les autres produits contiennent presque exclusivement des déchets d'origine végétale (notons la présence de déchets alimentaires d'origine animale dans le compost C2).

Le mélange LC1S1 a des propriétés assez différentes de l'ensemble des substrats testés : une **bonne disponibilité en eau**, mais une **disponibilité en air réduite** d'au moins 15% par rapport aux autres modalités, ainsi qu'une **masse volumique plus importante**, comme observé dans d'autres études relatives à ce type de lombricompost (Arancon et al., 2008 ; Lazcano et al., 2009 ; Zaller, 2007). Ces caractéristiques peuvent être dites « à risques » car elles pourraient aboutir à la compaction du mélange et induire l'asphyxie du système racinaire des plantes (Wilson et al., 2002).
Enfin, de nombreux travaux signalent des problèmes de salinité avec l'utilisation de produits similaires à LC1S1 (Corti et al., 1998 ; Gong et al., 2018 ; Zaller, 2007).

Malgré ceci, le substrat à base de lombricompost de fumiers a donné ici les **meilleurs rendements** en tomates et des rendements intermédiaires pour le basilic, sur ces 12 semaines de culture. Par ailleurs, les plants de tomates sur substrat LC1S1 ont été plus **précoces,** avec presque une semaine d'avance pour les premiers fruits matures par rapport à l'ensemble des autres modalités. Ceci peut être associé aux **importants taux de phosphore** dans ce produit, élément associé à la production et la maturation des fruits (Zhu et al., 2017). En effet, les engrais à base de déjections animales sont souvent utilisés en tant que produits « starter », car ils permettent une croissance rapide des plants (Atiyeh et al., 2000).

Même si les contraintes citées dans la littérature n'ont pas impacté la production globale des plantes cultivées ici, les analyses menées sur le support de culture sont en accord avec les risques évoqués (détaillés ci-après) et amènent à nuancer les bons résultats de productivité obtenus.

Les pots de la modalité LC1S1 ont effectivement **drainé** des **volumes d'eau** plus **importants que les autres modalités,** proportionnellement aux niveaux de développements végétatifs observés. Ces données de volumes sont à relier aux concentrations en nitrates relevées dans les **lixiviats** : à la **première irrigation**, ceux-ci sont **2,5 fois plus concentrés en NO_3^-** que la moyenne des autres mélanges, des concentrations qui chutent rapidement par la suite. Ce substrat relargue donc des volumes d'eau plus importants et des eaux plus chargées en ions. Il **libère** une grande partie de ses **réserves** azotées en **début de culture**, pouvant induire des niveaux de pollutions plus élevés que les autres (lombri)composts.

Par ailleurs, la masse finale d'un pot de cette modalité est de 27 kg, soit une **charge** de presque **110 $kg.m^{-2}$**, pour une installation de ce type de substrat avec des pots distancés de 5 cm (calcul maximaliste). Ceci pourrait représenter un frein à l'utilisation de ce type de produit en grande quantité sur des toits terrasses (ex : le projet Parisculteurs « Bourse du travail de Saint-Denis », implique l'aménagement d'un site dont la charge d'exploitation maximale est de 80 kg/m²) (Ville de Paris, 2018).

Autre contrainte pratique : le lombricompost à base de fumiers, mis en œuvre ici, a généré un développement significativement plus important d'**adventices.** Cette flore spontanée provient certainement d'une banque de graines contenues dans le lombricompost. Nous posons l'hypothèse que les fumiers contiennent des quantités plus importantes de graines herbacées que les biodéchets. Une réserve de graines qui aura peut-être été activée par **l'action des lombrics**, qui, lors du compostage, relarguent dans le milieu des composés biochimiques favorisant la germination (Arancon et al., 2008 ; Lazcano et al., 2009; Zaller, 2007).

4.5 L'agent structurant – quel intérêt ? de quelle nature ?

4.5.1 La nécessité d'ajouter un matériau structurant au mélange

Les (lombri)composts sont des matériaux avec de **fortes masses volumiques**. En production ornementale, il a été démontré que les substrats composés uniquement de compost sont sujets à la **compaction** et aboutissent à une moindre croissance des plantes (Farrell and Jones, 2010 ; Hicklenton et al., 2001; Wilson et al., 2002; Zubillaga and Lavado, 2001). L'ajout d'un matériau structurant est supposé permettre la **création de macropores**, afin d'éviter le compactage, mais aussi de **réduire la masse globale** du système (Zubillaga and Lavado, 2001).

4.5.1.1 Modification des propriétés physiques

Tableau 3 - Effets de l'intégration de 2 agents structurants différents au compost C3. Pour chaque paramètre sont indiqués les différences entre les valeurs moyennes obtenues pour les modalités C3S1 et C3S2 par rapport à C3 (n=3).

	ANALYSES DE LABORATOIRE						DONNEES DE TERRAIN	
	Porosité tot. (%)	Dispo. en air (%)	Dispo. en eau (%)	Réhumectation[19]	Humidité (%)	Mvap g/L	Pertes en eau (L)	Masse/ pot (kg)
Ajout de béton	1,21	4,3	1,83	+	-6.4	-7,78	-17,1	-1,88
Ajout de bois	-0,42	-4,66	0,06	+	-2.6	-10,67	-8,95	0,1

Le Tableau 3- Effets de l'intégration de 2 agents structurants différents au compost C3. Pour chaque paramètre sont indiquées les différences entre les valeurs moyennes obtenues pour les modalités C3S1 et C3S2 par rapport à C3 (n-3) ; elles montrent que l'ajout de **béton cellulaire** a eu l'effet souhaité sur les propriétés physiques du compost de biodéchets C3 : **amélioration de la rétention en eau**, meilleure **tolérance à la dessication**, et **réduction de la masse globale**.

L'intégration de **plaquettes forestières** permet d'alléger le mélange selon les analyses de laboratoire, mais cette donnée n'a pas été validée sur le terrain. Le bois ne semble en revanche pas avoir d'effet positif sur les propriétés de rétention. Malgré une porosité totale très proche de C3, la **disponibilité en air diminue** dans C3S2, sans que la disponibilité en eau n'augmente. Cela laisse supposer que l'ajout des plaquettes forestières augmente la fraction d'eau non disponible pour la plante.

Ces différences au niveau des **réserves hydriques** pourraient expliquer les **différences de rendement en** tomates, qui sont des espèces particulièrement exigeantes en eau (Duggan-Jones, 2012). En effet, dans l'ordre décroissant de productivité pour les tomates nous avons C3S1>C3S2>C3, ordre identique à celui des disponibilités en eau. Cependant, les différences par rapport à C3 restent minimes (moins de 2% d'écart, (Fig. 25)).
En revanche, les différences de disponibilité en air sont plus marquées (+/- 4 %). La meilleure aération du substrat C3S1 pourrait expliquer en partie les niveaux de production supérieurs pour ce mélange.

4.5.1.2 Modification des propriétés (bio)chimiques

Les travaux de Rokia et al., (2014) sur les mélanges binaires, montrent que l'ajout de matériaux exogènes (types brique ou tuile) peut modifier les propriétés chimiques initiales d'un produit organique, de manière variable suivant la nature du matériau intégré et les proportions choisies. Dans cette étude, l'apport exogène reste faible (20%) et a globalement peu d'effets sur les propriétés chimiques de C3. Le pH est faiblement modulé en fonction des pH initiaux des matériaux parentaux (proches du pH de C3). Les concentrations en NPK sont légèrement diminuées dans les mélanges puisque les agents structurants sélectionnés sont moins riches en macroéléments que C3.

Toutefois, nous observons que l'intégration d'un produit structurant produit **structurant organique modifie significativement le ratio C/N du mélange**.

[19] Appréciations qualitatives attribuées sur la base des classes p.19

En effet, l'ajout de plaquettes forestières, avec un C/N=96 (Grard, 2017), élève le ratio de C3, initialement égal à 10, jusqu'à 15.

Ces fragments de bois devraient libérer des éléments nutritifs sur le long terme. D'une année sur l'autre, Grard 2017) mesure des C/N de 325 puis de 75 pour ce produit. Plusieurs années de cultures seraient nécessaires pour appréhender l'intérêt de cette association, entre un matériau organique à la minéralisation rapide (C3) et un composé libérant plus graduellement les nutriments (S2).

4.5.1.3 Impact sur le phénomène de lixiviation

Au terme des 12 premières semaines de culture nous pouvons classer ces 3 substrats du plus au moins rétenteur selon l'ordre suivant : C3S1 > C3S2 > C3. Cependant les différences restent peu marquées.

Concernant la composition des lixiviats, sur les 4 points de mesures effectués, les pots de la modalité **C3S1** ont lessivé des **eaux globalement plus chargées en nitrates** que C3S2 et C3, notamment à la **mise en place du système**. Ces mesures, effectuées sur une seule répétition, sont peu exploitables d'un point de vue statistique, mais sont cohérentes avec deux autres données révélées par les analyses de laboratoire conduites sur 3 répétitions :

- Les échantillons initiaux du mélange C3S1 avaient en moyenne des concentrations en $NO3^-$ plus élevées (+123mg/kg par rapport à C3, et +300mg/kg par rapport à C3S2),
- Les échantillons initiaux de C3S1 avaient une CEC plus faible avec des valeurs de 70, 65, 57 $cmol^+/kg$ respectivement pour C3, C3S2 et C3S1, des valeurs cohérentes par rapport aux données de **CEC très faibles** des **matériaux de construction** renseignées dans la littérature (Rokia et al., 2014).

Avec des concentrations initiales en nitrates plus importantes et une CEC plus faible, il semble logique que C3S1 ait lessivé de plus forts taux de nitrates.

Les substrats classiques associent souvent des composés organiques, avec des potentiels de minéralisation forts et rapides, à des composés stables, capables de retenir la matière minéralisée (type vermiculite (CEC entre 100 et 150 $cmol^+/kg$) ou smectite (CEC entre 80 et 150 $cmol^+/kg$)(ANNEXE X). Dans le cas présent, il semble que le **composé inerte** utilisé (béton cellulaire concassé) **retienne les éléments minéraux de manière moins efficace que les particules de compost**. De ce point de vue l'ajout de béton cellulaire abaisse la fertilité chimique du compost.

4.5.2 L'emploi de compost seul

La modalité **100% compost** est parmi les plus productives. C'est le seul mélange de résidus à avoir permis des **productions de basilics** similaires au témoin, avec une **qualité de produit supérieure** aux autres modalités de substrats innovants (développement foliaire plus important et couleur plus sombre). C3 et T sont les seules modalités à n'avoir pas été mélangées avec un agent structurant. Nous pouvons poser plusieurs hypothèses à ce sujet : la présence d'éléments grossiers a gêné l'encrage du basilic qui possède un système racinaire moins robuste que la tomate.
L'aération du milieu ne favorise pas cette plante aromatique qui se développe bien dans des sols compacts et humides, ce qui correspond aux caractéristiques de C3.
Enfin le mélange C3 présentait initialement des teneurs en azote plus importantes. Cependant les tomates n'ont pas montré de développement ni rendements supérieurs sur ce substratinvalidant l'hypothèse d'un niveau de fertilité chimique significativement plus important.
Notons enfin que les analyses de capacité à la réhumectation désignent **C3** comme le **matériau le plus à risque en cas d'épisode de sécheresse**. Un point non observé au cours de l'expérimentation, dans la mesure où aucun accident d'irrigation n'est survenu. Le comportement de C3 face à un épisode de dessiccation s'apparente à celui d'autres matériaux organiques, type fibre de bois ou de bois déchiquetés, qui perdent aussi une certaine part de leurs aptitudes à la rétention suite à un épisode de sécheresse (Michel et al., 2017). Cependant, ce compost reste moins hydrophobe que certains matériaux utilisés aujourd'hui dans les substrats horticoles (la tourbe notamment). Pour solutionner ces problèmes d'hydrophobie, des agents mouillants sont utilisés en système conventionnel (Fields et al., 2014). Toutefois, ces procédés sont très **peu écologiques** et seraient en contradiction avec la

RAPPORT DE STAGE - NE PAS DIFFUSER

dynamique mise en place ici. Par ailleurs, il semble que **l'ajout d'un agent structurant** améliore les propriétés du mélange C3, du point de vue de la sensibilité à la sécheresse. Ce serait donc une raison supplémentaire de préférer la conception d'un mélange à l'utilisation d'un compost pur.

4.6 Synthèse

Finalement, le choix du substrat dépend avant tout de ce que l'utilisateur en attend, en fonction de ses buts, de ses contraintes et de ses envies. Nous proposons donc un classement des substrats par grandes catégories de critères. Ces classements ont été établis via les données, chiffrées ou non, obtenues dans cette étude.

Tableau 4 - Classement des substrats selon des critères agronomiques et non agronomiques

	Fertilité physique (selon 4 critères quantitatifs et 1 critère qualitatif)	Fertilité chimique (selon 8 critères quantitatifs)	Fertilité biologique (selon 2 critères quantitatifs et 1 critère qualitatif)	Production - en qualité (selon 3 critères quantitatifs)	Production - en quantité (selon 2 critères quantitatifs)	Facilité de conduite (selon 2 critères quantitatifs)	Prix (selon une moyenne prix pro. prix particulier)	Volumes disponibles (selon 1 critère quantitatif)	Participation à l'économie circulaire (selon 3 critères qualitatifs)
Meilleur	T	C3	C2S1	C3	T	C2S1	T	T	C3
	C3S1	C2S1	C3	C1S1	C3	C3S1	C1S1	C1S1	C1S1
	C2S1	T	C3S1	C2S1	LC1S1	C1S1	LC2S1	C3	C2S1
	C3S2	C3S2	LC2S1	C3S2	C3S1	C3	C3	C3S2	C3S2
	C3	C3S1	C3S2	LC2S1	C3S2	C3S2	C3S2	C3S1	C3S1
	C1S1	LC1S1	T	LC1S1	LC2S1	LC2S1	C3S1	LC1S1	LC1S1
	LC1S1	LC2S1	C1S1	C3S1	C2S1	T	C2S1	LC2S1	LC2S1
Moins bon	LC2S1	C1S1	LC1S1	T	C1S1	LC1S1	LC2S1	C2S1	T

5. CONCLUSION

Le but principal de ces travaux était d'évaluer les **performances agronomiques** de substrats constitués à partir de **produits résiduaires**. Une réflexion a aussi été menée sur leur **degré de participation à l'économie circulaire** de la ville, et leur adéquation avec les besoins et contraintes des divers utilisateurs auxquels ils se destinent.

Les travaux d'expérimentation ont permis de vérifier l'hypothèse selon laquelle les matières premières constitutives d'un compost influencent leurs aptitudes. En effet, nous avons pu constater **des degrés de fertilité variables** entre des composts issus de déchets verts, des composts comprenant des déchets alimentaires et un lombricompost de fumiers animaux. Nous avons noté des **teneurs en azote plus élevées** dans les composts intégrant des **déchets de cuisine** par rapport à des composts de déchets verts, avec une **dégradation** plus **rapide** des matières organiques, assurant un **apport nutritif immédiat** aux plantes, un critère intéressant pour des productions de cycle court. Le produit à base de fumier, avec des taux de phosphate plus importants, a permis une production de tomates légèrement plus précoce.

En revanche, ces expérimentations n'ont **pas** permis d'établir de **lien entre la fertilité d'un compost et le type de compostage** mis en œuvre (compostage électromécanique ou compostage en andain). En effet un facteur de variabilité a induit un biais dans la comparaison : les différences de granulométries entre les deux composts. Une comparaison avec des composts criblés à des diamètres équivalents serait nécessaire pour tirer des conclusions plus nettes. Ce point de divergence a cependant permis de dégager un point important **: la fertilité physique du milieu est un critère primordial.** Un substrat ne sera performant que si un certain niveau de fertilité physique est assuré, pour permettre l'accès aux éléments nutritifs**. Les aptitudes des mélanges étudiés ici sont avant tout déterminées par leurs propriétés physiques** et les différences entre les variables chimiques restent relativement faibles.

L'une des hypothèses initiales concernait la nécessité **d'intégrer un agent structurant** pour **aérer les composts**, réputés sensibles à la compaction. Les bons résultats obtenus avec la modalité **100% compost**, montrent que, dans un cas tel que celui de cette étude, il est **possible** d'utiliser ce produit seul pour une culture associée de basilic et tomate. L'intégration d'un **agent structurant** permet tout de même **d'alléger le mélange** et d'améliorer ses capacités de rétention, pour une meilleure hydratation des végétaux et des pertes en eau réduites. L'ajout du **structurant organique** sélectionné a permis une moindre amélioration de ce dernier paramètre par rapport au béton. Le bois est supposé libérer des **éléments nutritifs** lors de sa **dégradation**, un phénomène qui n'a pas pu être observé en 12 semaines. La **reconduite** de ce substrat serait nécessaire pour juger des atouts potentiels de cet agent structurant par rapport à un structurant de type minéral.

Concernant la **production,** les substrats offrant les plus **grandes réserves en eau et en air ont** permis d'obtenir les **meilleurs rendements** de **tomates**, alors que les **basilics** ont été plus productifs avec les supports **sans agent structurant**. Le degré de performance d'un compost est donc bien fonction de l'espèce végétale cultivée.

Notons par ailleurs qu'un certain nombre de **risques,** souvent mentionnés lors de l'utilisation de composts en très forte quantité (risques de **salinité**, **compaction**, **asphyxie racinaire**), n'ont **pas été observés** dans le cadre de cette étude impliquant des **espèces** relativement **rustiques**. La mise à l'essai de ces mélanges avec des **plantes** plus **sensibles** à de tels paramètres, aboutirait possiblement à des conclusions différentes.

En outre, les résultats indiquent que dans le cadre du système de culture mis en place ici, il est possible d'atteindre un **niveau de productivité de tomates cerises et basilics équivalent à un support horticole** (intégrant une fertilisation minérale), en utilisant uniquement des résidus urbains.

Enfin, les aptitudes agronomiques des matériaux testés étant démontrées, se pose la question de leur utilisation par les publics visés. Sur ce point, nous proposons les conclusions et perspectives suivantes :

Pour **les particuliers**, l'utilisation de ces mélanges semble tout à fait **possible** car ils sont faciles à mettre en œuvre, écologiques et esthétiques pour la plupart. Il reste à convaincre le public de l'intérêt de ces nouveaux produits, de leur innocuité et de leurs avantages par rapport à des terreaux classiques, moins chers.

Les Agriculteurs Urbains sont certainement les utilisateurs les plus **sensibles au caractère local** et durable de ces substrats, confectionnés dans la ville, pour la ville et par la ville.
Cependant, le prix élevé de tels produits pourrait constituer un frein à leur utilisation. En effet, les entreprises start-up ou associations d'agricultures urbaines, existantes à ce jour, sont encore souvent en recherche d'un modèle économique stable. De fait, elles souhaitent avant tout minimiser leurs coûts d'installation et préféreront certainement des produits moins chers. D'autres formes d'AU, plus technologiques, voient le jour en France, avec davantage de ressources financières ; elles pourraient constituer un débouché.
Enfin, pour une utilisation par les **professionnels de l'horticulture**, les composts à base de biodéchets pourraient représenter une alternative intéressante aux produits aujourd'hui sur le marché. En effet, ils se différencient des composts de déchets verts, souvent utilisés pour limiter l'utilisation de tourbe, par une fertilité plus importante et une libération rapide de composés azotés.

Cependant, ces composts urbains, produits localement, représentent de **faibles volumes**, ce qui pourrait limiter l'intérêt des **producteurs de substrats**, en recherche de **gisements importants**.

Toutefois, les structures qui collectent et traitent les biodéchets sont en train de **changer d'échelle**. Elles s'agrandissent pour pouvoir composter davantage. Avec l'évolution de la réglementation, le tri à la source sera demain l'affaire de tous, nul doute que les quantités de biodéchets à traiter vont augmenter. Ainsi la **production de compost de déchets alimentaires devrait croître fortement.** Les volumes générés seront peut-être de nature à intéresser des partenaires pour la construction d'une filière de valorisation.

6. BIBLIOGRAPHIE ET SITOGRAPHIE

Bibliographie

Abad, Manuel, Patricia Noguera, et Silvia Burés. 2001. « National Inventory of Organic Wastes for Use as Growing Media for Ornamental Potted Plant Production: Case Study in Spain ». Bioresource Technology 77 (2): 197-200. https://doi.org/10.1016/S0960-8524(00)00152-8.

ADEME. 2011. « ANALYSE TECHNICO-ECONOMIQUE DE 39 PLATEFORMES FRANCAISES DE TRI/VALORISATION DES DECHETS DU BTP ».

Adhikari, Bijaya K., Suzelle Barrington, José Martinez, et Susan King. 2008. « Characterization of food waste and bulking agents for composting ». Waste Management 28 (5): 795-804. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2007.08.018.

Arancon, Norman, Clive Edwards, Andrei Babenko, John Cannon, Paola Galvis, et James Metzger. 2008. « Influences of vermicomposts, produced by earthworms and microorganisms from cattle manure, food waste and paper waste, on the germination, growth and flowering of petunias in the greenhouse ». Applied Soil Ecology 39 (mai): 91-99. https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2007.11.010.

Arrêté du 15 mars 2006 fixant la liste des types de déchets inertes admissibles dans des installations de stockage de déchets inertes et les conditions d'exploitation de ces installations. 2006.

Atiyeh, Rola M., Clive A. Edwards, Scott Subler, et James D. Metzger. 2000. « Earthworm-Processed Organic Wastes as Components Of Horticultural Potting Media for Growing Marigold and Vegetable Seedlings ». Compost Science & Utilization 8 (3): 215-23. https://doi.org/10.1080/1065657X.2000.10701994.

Ba, Awa, et Christine Aubry. 2011. « Diversité et durabilité de l'agriculture urbaine : une nécessaire adaptation des concepts ? » Norois, no 221: 11-24.

Barles, Sabine. 2010. « Les villes : parasites ou gisements de ressources ? » La Vie des idées, mai. http://www.laviedesidees.fr/Les-villes-parasites-ou-gisements.html.

Batish, Daizy R., Harminder Pal Singh, Mansimran Kaur, Ravinder Kumar Kohli, et Surender Singh Yadav. 2008. « Caffeine Affects Adventitious Rooting and Causes Biochemical Changes in the Hypocotyl Cuttings of Mung Bean (Phaseolus Aureus Roxb.) ». Acta Physiologiae Plantarum 30 (3): 401-5. https://doi.org/10.1007/s11738-007-0132-4.

Benito, Marta, Alberto Masaguer, Ana Moliner, et Roberto De Antonio. 2006. « Chemical and Physical Properties of Pruning Waste Compost and Their Seasonal Variability ». Bioresource Technology 97 (16): 2071-76. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2005.09.011.

Boodt, M. de, et O. Verdonck. 1972. « THE PHYSICAL PROPERTIES OF THE SUBSTRATES IN HORTICULTURE ». Acta Horticulturae, no 26 (décembre): 37-44. https://doi.org/10.17660/ActaHortic.1972.26.5.

Bouin, Céliane, Nora Couderc, et Claire Gaffier. 2016. « Étude des quantités et de la qualité du compost de biodéchets ménagers issu de deux formes de compostage collectif à Paris et identification de leurs débouchés potentiels ». http://clcvparis.org/wp-content/uploads/2017/04/Etude-AgroParisTech-2016-2017.pdf.

Carlile, W.R. 2008. « THE USE OF COMPOSTED MATERIALS IN GROWING MEDIA ». Acta Horticulturae, no 779 (janvier): 321-28. https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2008.779.39.

Code de l'environnement - Article L541-14-1. 2017. Code de l'environnement. Vol. L541-14-1.

Cooper, T. 1999. « Creating an economic infrastructure for sustainable product design ». Journal of Sustainable Product Design, 7-17.

Corti, C., L. Crippa, P. L. Genevini, et M. Centemero. 1998. « Compost Use in Plant Nurseries: Hydrological and Physicochemical Characteristics ». Compost Science & Utilization 6 (1): 35-45. https://doi.org/10.1080/1065657X.1998.10701907.

Damas, Olivier, et Anaïs Coulon. 2016. Créer des sols fertiles: du déchet à la végétalisation urbaine.

Daniel, Anne-Cécile. 2017. « Fonctionnement et durabilité des micro-fermes urbaines, une observation participative sur le cas des fermes franciliennes ».

Desplats, Rafaelle, et Chloé Mahe. 2017. « Les installations de traitement des déchets ménagers et assimilés en France. »

Dorai, Martine, Athanasios Papadopoulos, et André Gosselin. 2001. « Influence of electric conductivity management on greenhouse tomato yield and fruit quality ». Agronomie 21 (4): 367-83. https://doi.org/10.1051/agro:2001130.

Dorais, M., C. Martinez, M. Diop, M. Thériault, C. Ménard, et S. Pepin. 2016. « Assessing the potential of biochar as a growing media component for potted plants ». Acta Horticulturae, no 1137 (août): 19-26. https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2016.1137.3.

Drewe, Lisa. 2012. « Coir : a sustainability assessment ». Newleaf Sustainability Practice.

Duggan-Jones, Damian. 2012. « The Effect of Coir Particle Size on Yield of Greenhouse Tomatoes (Lycopersicon Esculentum Mil.) », 138.

Farrell, M., et D.L. Jones. 2010. « Food Waste Composting: Its Use as a Peat Replacement ». Waste Management 30 (8-9): 1495-1501. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2010.01.032.

Fields, Jeb, William C Fonteno, et Brian Jackson. 2014. « Hydration Efficiency of Traditional and Alternative Greenhouse Substrate Components ». HortScience: a publication of the American Society for Horticultural Science 49 (mars): 336-42.

Fitzpatrick, et Brian A. Kahn. 2001. « Compost Utilization in Ornamental and Nurcery Crop System Production ». In Compost Utilization In Horticultural Cropping Systems, 135-50. CRC Press.

Francou, Cédric. 2003. « Stabilisation de la matière organique au cours du compostage de déchets urbains : influence de la nature des déchets et du procédé de compostage - recherche d'indicateurs pertinents ». Phdthesis, INAPG (AgroParisTech). https://pastel.archives-ouvertes.fr/pastel-00000788/document.

Garcia, Carlos, Teresa Hernández, Francisco Costa, et Jose Pascual. 1992. « Phytotoxicity due to the agricultural use of urban wastes. Germination experiments ». Journal of the Science of Food and Agriculture 59 (janvier): 313-19. https://doi.org/10.1002/jsfa.2740590307.

Garg, V. K., S. Suthar, et Anoop Yadav. 2012. « Management of Food Industry Waste Employing Vermicomposting Technology ». Bioresource Technology 126 (décembre): 437-43. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.11.116.

RAPPORT INTERMEDIAIRE NE PAS DIFFUSER

Gong, Xiaoqiang, Suyan Li, Xiangyang Sun, Li Wang, Linlin Cai, Junda Zhang, et Le Wei. 2018. « Green waste compost and vermicompost as peat substitutes in growing media for geranium (Pelargonium zonale L.) and calendula (Calendula officinalis L.) ». Scientia Horticulturae 236 (juin): 186-91. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.03.051.

Graceson, Abigail, Martin Hare, Nigel Hall, et Jim Monaghan. 2014. « Use of Inorganic Substrates and Composted Green Waste in Growing Media for Green Roofs ». Biosystems Engineering 124 (août): 1-7. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2014.05.007.

Grard, Baptiste. 2017. « Des Technosols construits à partir de produits résiduaires urbains : services écosystémiques fournis et évolution ». Phdthesis, Université Paris-Saclay. https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01779723/document.

Grard, Bel, Marchal, et Madre. 2015. « Recycling urban waste as possible use for rooftop vegetable garden ». Future of Food: Journal on Food, Agriculture and Society, 3(1), 21-34, 2015.

Grosbellet, Claire. 2008. Evolution et effets sur la structuration du sol de la matière organique apportée en grande quantité. Angers. http://www.theses.fr/2008ANGE0057.

Hicklenton, Peter R, Vernon Rodd, et Philip R Warman. 2001. « The Effectiveness and Consistency of Source-Separated Municipal Solid Waste and Bark Composts as Components of Container Growing Media ». Scientia Horticulturae 91 (3-4): 365-78. https://doi.org/10.1016/S0304-4238(01)00251-5.

Iglesias Jiménez, Emeterio, et Victor Perez Garcia. 1989. « Evaluation of city refuse compost maturity: a review ». Biological Wastes 27 (2): 115-42. https://doi.org/10.1016/0269-7483(89)90039-6.

Joiner, Jasper N., éd. 1981. « Soils and potting mixture ». In Foliage plant production, 179-202. Englewood Cliffs, N.J: Prentice-Hall.

Kern, Jürgen, Priit Tammeorg, Merrit Shanskiy, Ruben Sakrabani, Heike Knicker, Claudia Kammann, Eeva-Maria Tuhkanen, et al. 2017. « SYNERGISTIC USE OF PEAT AND CHARRED MATERIAL IN GROWING MEDIA – AN OPTION TO REDUCE THE PRESSURE ON PEATLANDS? » Journal of Environmental Engineering and Landscape Management 25 (2): 160-74. https://doi.org/10.3846/16486897.2017.1284665.

Lazcano, C., J. Arnold, A. Tato, J.G. Zaller, et J. Domínguez. 2009. « Compost and vermicompost as nursery pot components: effects on tomato plant growth and morphology ». Spanish Journal of Agricultural Research 7 (4): 944. https://doi.org/10.5424/sjar/2009074-1107.

Leclerc, Blaise, Dominique Plumail, et Pascale Chenon. 2008. « Production et qualité des composts de déchets verts en France métropolitaine », 4.

Lemaire, F., A. Dartigues, et L.M. Rivière. 1985. « PROPERTIES OF SUBSTRATE MADE WITH SPENT MUSHROOM COMPOST ». Acta Horticulturae, no 172 (juin): 13-30. https://doi.org/10.17660/ActaHortic.1985.172.1.

Mairie de Paris. 2017. « Rapport annuel sur la gestion des déchets 2016 ». https://api-site-cdn.paris.fr/images/97335.

Michel, J.-C., B.E. Jackson, et W.C. Fonteno. 2017. « Classification of organic substrates' wettability from contact angle measurements and hydration efficiency tests ». Acta Horticulturae, no 1168 (juillet): 199-206. https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2017.1168.26.

RAPPORT DE STAGE DIFFUSION PAS DIFFUSER

Michel, Jean-Charles. 2012. « Les supports de culture : Bases agronomiques & Contraintes environnementales – Marché & tendances stratégiques ». Journées techniques de l'Astredhor, janvier.

Nappi, P., et R. Barberis. 1993. « COMPOST AS GROWING MEDIUM: CHEMICAL, PHYSICAL AND BIOLOGICAL ASPECTS ». Acta Horticulturae, no 342 (juin): 249-56. https://doi.org/10.17660/ActaHortic.1993.342.28.

Nehls, Thomas, Sarah Rokia, Beate Mekiffer, Christophe Schwartz, et Gerd Wessolek. 2013. « Contribution of Bricks to Urban Soil Properties ». Journal of Soils and Sediments 13 (3): 575-84. https://doi.org/10.1007/s11368-012-0559-0.

Pinamonti, Flavia, Gino Stringari, et Gianni Zorzi. 1997. « Use of Compost in Soilless Cultivation ». Compost Science & Utilization 5 (2): 38-46. https://doi.org/10.1080/1065657X.1997.10701872.

Pourias, Jeanne. 2014. « Production alimentaire et pratiques culturales en agriculture urbaine Analyse agronomique de la fonction alimentaire des jardins associatifs urbains à Paris et Montréal ». Université du Québec à Montréal et AgroParisTech. https://www.researchgate.net/profile/Jeanne_Pourias/publication.

Raviv, Michael, Rony Wallach, A Silber, et Asher Bar-Tal. 2002. « Substrates and their analysis ». Hydroponic Production of Vegetables and Ornamentals, janvier, 25-102.

Rincón, Lídia, Julià Coma, Gabriel Pérez, Albert Castell, Dieter Boer, et Luisa F. Cabeza. 2014. « Environmental Performance of Recycled Rubber as Drainage Layer in Extensive Green Roofs. A Comparative Life Cycle Assessment ». Building and Environment 74 (avril): 22-30. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.01.001.

Rokia, S., G. Séré, C. Schwartz, M. Deeb, F. Fournier, T. Nehls, O. Damas, et L. Vidal-Beaudet. 2014. « Modelling Agronomic Properties of Technosols Constructed with Urban Wastes ». Waste Management 34 (11): 2155-62. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2013.12.016.

Ronga, Domenico, Catello Pane, Massimo Zaccardelli, et Nicola Pecchioni. 2016. « Use of Spent Coffee Ground Compost in Peat-Based Growing Media for the Production of Basil and Tomato Potting Plants ». Communications in Soil Science and Plant Analysis 47 (3): 356-68. https://doi.org/10.1080/00103624.2015.1122803.

Saveyn, Hans, Peter Eder, et Institute for Prospective Technological Studies. 2014. End-of-Waste Criteria for Biodegradable Waste Subjected to Biological Treatment (Compost & Digestate): Technical Proposals. Luxembourg: Publications Office. http://dx.publications.europa.eu/10.2788/6295.

Schmilewski, G. 2009. « GROWING MEDIUM CONSTITUENTS USED IN THE EU ». Acta Horticulturae, no 819 (mars): 33-46. https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2009.819.3.

Steiner, C., et T. Harttung. 2014. « Biochar as a Growing Media Additive and Peat Substitute ». Solid Earth 5 (2): 995-99. https://doi.org/10.5194/se-5-995-2014.

Tian, Yun, Xiangyang Sun, Suyan Li, Haiyan Wang, Lanzhen Wang, Jixin Cao, et Lu Zhang. 2012. « Biochar Made from Green Waste as Peat Substitute in Growth Media for Calathea Rotundifola Cv. Fasciata ». Scientia Horticulturae 143 (août): 15-18. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2012.05.018.

Tilston, Emma, D Pitt, et Andrew Groenhof. 2002. « Composted recycled organic matter suppresses soil-borne diseases of field crops ». New Phytologist 154 (juin): 731-40. https://doi.org/10.1046/j.1469-8137.2002.00411.x.

Vila, A., G. Pérez, C. Solé, A.I. Fernández, et L.F. Cabeza. 2012. « Use of Rubber Crumbs as Drainage Layer in Experimental Green Roofs ». Building and Environment 48 (février): 101-6. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.08.010.

Wilson, S. B., P. J. Stoffella, et D. A. Graetz. 2002. « Development of Compost-Based Media for Containerized Perennials ». Scientia Horticulturae 93 (3-4): 311-20. https://doi.org/10.1016/S0304-4238(01)00340-5.

Wright, R. D. 1986. « The Pour-through Nutrient Extraction Procedure ». HortScience (USA). http://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=US874657988.

Zaller, Johann G. 2007. « Vermicompost as a substitute for peat in potting media: Effects on germination, biomass allocation, yields and fruit quality of three tomato varieties ». Scientia Horticulturae 112 (2): 191-99. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2006.12.023.

Zhu, Qiang, Monica Ozores-Hampton, Yuncong Li, Kelly Morgan, Guodong Liu, et Rao S. Mylavarapu. 2017. « Effect of Phosphorus Rates on Growth, Yield, and Postharvest Quality of Tomato in a Calcareous Soil ». HortScience 52 (10): 1406-12. https://doi.org/10.21273/HORTSCI12192-17.

Zubillaga, Marta S, et Raul S Lavado. 2001. « Biosolids Compost as Component of Potting Media for Bedding Plants ». M. S., 6.

Sitographie

Ville de Paris. 2018a. « Réduire ses déchets ». Paris.fr. Paris.fr (blog). 30 juillet 2018. https://www.paris.fr/gaspillage.

Ville de Paris, Ville de. 2018b. « Les Parisculteurs / Site Officiel ». Les Parisculteurs. 7 septembre 2018. http://www.parisculteurs.paris/fr/home/.

RAPPORT INTERMÉDIAIRE - NE PAS DIFFUSER

	Diplôme : Ingénieur Spécialité : Paysagiste Spécialisation / option : Ingénierie des Espaces Végétalisés Urbains Enseignant référent : Laure Vidal-Beaudet

Auteur(s) : Laura Bessouat Date de naissance* : 09/09/1993	Organisme d'accueil : Astredhor Seine-Manche Adresse : Station d'expérimentation Exploitation du lycée horticole, Route forestière des Princesses 78100 SAINT-GERMAIN-EN-LAYE - FRANCE Maître de stage : Elise SORIN
Nb pages : 45 Annexe(s) : 23	
Année de soutenance : 2018	

Titre français : Matériaux urbains issus de l'économie circulaire : vers des substrats innovants ?

Titre anglais : Reuse of urban waste materials as growing media.

La ville de demain se rêve en vert, l'agriculture urbaine est en plein essor, mais pour cultiver dans cet environnement artificialisé, il faut un support. L'économie circulaire propose une solution simple : utiliser des rejets générés par la ville, les faisant passer du statut de déchet à celui de produit.
La présente étude vise à évaluer différents substrats élaborés à partir de produits résiduaires urbains.
Sept mélanges ont été constitués avec : - Des matériaux organiques localement sourcés : un compost de déchets verts, des composts et lombricomposts de biodéchets, un lombricompost de fumiers, des résidus de champignonnière et des fragments de bois. - Un déchet de construction : du béton cellulaire concassé.
Ces substrats ont été évalués suivant plusieurs critères agronomiques : leurs propriétés physiques, chimiques et biologiques, et leur niveau de productivité, pour une culture associée de tomate cerise et basilic en pot. En comparaison à des supports de cultures classiques, les matériaux utilisés se caractérisent par une densité plus élevée, une disponibilité en air plus importante, une disponibilité en air réduite, un pH élevé et enfin une forte réserve nutritive, rapidement mobilisable. Dans les conditions de cette expérimentation, certains mélanges ont montré des niveaux de productivité équivalents à un substrat horticole classique.
Les composts de déchets alimentaires, contenant de grandes quantités d'azote rapidement mobilisable, sont des produits particulièrement intéressants pour des cultures de cycle court. Cependant leur disponibilité reste encore limitée.

We want greener cities, urban agriculture is gaining popularity, but in this artificialized environment, fertile soil is needed. Circular economy model proposes to solve this problem by using city releases and valorise them as product for urban farming.
The aim of this work was to evaluate the possibility to use local city wastes as potting media.
7 growing medias were prepared, mixing 8 organic wastes: mushroom substrate, shredded wood, green waste compost, food waste compost and vermicompost, and vermicompost of horse and cow manure, all locally produced,andone construction waste: crushed concrete.
We evaluated these substrates by using several agronomic criterias: soil physical, chemical and biological proprieties, and its level of productivity for two plants commonly grown in urban faming: cherry tomato and basil. In comparison with classical substrate, we showed that the medias withhigh amount of compost have specifics common characteristics: high bulk density, and high air space, less water filled porosity, high pH, high content of nutrients and fast degradation rate. In this study's conditions, we find out that some mix can be as productive as a classical standard growing media. Composts composed of food wastes, contain high amount of nitrogen and are rapidly degraded. They can be very interesting for growing plants with short production cycles. But biowaste compost is still a scarce resource, and its price remain very high.

Mots-clés : compost, support de culture, production alimentaire, agriculture urbaine, déchets organiques

Key Words: compost, growing media, food production, city, urban farming, organic wastes

RAPPORT LIBRE DE DIFFUSER

AGROCAMPUS OUEST

☑ **CFR Angers**

☐ **CFR Rennes**

Année universitaire : 2017-2018

Spécialité : Paysage

Spécialisation : IEVU

Ingénierie des espaces végétalisés urbains

Option IVU

Mémoire de Fin d'Études

☑ d'Ingénieur de l'Institut Supérieur des Sciences agronomiques, agroalimentaires, horticoles et du paysage

☐ de Master de l'Institut Supérieur des Sciences agronomiques, agroalimentaires, horticoles et du paysage

☐ d'un autre établissement (étudiant arrivé en M2)

ANNEXES - Matériaux urbains issus de l'économie circulaire : vers des substrats innovants ?

Par : Laura BESSOUAT

Soutenu à : Agro Campus Ouest Angers
le 14 septembre 2018

Devant le jury composé de :

Président : Jean-Charles Michel

Maître de stage : Elise Sorin

Enseignant référent : Laure Vidal-Beaudet

Autres membres du jury :

Claire Grosbellet, responsable recherche et développement - entreprise Florentaise

Les analyses et les conclusions de ce travail d'étudiant n'engagent que la responsabilité de son auteur et non celle d'AGROCAMPUS OUEST

Ce document est soumis aux conditions d'utilisation
«Paternité-Pas d'Utilisation Commerciale-Pas de Modification 4.0 France»
disponible en ligne http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.fr

LISTE DES ANNEXES

ANNEXE I – FICHES TECHNIQUES DES 8 PRODUITS PARENTAUX UTILISES

ANNEXE II – DESCRIPTIF DU PROJET DE RECHERCHE TECHN'AU

ANNEXE III – DISPOSITIF EXPERIMENTAL ET PRATIQUES D'EXPERIMENTATION

ANNEXE IV – METHODES D'ANALYSES DE LABORATOIRE

ANNEXE V – PROTOCOLE ANALYSES CAPACITE A LA REHUMECTATION

ANNEXE VI – PROTOCOLE DE TRIE DES TOMATES CERISES

ANNEXE VII – EVALUATION DE LA PERCEPTION DE SUBSTRATS CONSTRUITS A BASE DE RESIDUS URBAINS PAR LES PROFESSIONNELS DE L'AGRICULTURE URBAINE

ANNEXE VIII – PHOTOGRAPHIES DE SUIVI HEBDOMADAIRE D'UN POT DE CHAQUE MODALITE

ANNEXE IX – RESULTATS TESTS STATISTIQUES

ANNEXE X – CARACTERISTIQUES BIOLOGIQUES DES SUBSTRATS DE DECHETS URBAINS, CONFRONTEES A D'AUTRES PRODUITS.

RAPPORT INTERMÉDIAIRE

ANNEXE I – FICHES TECHNIQUES DES 8 PRODUITS PARENTAUX UTILISES

Les fiches compilées ci-après présentent les produits utilisés ainsi que des détails concernant les entreprises qui les produisent.

Les produits sont présentés dans l'ordre suivant, comme présenté dans le mémoire (code couleur associé) :

1 - C1a - Compost de déchets verts
2 - M - Résidus de champignonière
3 - C2 - Compost de biodéchets Alchimistes
4 - C3 - Compost de biodéchets 'Moulinot'
5 - LC1 - Lombricompost de fumiers
6 - LC2 Lombricompost de biodéchets 'Moulinot'
7 - S1 - Béton cellulaire concassé
8 - S2 - Plaquette forestières

L'abréviation ND signifie que l'information n'a pas été donnée.

Les informations compilées proviennent des sources suivantes :

RAPPORT INTERMÉDIAIRE

Bibliographie

CBPC, 2014. MÉCAROANNE. Du béton cellulaire pour les fleurs. *Cahier CBPC 918 - Béton[s] le Magazine*. December 2014. No. 55, p. 10.

VOISIN CONSULTANT INGÉNIEUR CONSEILS, 2016. *ENREGISTREMENT Préparation et Transit de produits minéraux non dangereux 602, rue des Hauts Fourneaux 40210 Labouheyre* [online]. August 2016. Available from: http://www.landes.gouv.fr/

Sitographie :

ALCHIMISTES, 2018. Les Alchimistes – Collecter et Composter en Ville ! [online]. 2018. [Accessed 3 September 2018]. Available from: https://alchimistes.co/

BIO YVELINES SERVICE, 2018. Collecte et valorisation des déchets verts - Ile de France. *BioYvelinesService* [online]. 2018. [Accessed 3 September 2018]. Available from: https://www.bioyvelines.fr/

MOULINOT, 2018. Accueil - Moulinot. [online]. 2018. [Accessed 3 September 2018]. Available from: https://www.moulinot.fr/site/

Communication personnelles :

- Vincent Desbois, responsable de l'activité compostage de l'entreprise Moulinot.
- MisterLombric - Intermédiaire – commercial spécialisé en lombriculture.
- Thomas Haden et Kenzo Sato, de l'entreprise Les Alchimistes.
- Maximilien Koegler, responsable R&D de l'entreprise UpCycle

– Fiche technique matériaux parentaux -

- LE PRODUIT

Compost déchets verts

- Ø : 0.20
- Humidité (% MS) : 45-55 %
- MO (% MS) : 39.8 %
- Conductivité électrique : BG
- Densité (MVAp sèche) : NR
- pH : 7.5 à 8.5
- N(tot) 0.7 à 1.2% ; P-0.09 à 0.17% (P2O5) ; K-0.17 à 0.42% (K2O)

Fournisseur	Bio Yvelines Services
Utilisation prévue	Amendement organique utilisable aussi bien en agriculture conventionnelle qu'en agriculture biologique.
Composition	Déchets verts
Prix	8 € les 100L (prix facturé dans le cadre de cette étude)
Innocuité	Conforme à la norme « Amendement Organique » NFU 44-051.

- LOCALISATION ET FLUX GENERES

Secteur d'approvisionnement des composants	Région de Versailles (auprès des collectivités locales et d'entreprises d'espaces verts situées)
Mode d'approvisionnement	Camions benne
Lieu de traitement de la matière	78870 Bailly (Yveline)
Secteur de distribution du produit	Région Parisienne

- DISPONIBILITE (produit & matière première)

Volume de produit générés	
Volume annuel de déchet traités	Plus de 25 000 T/an
Volume total du gisement	Déchets verts : ressource quasi inépuisable en ville
Reproductibilité de process	Forte. Modèle réplicable ailleurs si espace pour aire de traitement

- PROCESSUS DE PRODUCTION VEGETERRE mis au point par l'ADEME

ETAPES

Réception + pesées + tri mécanique et un nettoyage manuel rigoureux / Broyage (criblage éventuel) / Mise en andain, fermentation / Criblage / Maturation sous hangar

DUREE TOTALE DU PROCESSUS 6 à 8 **MOIS**

- DETAILS CONCERNANT L'ENTREPRISE

Activité principale	Production de compost, matière végétale brute broyée, paillage
Localisation	78870 Bailly (Yveline)
Nombre de salariés	10 à 19 salariés
Pédagogie/lien au territoire	Structure d'Insertion par l'Activité Economique (SIAE) Contrat de réinsertion sociale Dispositif d'accompagnement vers l'emploi
Acteurs territoriaux impliqués	Structures spécialisées dans l'Economie Sociale et Solidaire : la direccte, Activit'y, La fédération des entreprises d'insertion, Pôle emploie

RAPPORT INTERMEDIAIRE

• LE PRODUIT

Résidus de support de culture de pleurotes

- Ø : 1 cm
- Humidité (% MS) : 46.3%
- MO (% MS) : 71%
- Conductivité électrique : 0.9 $mS.cm^{-1}$
- Densité (MVAp sèche) : 150 g/l
- C/N : 18.7
- pH : 6.5
- N(tot) : 1.03% ; P : 0.17 % ; K : 0.23%

Fournisseur	UpCycle
Utilisation prévue	Amendement organique
Composition	55% de marc de café 45% (paille de lin +copeaux de bois +cartons recyclés)
Prix	0.11 €/L (2€ sac de 18L) Pros : 60€/m3 ou 0.06 €/L Particuliers : 180€/m3 0.18€/L
Innocuité	Conforme à la norme « Amendement Organique » NFU 44-051.

• LOCALISATION ET FLUX GENERES

Secteur d'approvisionnement des composants	Marc de café : Île-de-France (cafétéria d'entreprises et distributeurs automatiques) Paille de lin - Copeaux de bois - Cartons : ND
Mode d'approvisionnement	Camion
Lieu de traitement de la matière	Yvelines (78)
Secteur de distribution du produit	Ile-de-France et Normandie (Agriculture urbaine, Paysagistes, Maraichers dans les Yvelines)

• DISPONIBILITE (produit & matière première)

Volume de produit générés	234 000 L/an (4500L/sem)
Volume annuel de déchet traités	648,000 kg
Volume total du gisement	600 000 T/an* (rejets marc à l'échelle de la France en 2015)
Reproductibilité de process	Forte. Modèle si locaux adaptés

• PROCESSUS DE PRODUCTION - DETAILS TECHNIQUES

ETAPES	DUREE	ENERGIE NECESSAIRE
Tri des matières entrantes et pasteurisation	ND	ND
Mélange marc + matières sèches + pleurotes	ND	ND
Ensachage	Quelques minutes	ND
Mise en culture - phase d'incubation (Colonisation du marc par les champignons)	2 semaines	ND
Fructification (chocs thermiques puis hydriques)	10 à 15 jours	ND
Récolte des pleurotes – Support prêt pour la vente	Quelques heures	ND

DUREE TOTALE DU PROCESSUS **1-2 MOIS (estimation)**

RAPPORT INTERMEDIAIRE

• DETAILS CONCERNANT L'ENTREPRISE	
Activité principale	Production de pleurotes, vente de kit prêt à pousser, production de compost
Localisation	78860 St-Nom-la Bretèche
Nombre de salariés	11, dont 3 équivalents temps plein en insertion professionnelle
Pédagogie/lien au territoire	Agrément ESUS (Entreprise Solidaire d'Utilité Sociale), Propose des formations à la récupération, valorisation Visites du site de production Sensibilisation au gaspillage alimentaire
Acteurs territoriaux impliqués	Nombreux partenaires : Vinci, Mairie de Paris 15e, Carrefour, Monoprix, Suez, Novotel, Elior etc.

RAPPORT INTERMÉDIAIRE

*Source : https://www.laboiteachampignons.com/

– Fiche technique matériaux parentaux -

• LE PRODUIT

Compost
intra- urbain

- Ø : 0.20
- Humidité (% MS) : 49.4 %
- MO (% MS) : 46.38 %
- Densité (MVAp sèche) : 158,28g/l
- pH : 9.2
- NPK(tot)1.45% ; P-0.85% (P_2O_5) ; K-0.49%

Fournisseur	Les Alchimistes
Utilisation prévue	Pots, jardinières ou plantes en pleine terre Paillage l'été
Composition	70 % de déchets alimentaires 30 % de déchets verts
Prix	Pro : 300 €/T (estimé, produit non encore commercialisé en gros) avec prix dégressif après la première tonne Particuliers : 1 400€/T
Innocuité	Conformes à la norme « Amendement Organique » NFU 44-051.

• LOCALISATION ET FLUX GENERES

Secteur d'approvisionnement des composants	Déchets alimentaires : Paris (centre-ville) (restaurant, épicerie bio) Déchets verts : déchetteries à proximité
Mode d'approvisionnement	Vélo électrique
Lieu de traitement de la matière	Les Grands Voisins
Secteur de distribution du produit	Paris (centre-ville)

• DISPONIBILITE (produit & matière première)

Volume de produit générés	7 000 L/ans (estimation par rapport à l'info 400L/2semaines)
Volume annuel de déchet traités	Capacité 30 T/an bientôt 600T/an
Volume total du gisement	Déchets alimentaires : 1.5 MT * / Déchets verts : quasi inépuisable
Reproductibilité de process	Très forte. Modèle réplicable n'importe où.

• PROCESSUS DE PRODUCTION - DETAILS TECHNIQUES

ETAPES	DUREE	ENERGIE NECESSAIRE
1. Tri à la main pour retrait indésirables 2. Broyage	2 h	ND
3. Ajout déchets broyés + copeaux de bois dans composteur électromécanique. Fermentation aérobie	2 semaines	ND
4. Maturation dans casiers en extérieur. Descente en température	4 semaines	ND
5. Criblage du compost obtenu	2h	ND

DUREE TOTALE DU PROCESSUS **6 SEMAINES**

RAPPORT INTERMEDIAIRE

- DETAILS CONCERNANT L'ENTREPRISE

Activité principale	Compostage
Localisation	Site des Grands Voisins - Paris (14e)
Nombre d'employés	Entre 3 et 6
Pédagogie/lien au territoire	Agrément ESUS (Entreprise Solidaire d'Utilité Sociale), Travailleur en contrat de réinsertion Visite de site, sensibilisation au gaspillage alimentaire
Acteurs territoriaux impliqués	Biocoop, Jubiles, Food de rue, Cuisine Rouge, Mairie du 14e, Hôtel George V

RAPPORT INTERMÉDIAIRE

• LE PRODUIT

Compost urbain

- Ø : 0.10
- Humidité (% MS) :
- MO (% MS) :
- Conductivité électrique : compléter
- Densité (MVAp sèche) :
- Capacité de rétention en eau :
- pH : 8.8
- N(tot) % ; P-0.41% (P2O5) ; K-0.23% (K2O)

Fournisseur	Moulinot compost
Utilisation prévue	Amendement universel, utilisable pour tout type de plantes.
Composition	1/3 de déchets alimentaires 2/3 de déchets verts
Prix	Pro : 250 €/T Particuliers : 2.5 € sac de 2.5 kg (1000 €/T)
Innocuité	Conforme à la norme « Amendement Organique » NFU 44-051.

• LOCALISATION ET FLUX GENERES

Secteur d'approvisionnement des composants	Déchets alimentaires : Paris + grande couronne (600 points de collecte) Déchets verts : déchetteries à proximité
Mode d'approvisionnement	25 Camions écologique roulant au Gaz Naturel de Ville
Lieu de traitement de la matière	Vert-le-Grand (Essonne)
Secteur de distribution (envisagé)	Rayon de 200 km maximum

• DISPONIBILITE (produit & matière première)

Volume de produit générés	1 000T/an
Volume annuel de déchet traités	2017 : 1 800 T collectées par la structure (6500 T méthanisées) – 3 000 T DV - dont 2 000 T DV utilisées pour le compost 15 00 T DA - dont 1 000 T DA utilisées pour le compost
Volume total du gisement	Déchets alimentaires : 1.5 MT * Déchets verts : quasi inépuisable
Reproductibilité de process	Forte. Modèle réplicable ailleurs si espace pour aire de traitement

• PROCESSUS DE PRODUCTION - DETAILS TECHNIQUES

ETAPES	DUREE	ENERGIE NECESSAIRE
1. Déconditionnement des DA (sac plastiques autres matériaux) 2. Mélange avec les déchets verts et mise en andains	4h pour camion de 7 tonnes	ND
3. Fermentation aérobie (arrosage et mélange l'andain par tracteur).	21 jours min (max 50 jours)	ND
Analyse microbiologique et regroupement de lots		
4. Poursuite de la maturation. Descente en température	3 mois	ND
Analyse microbiologique + analyses composition chimique		
5. Criblage du compost obtenu	1h pour 6T	ND

DUREE TOTALE DU PROCESSUS **5 A 8 MOIS**

RAPPORT INTERMÉDIAIRE

- DETAILS CONCERNANT L'ENTREPRISE

Activité principale	Production de compost, lombricompost et biogaz
Localisation	4 Rue de Gramont, 75002 Paris (siège)
Nombre de salariés	39 (26 postes en réinsertion professionnelle)
Pédagogie/lien au territoire	Agrément ESUS (Entreprise Solidaire d'Utilité Sociale), Proposons des parcours d'insertion et de qualification professionnelle Formation des équipes de restauration au tri Sensibilisation au gaspillage alimentaire
Acteurs territoriaux impliqués	Partenaires : Semardel, PIE (Paris Initiative entreprise), Synhorcat, Syctom, ADEME, France Active, INCO

RAPPORT INTERMÉDIAIRE

• LE PRODUIT

Lombricompost de fumiers

- Ø : 0.10
- Humidité (% MS) : 50%
- MO (% MS) : 22%
- Densité (MVAp sèche) : 600 g/l
- pH : 7
- N(tot) 1 % ; P – 0.35% ; K – 0.83%

Fournisseur	FERTISOL LOMBRICULTURE
Utilisation prévue	Amendement organique universel pour tout type de culture ou semi Utilisable en Agriculture biologique conformément à la règlementation CE n° 834/2007 du 28 juin 2007.
Composition	Fumiers bovin et équin
Prix	Particulier : 960€/T (24€ pour 25 kilos) Pro : 500 €/T
Innocuité	Conforme à la norme « Amendement Organique » NFU 44-051.

• LOCALISATION ET FLUX GENERES

Secteur d'approvisionnement des composants	Fumiers bovins : sur le site (exploitation mixte) Fumiers équins : d'un centre équestre voisin (+/- 5km)
Mode d'approvisionnement	Tracteur
Lieu de traitement de la matière	95420 CLERY EN VEXIN
Secteur de distribution du produit	Région parisienne essentiellement

• DISPONIBILITE (produit & matière première)

Volume de produit générés	300 à 500 T/an
Volume annuel de déchet traités	800 – 1 200 T/an (estimation 2 à 3 fois les volumes produits)
Volume total du gisement	Selon production du centre équestre et de l'exploitation agricole
Reproductibilité de process	Modérée en contexte urbain. Modèle réplicable mais nécessite de l'espace, et une source d'apport de fumier à proximité.

• PROCESSUS DE PRODUCTION - DETAILS TECHNIQUES

ETAPES	DUREE	ENERGIE NECESSAIRE
Précompostage des fumiers	2- 3 mois	ND
Mise en tas avec lombric et recouvrement de paille + bâche plastique Maturation	8 mois	ND
Stockage pour séchage		ND
Criblage + ensachage		ND

DUREE TOTALE DU PROCESSUS : **8 à 10 MOIS**

RAPPORT INTERMÉDIAIRE

• DETAILS CONCERNANT L'ENTREPRISE	
Activité principale	Fabrication de produits azotés et d'engrais, lombricompost spécifiquement
Localisation	Clery-en-Vexin (95), dans le Val d'Oise.
Nombre de salariés	1 équivalent temps plein
Pédagogie/lien au territoire	Animation autour de la lombriculture, visites (de scolaires notamment), conférences etc.
Acteurs territoriaux impliqués	Centre équestre fournisseur

RAPPORT INTERMÉDIAIRE

• LE PRODUIT

LombriCompost urbain

- Ø : 0.10
- Humidité (% MS) : 54 %
- MO (% MS) : 40.5 %
- Conductivité électrique : compléter
- Densité (MVAp sèche) : 360 g/l
- Capacité de rétention en eau : 253 ml/l
- pH : 8.8
- N(tot) 1.03% ; P-0.41% (P_2O_5) ; K-0.23% (K_2O)

Fournisseur	Moulinot compost
Utilisation prévue	Amendement universel, utilisable pour tout type de plantes.
Composition	1/3 de déchets alimentaires 2/3 de déchets verts
Prix	Pro : 500 €/T Particuliers : > 1000 €/T
Innocuité	Conforme à la norme « Amendement Organique » NFU 44-051.

• LOCALISATION ET FLUX GENERES

Secteur d'approvisionnement des composants	Déchets alimentaires : Paris + grande couronne (600 points de collecte) Déchets verts : déchetteries à proximité
Mode d'approvisionnement	25 Camions écologique roulant au Gaz Naturel de Ville
Lieu de traitement de la matière	Vert-le-Grand (Essonne)
Secteur de distribution du produit (envisagé)	Rayon de 200 km maximum

• DISPONIBILITE (produit & matière première)

Volume de produit générés	500 T/an
Volume annuel de déchet traités	2017 : 1 600 T collectées (6500 T méthanisées) – 3 000 T DV - dont 1 000 T DV utilisées pour le lombricompost 15 00 T DA - dont 500 T DA utilisées pour le lombricompost
Volume total du gisement	Déchets alimentaires : 1.5 MT * Déchets verts : quasi inépuisable
Reproductibilité de process	Forte. Modèle réplicable ailleurs si espace pour aire de traitement

• PROCESSUS DE PRODUCTION - DETAILS TECHNIQUES

ETAPES	DUREE	ENERGIE NECESSAIRE
1. Déconditionnement des DA (sac plastiques autres matériaux) 2. Mélange avec les déchets verts et mise en andains	4h pour camion de 7 tonnes	ND
3. Fermentation aérobie (arrosage et mélange l'andain par tracteur).	21 jours min (max 50 jours)	ND
Analyse microbiologique et regroupement de lots		
4. Poursuite de la maturation avec lombrics.	3 mois	ND
Analyse microbiologique + analyses composition chimique		
5. Criblage du compost obtenu	1h pour 6T	ND

DUREE TOTALE DU PROCESSUS **5 A 8 MOIS**

RAPPORT INTERMEDIAIRE

- DETAILS CONCERNANT L'ENTREPRISE

Activité principale	Production de compost, lombricompost et biogaz
Localisation	4 Rue de Gramont, 75002 Paris (siège)
Nombre d'employés	39 (26 postes en réinsertion professionnelle)
Pédagogie/lien au territoire	Agrément ESUS (Entreprise Solidaire d'Utilité Sociale), Proposons des parcours d'insertion et de qualification professionnelle Formation des équipes de restauration au tri Sensibilisation au gaspillage alimentaire
Acteurs territoriaux impliqués	Partenaires : Semardel, PIE (Paris Initiative entreprise), Synhorcat, Syctom, ADEME, France Active, INCO

RAPPORT INTERMÉDIAIRE

– Fiche technique matériaux parentaux -

- LE PRODUIT

COPOLIGHT®

- % de matière sèche : 65 %
- Conductivité électrique : 45 mS/m
- Densité : < 0.5
- Capacité de rétention en eau : 200 ml/l
- pH : 8.5

Fournisseur	Florentaise
Utilisation prévue	- Composant du substrat pour les toitures végétalisées, - Intégré aux supports de culture pour pépinière ornementale - Paillage
Composition	Déchets de fabrication d'une usine de production de SIPOREX, plaque de béton à base de Béton Cellulaire autoclavé, à base de sable
Prix	Paillage : 7/15mm 39.8€ pour 100L (Truffaut) ; 20/40 paillage 18€ pour 100L (jardidrive) ; 20/40 mm 20.2€ pour 100 L (Noeverda)
Innocuité	Respect norme SUPPORT DE CULTURE NF U 44-551

- LOCALISATION ET FLUX GENERES

Secteur d'approvisionnement des composants	XELLA à Mios (33) (60 km du site de production/traitement)
Mode d'approvisionnement	Camion
Lieu de traitement de la matière	Labouheyre (40)
Secteur de distribution du produit	France

- DISPONIBILITE (produit & matière première)

Volume de produit générés	ND
Volume annuel de déchet traités	2015 -24 jours de production - 2900 m^3 de béton cellulaire traité 2016 -37 jours de production - 5480 m^3 de béton cellulaire traité
Volume total du gisement	ND - En fonction des déchets de la chaine de production de SIPOREX
Reproductibilité de process	Forte. Possibilité de mise en place d'autres sites en France sous condition de l'existence d'un site d'approvisionnement

- PROCESSUS DE PRODUCTION - DETAILS TECHNIQUES

Etapes	2 broyages + criblage. Détail en annexe
Energie nécessaire	ND
Durée du processus	ND

- DETAILS CONCERNANT L'ENTREPRISE

Activité principale	Production de substrats et de produits de paillage
Localisation	Labouheyre (parmi les 9 sites de production en France) 40
Nombre d'employés	7 (sur le site de production)
Pédagogie/lien au territoire	-
Acteurs territoriaux impliqués	XELLA (fournisseur)

RAPPORT INTERMEDIAIRE

– Fiche technique matériaux parentaux -

• LE PRODUIT

Plaquettes forestières

- Ø : 20/40 mm
- Humidité (% MS) :
- MO (% MS) : 83.8 %
- Conductivité électrique : 9.1
- Densité (MVAp sèche) : 300 kg/m3
- Capacité de rétention en eau : ND
- pH : 7.5 à 8.5

$N_{(tot)}$ 0.15% ; $P_{(P2O5)}$- 0.06% ; $K_{(tot)}$-0.02%

Fournisseur	Bio Yvelines Services
Utilisation prévue	Paillage
Composition	Tronc et/ou gros bois issus de feuillus de la région parisienne. Issu de bois naturels d'élagage urbain ou de forêt
Prix	12 € les 100L (prix facturé dans le cadre de cette étude)
Innocuité	Conforme à la norme « Amendement Organique » NFU 44-051.

• LOCALISATION ET FLUX GENERES

Secteur d'approvisionnement des composants	Région de Versailles (auprès des collectivités locales et d'entreprises d'espaces verts situées)
Mode d'approvisionnement	Camions benne
Lieu de traitement de la matière	78870 Bailly (Yveline)
Secteur de distribution	Région Parisienne

• DISPONIBILITE (du produit & des matières premières qui le constituent)

Volume de produit générés	*Non renseigné*
Volume annuel de déchet traités	Plus de 25 000 T/an
Volume total du gisement	Déchets de tailles : quasi inépuisable en ville
Reproductibilité de process	Forte. Modèle réplicable ailleurs si espace pour aire de traitement

• PROCESSUS DE PRODUCTION - DETAILS TECHNIQUES

Réception + pesées + tri mécanique et un nettoyage manuel rigoureux.
Broyage
Criblage

DUREE TOTALE DU PROCESSUS pour un lot : **quelques jours (données estimée)**

• DETAILS CONCERNANT L'ENTREPRISE

Activité principale	Production de compost, matière végétale brute broyée, paillage
Localisation	78870 Bailly (Yveline)
Nombre de salariés	10 à 19 salariés
Pédagogie/lien au territoire	Structure d'Insertion par l'Activité Economique (SIAE) Contrat de réinsertion sociale Dispositif d'accompagnement vers l'emploi
Acteurs territoriaux impliqués	Structures spécialisées dans l'Economie Sociale et Solidaire : la direccte, Activit'y, La fédération des entreprises d'insertion, Pôle emploie

RAPPORT INTERMEDIAIRE

ANNEXE II – DESCRIPTIF DU PROJET DE RECHERCHE TECHN'AU

Intitulé : « Recherche et développement de solutions innovantes pour lever certains verrous technologiques et garantir la qualité des produits de l'agriculture urbaine »

Chef de projet : MOREL-CHEVILLET Guillaume

Origine du projet

En France et dans le monde on assiste à **l'émergence de projets d'agriculture intra-urbaine à fort degré de technicité et d'innovation comme les projets en milieu fermé.** Ces projets intègrent des cultures à la verticale ou en étages, dans des serres ou des conteneurs. Le présent projet a pour objectif de répondre à quelques problématiques identifiées par les porteurs de projet et qui répondent aux besoins de la filière professionnelle:

ACTION 1 - L'accès à la lumière naturelle, complexe en milieu urbain, et le besoin en apport de lumière artificielle.

ACTION 2 - L'utilisation de déchets organiques, d'origine urbaine, au sein de ces systèmes de production.

ACTION 3 - La perception sociétale de ces projets et de leurs produits : sur l'intégration paysagère et des services qu'elle peut offrir; mais aussi en termes d'attractivité pour les consommateurs (qualité gustative), de proximité, de diversité de l'offre et de prix.

Un questionnement majeur et transversal : la contamination et la qualité sanitaire des produits issus de ces systèmes de production en milieu fermé et utilisant les déchets comme ressource.

Ce programme de recherche développé de 2017 à 2018 s'appuie sur trois projets concrets : la production de fraises en conteneurs (Agricool) - la tour maraîchère de Romainville et les micropousses du Paysan Urbain) et deux territoires (Paris et Romainville).

Partenaires

Le projet Techn'AU associe structure de recherche, institut technique et entreprises privées. Les partenaires techniques impliqués dans la réalisation du projet, et constituant le comité de pilotage de cette mission sont :

- L'unité mixte de recherche (UMR) SADAPT AgroParisTech est impliquée dans la recherche sur l'agriculture urbaine.
- Terr'eau Ciel, un bureau d'études en agriculture urbaine et Paysagisme Comestible.
- Le Paysan Urbain, est une entreprise qui détient une micro-ferme urbaine agroécologiques, « économiquement viables, socialement responsables et inscrites dans leur territoire », spécialisée dans la culture de micro-pousse.
- Agricool, est une start-up qui produit et commercialise des fruits et légumes (fraises essentiellement) cultivés en ville dans des containers.

RAPPORT INTERMÉDIAIRE

ANNEXE III – DISPOSITIF EXPERIMENTAL ET PRATIQUES D'EXPERIMENTATION

Plan d'expérimentation

REPETITION N°1		REPETITION N°2		REPETITION N°3		REPETITION N°4	
LC2S1-R1-1	C1S1-R1-1	C2S1-R2-1	LC2S1-R2-1	C2S1-R3-1	C3S2-R3-1	LC1S1-R4-1	LC2S1-R4-1
LC2S1-R1-2	C1S1-R1-2	C2S1-R2-2	LC2S1-R2-2	C2S1-R3-2	C3S2-R3-2	LC1S1-R4-2	LC2S1-R4-2
LC2S1-R1-3	C1S1-R1-3	C2S1-R2-3	LC2S1-R2-3	C2S1-R3-3	C3S2-R3-3	LC1S1-R4-3	LC2S1-R4-3
C2S1-R1-1	C3-R1-1	T-R2-1	C3-R2-1	LC2S1-R3-1	C1S1-R3-1	C3-R4-1	C1S1-R4-1
C2S1-R1-2	C3-R1-2	T-R2-2	C3-R2-2	LC2S1-R3-2	C1S1-R3-2	C3-R4-2	C1S1-R4-2
C2S1-R1-3	C3-R1-3	T-R2-3	C3-R2-3	LC2S1-R3-3	C1S1-R3-3	C3-R4-3	C1S1-R4-3
LC1S1-R1-1	C3S1-R1-1-	C3S1-R2-1-	C1S1-R2-1	C3S1-R3-1-	LC1S1-R3-1	C2S1-R4-1	C3S2-R4-1
LC1S1-R1-2	C3S1-R1-1-	C3S1-R2-1-	C1S1-R2-2	C3S1-R3-1-	LC1S1-R3-2	C2S1-R4-2	C3S2-R4-2
LC1S1-R1-3	C3S1-R1-1-	C3S1-R2-1-	C1S1-R2-3	C3S1-R3-1-	LC1S1-R3-3	C2S1-R4-3	C3S2-R4-3
C3S2-R1-1	T-R1-1	C3S2-R2-1	LC1S1-R2-1	T-R3-1	C3-R3-1	C3S1-R4-1-	T-R4-1
C3S2-R1-2	T-R1-2	C3S2-R2-2	LC1S1-R2-2	T-R3-2	C3-R3-2	C3S1-R4-1-	T-R4-2
C3S2-R1-3	T-R1-3	C3S2-R2-3	LC1S1-R2-3	T-R3-3	C3-R3-3	C3S1-R4-1-	T-R4-3

Lutte contre les ravageurs

Tableau 1 - Calendrier des interventions de lutte contre les ravageurs

Semaine	Observation	Traitement	Fournisseur
Semaine 4	Forte installation de pucerons sur tous les pieds de tomates	Lâché d'auxiliaires (250 momies Aphidius ervi - 1 000 Aphidoletes aphidimyza)	Société Biobest
Semaine 5	Attaque importante des basilics par chenilles et escargots	Dépôt de Ferramol au pied des basilics - dans tous les pots	Société Biobest
Semaine 5	Attaque de mildiou (6 pieds fortement touchés)	Application d'une préparation (bicardonate de soude + savon noir) - sur pieds touchés	Interne
Semaine 8	Attaque de Doryphores	Application de Bacillus thuringiensis (souche "tenebrionis") - sur tous les pots	Société Biobest

RAPPORT INTERM

ANNEXE IV – METHODES D'ANALYSES DE LABORATOIRE

Tableau 1 - Analyses laboratoires conduites et méthodes associées

Paramètres analysés	Protocole / norme	Laboratoire en charge
Caractéristiques chimiques		
Carbone organique (g.kg-1)	NF ISO 10694	INRA Arras
Azote total (g.kg-1)	Méth. INRA interne	INRA Arras
Azote nitrique (N de NO3-) sur extrait au 1/25 au KCl 0.5 mol/l	Méth. INRA	INRA Arras
Azote ammoniacal (N de NH4+) sur extrait au 1/25 au KCl 0.5 mol/l	Méth. INRA	INRA Arras
pHeau	NF ISO 10390 adaptée	INRA Arras
Conductivité totale sur extrait 1/25 (m/v) à 25°C (mS.cm-1)	Méth. INRA	INRA Arras
Capacité d'échange cationique (spectrophotométrie)(cmol+.kg-1)	NF X 31-147	INRA Arras
Calcaire (CaCO3) total (g.kg-1)	NF ISO 10693	INRA Arras
Phosphore Olsen (P2O5) (g.kg-1)	NF ISO 11263	INRA Arras
Phosphore (P2O5) total HF (ICP-AES; g.100g-1)	Méth. INRA	INRA Arras
Potassium (K) échangeable à la cobaltilhexammine (ICP-AES) (cmol+.kg-1)	NF ISO 23470	INRA Arras
Potassium total HF (ICP-AES; g.100g-1)	NF EN ISO 111885	INRA Arras
Magnésium total HF (ICP-AES; g.100g-1)	NF EN ISO 111885	INRA Arras
Manganèse extractible à l'EDTA-BCR (mg.kg-1)	Méth. INRA	INRA Arras
Sodium (Na) soluble dans l'eau (EAF) Chlorures (Cl) solubles dans l'eau (chromatographie ionique)	Méth. INRA Méth. INRA	INRA Arras
Caractéristiques physiques		
Granulométrie 5 fractions sans décarbonation	NF X 31-107	INRA Arras
Matière sèche	Méth. interne selon NF EN 13040	AUREA
Masse volumique apparente	NF U44-175	AUREA
Propriétés physiques à pF 1.0, 1.7 et 2.0	Méth. Française	AUREA
Capacité à la réhumectation	Méth. interne AgrocampusOuest	UP EPHor ACO Angers
Caractéristiques organique		
ISB	XP U44-162	AUREA
Matière organique	Méth. interne selon NF EN 13039	AUREA

RAPPORT INTERMÉDIAIRE

ANNEXE V – PROTOCOLE ANALYSES CAPACITE A LA REHUMECTATION

Les 11 matériaux ont été préalablement portés à 33% d'humidité (exprimé en unité de masse), ce qui représente un état de déshydratation avancé pour des substrats, mimant un fort épisode de sècheresse.[1]

Des cylindre de 10 cm de haut par 2.5 cm de diamètre sont remplis de 200 cm3 de substrat. Puis placés dans le dispositif présenté figure 1.

Le but de ce dispositif est de mimer une irrigation du substrat au goutte à goutte. On considère que pour le volume du cylindre une irrigation correspond à un apport d'eau de 200 mL. Ce volume d'eau est versé dans l'ampoule à décantée puis laissé à s'écouler durant 5 min (en vue de mimer un débit 2,4 L/h). Une fois l'ampoule vide le cylindre reste à drainer durant 5 autres minutes puis le volume d'eau récupéré est mesuré.

Cette opération est répétée 10 fois, dans le but de mimer 10 arrosages.

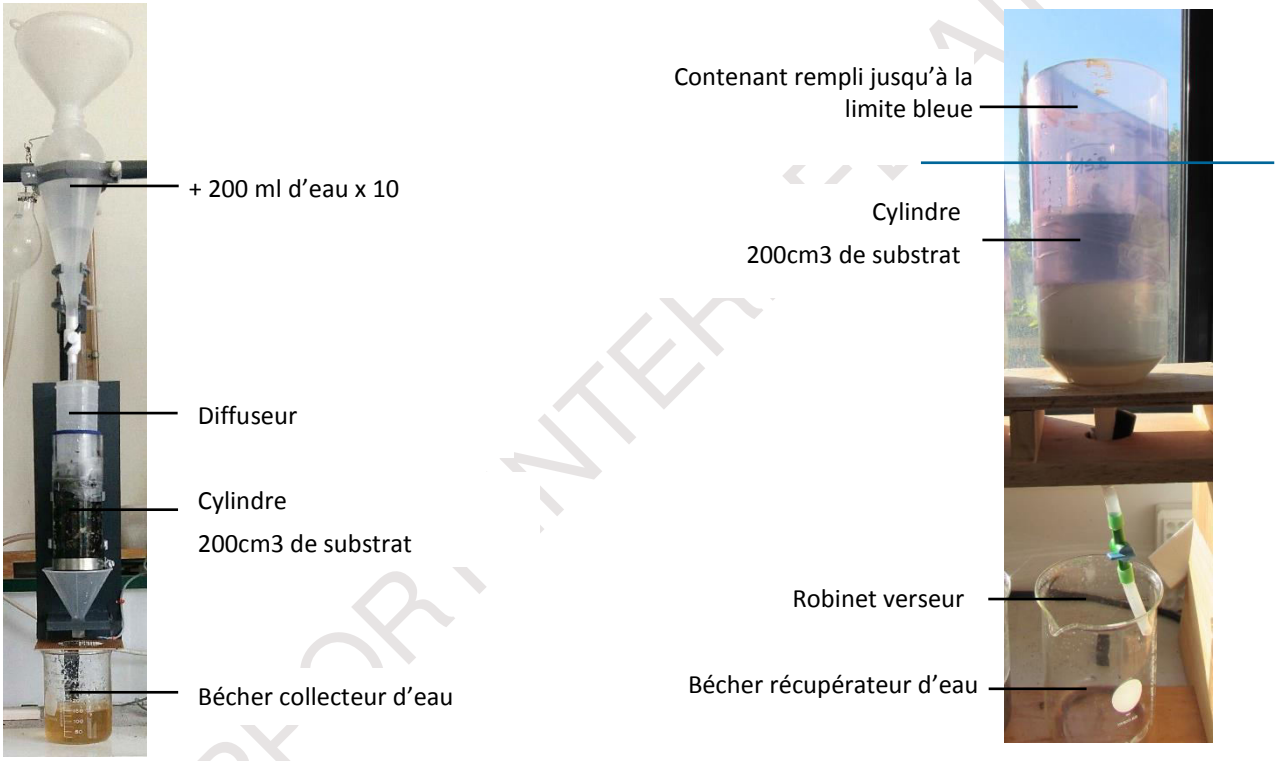


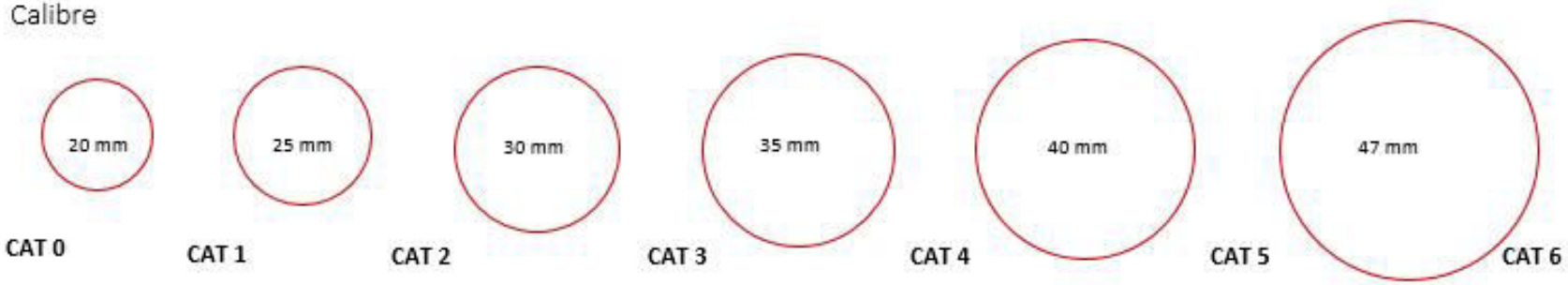
Figure 1 - Dispositif expérimental mis au point par (X) pour la caractérisation de l'aptitude à la réhumectation des matériaux. (a) Phase 1 : irrigations successives - (b) Phase 2 : mise à saturation

La colonne de substrat est récupérée, pesée puis mise à saturation par le bas, grâce au dispositif présenté en figure 1 (b) (pendant 20min). Elle est ensuite laissée à drainer durant 30min. Cette étape permet de définir la capacité de rétention du matériaux (capacité au champs), obtenue par le calcul de différence de masse du cylindre avant et après l'épisode de saturation.

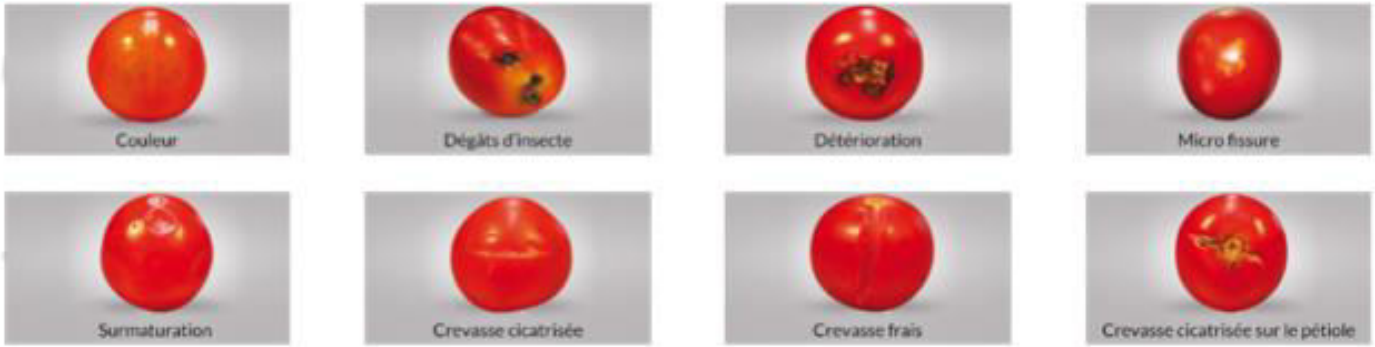
[1] L'un des matériau (M2B) n'a pas pu être abaissé jusqu'à 33% d'humidité, il a été porté à 47%.

TECHN'AU Echelle de taille et de qualité des tomates

Calibre



Qualité



Couleur

ANNEXE VII – Evaluation de la perception de substrats construits à base de résidus urbains par leurs professionnels de l'Agriculture Urbaine

Hypothèses

Avant la consultation du public nous posons les hypothèses suivantes, basées sur des études précédemment réalisées autour de cette thématique (un projet ingénieur (Aroun, Deladerriere, et Ruban 2017) le projet SITERRE(Damas et Coulon 2016),(Daniel 2017), (Morel-Chevillet 2017)), les échanges avec des experts du domaine (producteurs des produits utilisés), des professionnels et nos propres perceptions :

(1) Les diverses classes d'utilisateurs ciblées ont des niveaux de connaissances variables sur la notion de support de culture.

(On suppose un amalgame entre les notions de terreau, support de culture, fertilisant, produits phytos pour les particuliers.)

(2) Le niveau de connaissances sont variables concernant : la composition des substrats utilisés, l'origine des produits qui le compose, leur mode d'obtention et leur caractère plus ou moins renouvelable, destructeur vis-à-vis de l'environnement.

(3) Le compostage est un procédé plus ou moins connu (on suppose des amalgames chez les particuliers), mais qui véhicule une image plutôt positive. Le lombricompost à une meilleure image que le compost.

(4) Le support de culture est considéré comme un produit à usage unique ; par le particulier, le pro-producteur mais pas ou moins par l'agriculteur urbain (puisque pour eux le support de culture se substitue au sol (technosol)).

(5) Les diverses classes d'utilisateurs ont des niveaux d'acceptabilités variables vis-à-vis de la transformation de déchets en produits,

On suppose une acceptabilité plus forte chez les agriculteurs urbains (familiers du recyclage), puis les particuliers, puis les pro-producteurs (qui craignent une moindre efficacité et le développement de maladies).

(6) Le niveau de crainte vis-à-vis des pollutions/contaminations possibles par des produits résiduaires est haut. Pour toutes les catégories d'utilisateurs.

(7) L'association de certains termes à un produit peut modifier la perception de l'utilisateur.

(8) Les niveaux d'acceptation varient en fonction du degré d'information fourni.
Les informations telles que l'origine, le prix, la composition modifient l'avis de l'utilisateur.

(9) Les critères de qualité d'un substrat pour les utilisateurs sont :
La disponibilité ; les capacités agronomiques ; l'innocuité ; le prix ; la densité (poids) ; la capacité de rétention en eau (perte en eau, nombre et quantité d'arrosages nécessaires) ; le niveau d'entretient nécessaire (colonisation par une flore non désirée) ; la résistance au tassement, la durabilité dans le temps ; les critères sensoriels : aspect visuel, touché, odeur ; la participation à l'économie circulaire ; le caractère écologique, voire la certification biologique; le caractère innovant ; la popularité (utilisation par d'autres)

(10) L'ordre d'importance de ces critères est variable d'un groupe à l'autre.

(11) Les critères avancés par les utilisateurs ne sont pas nécessairement ceux qui motivent le choix final.

RAPPORT INTERMÉDIAIRE

SUITE _ ANNEXE VII – Evaluation de la perception de substrats construits à base de résidus urbains par leurs professionnels de l'Agriculture Urbaine

Protocoles

En bleu les temps où les participants sont sollicités

En gris les temps d'échanges, discussion libre, orientée par des questions posées par un modérateur neutre

Préambule : Présentation rapide du projet Techn'AU et de la mission du stage.

1.1 Etape 1 – Mise en contexte – 15 minutes

Echange autour des notions de support de culture, amendement, fertilisant.
Les participants sont amenés à présenter leurs pratiques, au fil des questions suivantes :
Quelle est votre rapport au végétal, votre activité ? Quel type de substrat utilisez-vous ? Où vous fournissez-vous, et à quelle fréquence ? Quelles sont les raisons qui motivent votre choix ? Connaissez-vous la composition, l'origine du/des produits que vous utilisez ? Etes-vous satisfait de l'offre proposée ?
Recueil des besoins :

- Quels sont pour vous les critères pour un bon substrat ?
- Une liste de critères pré-établie est soumise à chaque participant qui doivent les classer par ordre d'importance (ajout possible de critères).

Echange autour du compostage. Avec pour questions guides :
Utilisez-vous du compost ? autoproduit ? acheté ? si oui où ?
Et le lombricompostage ? Qu'elle différence y a-t-il entre compost et lombricompost ?

1.2 Etape 2 – Notation à l'aveugle – Perception sensorielle – 15-20 min

Les matériaux parentaux anonymés sont présentés dans des petits contenants (bocal en verre, barquette) avec possibilité de manipuler.

Recueil des ressentis, les participants sont amenés à :

- Voter : pour chaque échantillon, sur le fait que ce soit ou non un déchet (vote sous forme de billes de couleur à mettre dans une urne, rouge pour déchet, vert pour non déchet)
- Donner une note entre -3 et 3 pour chaque matériau (suivant les critère visuel (repoussant ou attrayant), bon ou non pour l'environnement ? Aptitude à être intégré dans un support de culture)

Les mélanges sont présentés aux participants, dans des pots de 1L pour une meilleure mise en situation. Possibilité de toucher, sous-peser etc.

Recueil des ressentis, les participants sont amenés à :

Classer les substrats du plus au moins aptes à remplir le rôle de support de culture (les 2, 3 meilleurs, les 2,3 moins bons)

1.3 Etape 3 – L'essai « Techn'AU »

1. Caractéristiques des composants les mélanges – Perception cognitive – 20 min

Les nom et provenance des matériaux parentaux composant les mélanges sont associés aux échantillons.

Leurs caractéristiques sont présentées sous forme des fiches techniques distribuée à chacun.

- Composition (produits en entré)
- Propriétés chimiques (N,P,K, pH)
- Granulométrie

RAPPORT INTERMÉDIAIRE

- Masse d'une couche de 10 cm et 30 cm au m2
- Origine géographique
- Processus de production (mode de collecte etc.)
- Disponibilité du produit (volume)
- Quelques détails sur l'entreprise productrice
- Prix

Recueil des idées. A la lumière des informations fournies il est demandé aux participants de :

Proposer un « mélange optimal » à partir de ces matériaux. Composition, et proportion libre.

2. Présentation des premiers résultats obtenus dans la cadre de l'essai – 20 min

Présentation de l'essai substrat 2018 :

Présentation générale : Composition des mélanges, conditions d'expérimentation,

Justification de la démarche : Choix du système de culture, le choix des matériaux, le choix des mélanges, des proportions.

Premier retour sur les résultats :

Grandes caractéristiques abordées :

- Développement des plantes
- Gestion quotidienne : facilité à la confection des mélanges, poids/maniabilité des pots, développement des adventices
- Gestion de l'irrigation : capacité de rétention en eau, éléments relargués par percolation
- Comportement des substrats 2017 après un cycle de culture.

Une fois toutes les informations fournies il est demandé aux participants de :

Classer les substrats qu'ils utiliseraient comme support de culture (les 3 meilleurs, les 3 moins bon – avec raisons du choix.

1.4 Etape 4 – Temps d'échange – 15-20 min

Débat ouvert

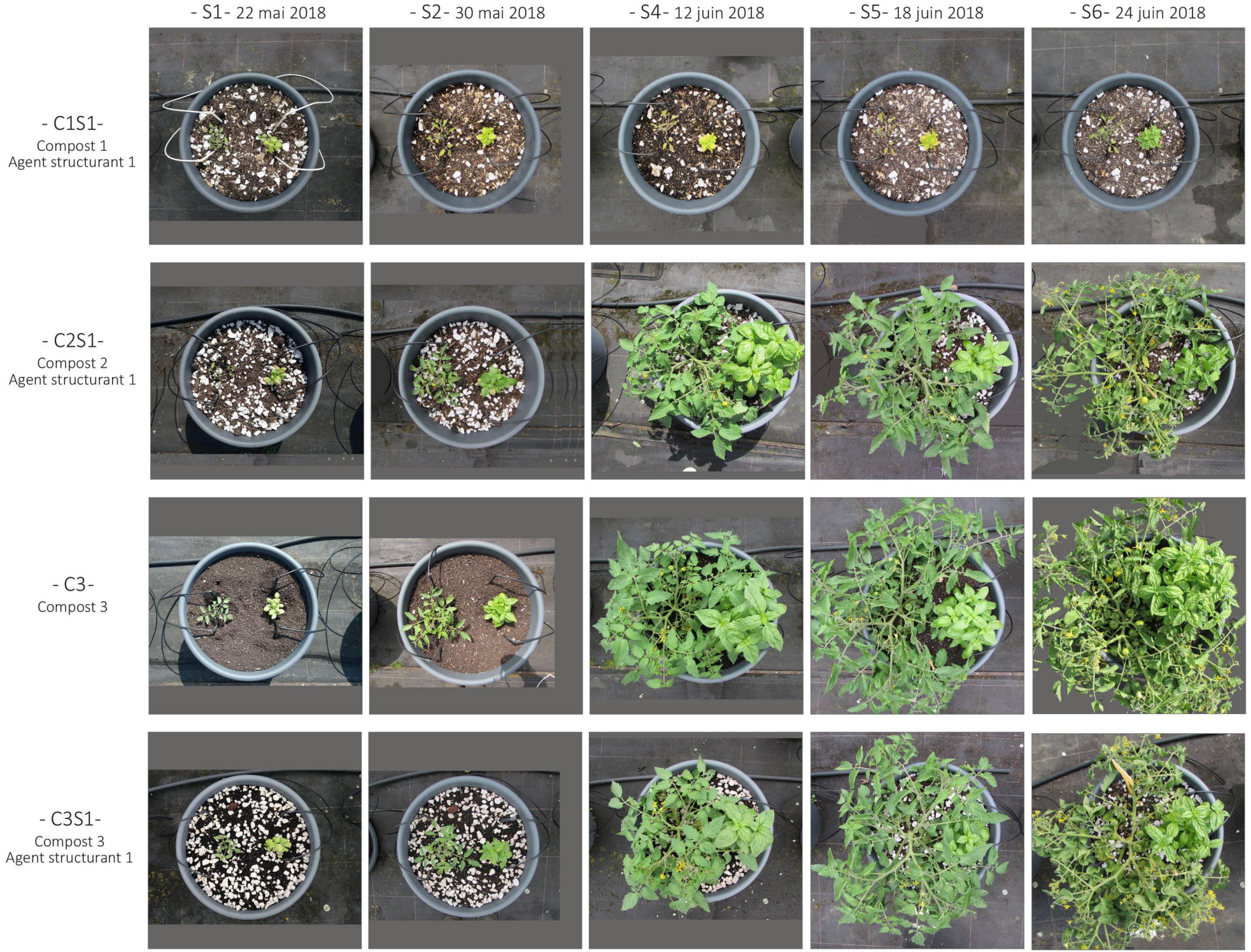
Questions/réponses

RAPPORT INTERMEDIAIRE

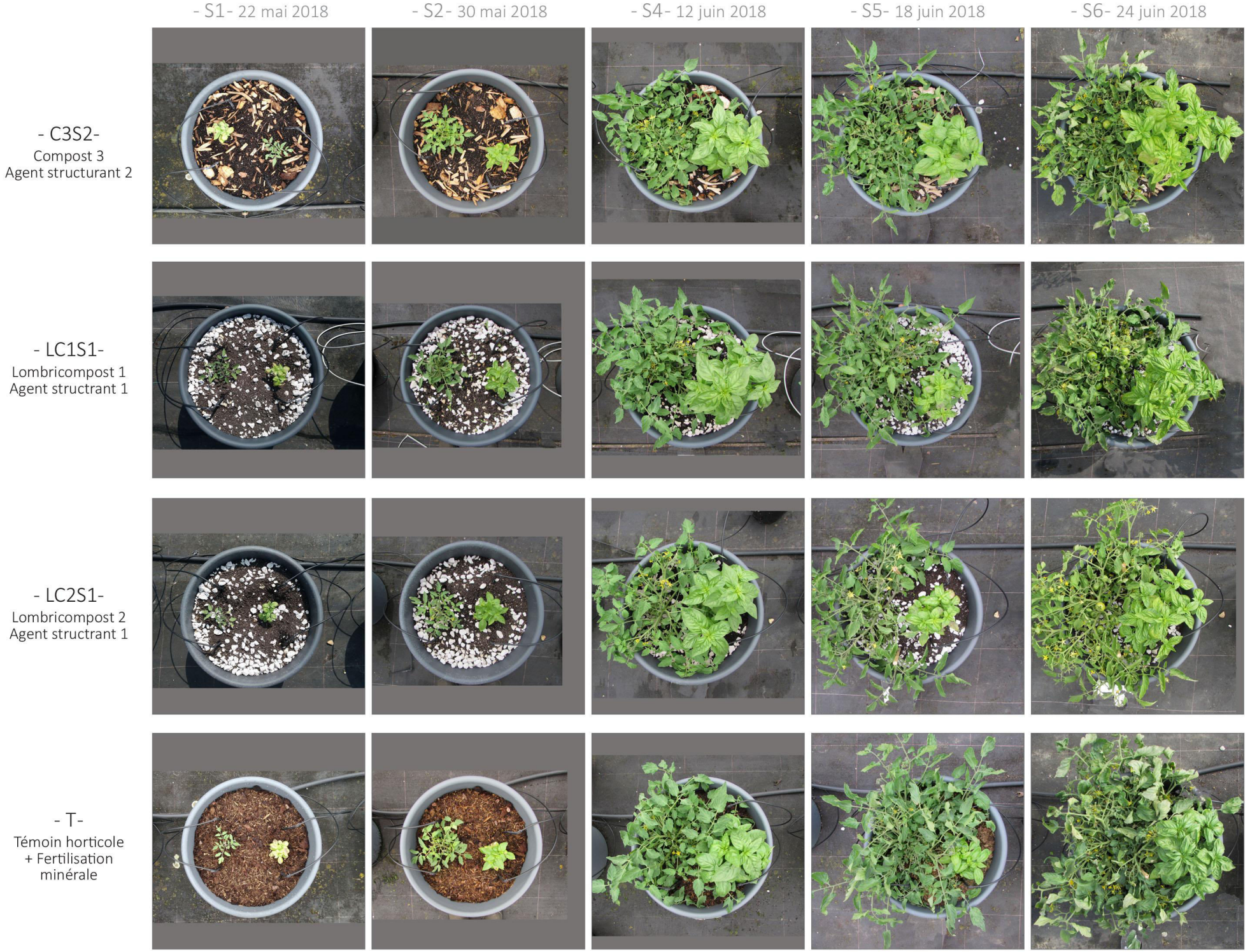
ANNEXE VIII – PHOTOGRAPHIES DE SUIVI HEBDOMADAIRE D'UN POT DE CHAQUE MODALITE

Photographies L.Bessouat, dates variables de mai à aout 2018, Saint-Germain en Laye

RAPPORT INTERMÉDIAIRE


- S1- 22 mai 2018
- S2- 30 mai 2018
- S4- 12 juin 2018
- S5- 18 juin 2018
- S6- 24 juin 2018
- C1S1-
Compost 1
Agent structurant 1
- C2S1-
Compost 2
Agent structurant 1
- C3-
Compost 3
- C3S1-
Compost 3
Agent structurant 1

	- S7- 2 juillet 2018	- S9- 16 juin 2018	- S10- 26 juin 2018	- S11- 01 août 2018	- S12- 11 août 2018
- C1S1- Compost 1 Agent structurant 1					
- C2S1- Compost 2 Agent structurant 1					
- C3- Compost 3					
- C3S1- Compost 3 Agent structurant 1					


- S1- 22 mai 2018
- S2- 30 mai 2018
- S4- 12 juin 2018
- S5- 18 juin 2018
- S6- 24 juin 2018
- C3S2-
Compost 3
Agent structurant 2
- LC1S1-
Lombricompost 1
Agent structrant 1
- LC2S1-
Lombricompost 2
Agent structrant 1
- T-
Témoin horticole
+ Fertilisation
minérale

	- S7- 2 juillet 2018	- S9- 16 juin 2018	- S10- 26 juin 2018	- S11- 01 août 2018	- S12- 11 août 2018
- C3S2- Compost 3 Agent structurant 2					
- LC1S1- Lombricompost 1 Agent structrant 1					
- LC2S1- Lombricompost 2 Agent structrant 1					
- T- Témoin horticole + Fertilisation minérale					

ANNEXE IX – RESULTATS TEST STATISTIQUES

Dans le 3.2.1.1 Mesures de hauteurs et diamètres, p.25 du mémoire, pour les résultats de croissance des tomates, les tests statistiques ont été menées sur les jeux de données obtenus à chaque date de prise de mesure.

Ci-dessous un résumé des résultats.

Tableau 1 - Récapitulatif des résultats des tests statistiques menés sur les données de cinétique de croissance des tomates.
NV = No Value, correspond aux cas où le test de Fisher n'a pas été conduit, les hypothèses de validité du modèle linéaire n'étant

	MOYS1	MOYS3	MOYS4	MOYS5	MOYS6	MOYS7	MOYS9	MOYS10	MOYS11	MOYS12
Shapiro-Wilk	0.3178	0.04723	3.521e-05	0.0013	2.645e-05	8.839e-05	0.05255	0.3634	0.4092	0.4441
Bartlett	0.5365	0.2078	0.01918	0.08698	0.2365	0.06913	0.2585	0.4868	0.3457	0.515
Fisher	0.764	0.00552 **	NV	NV	NV	NV	2.96e-06	1.06e-05	3.76e-06	6.28e-06

Dans le 3.2.2.1 , pour les résultats de production totales de tomates, des tests non paramétriques ont été utilisés.

Le test de Krukal-wallis, puis le test de Nemenyi. Ci-dessous, les résultats du test post hoc qui fournit des comparaison par paire ayant permis de déduire les classes présentées sur le graphique Figue 18 p.26

Tableau 2 - Résultats du test de Nemenyi pour le jeu de données de la production de tomate en masses totale. Comparaison par paires.

	C1S1	C2S1	C3	C3S1	C3S2	LC1S1	LC2S1
C2S1	0.9936	-	-	-	-	-	-
C3	0.3373	0.8425	-	-	-	-	-
C3S1	0.0082	0.0977	0.8767	-	-	-	-
C3S2	0.2006	0.6900	1.0000	0.9585	-	-	-
LC1S1	0.0063	0.0800	0.8425	1.0000	0.9409	-	-
LC2S1	0.3837	0.8767	1.0000	0.8425	1.0000	0.8037	-
T	0.4835	0.9304	1.0000	0.7608			
0.9997	0.7143	1.0000					

RAPPORT INTERMEDIAIRE

ANNEXE X – CARACTERISTIQUES BIOLOGIQUES DES SUBSTRATS DE DECHETS URBAINS, CONFRONTEES A D'AUTRES PRODUITS.

Tableau 1 - Valeurs de C/N observés pour divers matériaux organiques, dont les substrats issus de produits résiduaires urbains. Source : (Aboulam, 2005)

PRODUITS	C/N
Déchets de cuisine - Gazon - Compost de fumier (8 mois de fermentation)	10,0
C3S1	10,8
C3	10,8
Déchets de légume	11 à 12
LC2S1	11,3
C2S1	11,6
LC1S1	13,4
OMR	15,0
Fanes de légumineuses - Compost de fumier mûr, 4 mois (sans adjonction de terre)	15,0
C3S2	16,0
C1S1	17,6
Déchets de cuisine - Feuilles d'arbre (à la chute), Déchets verts de plantes (mélange tiges, feuilles etc.) - Fumier frais pauvre en paille	20,0
OMR	25,0
Tourbe noire	30,0
T	31,6
Compost urbain	34,0
Tourbe blonde	50,0
Taille d'arbre et d'arbustes	50-100
Paille d'avoine	50,0

RAPPORT INTERMÉDIAIRE

SUITE - ANNEXE X – CARACTERISTIQUES BIOLOGIQUES DES SUBSTRATS DE DECHETS URBAINS, CONFRONTES A D'AUTRES PRODUITS, SELON LES DONNEES TROUVEES DANS LA LITTERATURE.

Tableau 2 - Valeurs de CEC observés pour divers matrices (sols, substrats, composts), dont les substrats issus de produits résiduaires urbains. Source : (Baize, 2000) (Francou, 2003) (Parent et al., 2015)

PRODUITS	CEC (meq/100g)
Laine de roche	0
Kaolinite	3 à 15
Chlorite	10 à 40
Sols agricoles	10 à 20
Fibre de coco	25 à 90
Compost en début de compostage	40
C2S1	40,5
Sols organiques	50-200
LC1S1	55,06
C3S1	57,76
Compost en fin de compostage	60 et plus
C1S1	60,93
LC2S1	64,46
C3S2	65,2
C3	70,07
T	74,83
Smectite	80 à 150
Vermiculite	100 à 150
Zéolithe	120 à 250
Matière organique	150 à 300
Tourbe blonde	100 à 150
Tourbe noire	50 à 250

Le sol organique *: «* est un sol provenant (et se développant encore) de l'accumulation et de la décomposition progressives de matériaux végétaux et animaux, au fil des années ; généralement soit plus de la moitié de la couche de sol comprise entre 0 et 80 cm est organique ou la roche mère est recouverte directement d'une quelconque épaisseur de matière organique. »

RAPPORT INTERMEDIAIRE