



HAL
open science

Emploi de déchets dans la constitution de sol support de croissance des végétaux ligneux en milieu contraint : approche expérimentale

Romain Daolio-Dervaux

► To cite this version:

Romain Daolio-Dervaux. Emploi de déchets dans la constitution de sol support de croissance des végétaux ligneux en milieu contraint : approche expérimentale. Sciences du Vivant [q-bio]. 2015. dumas-01231512

HAL Id: dumas-01231512

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-01231512>

Submitted on 20 Nov 2015

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.

AGROCAMPUS
OUEST

CFR Angers

CFR Rennes



Année universitaire : 2013-2014

Spécialité :

Paysage

Spécialisation (et option éventuelle) :

Maîtrise d'Œuvre et Ingénierie

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)

Emploi de déchets dans la constitution de sol support de croissance des végétaux ligneux en milieu contraint : approche expérimentale

Par : Romain DAOLIO-DERVAUX

Soutenu à Angers le 29/06/2015

Devant le jury composé de :

Président : Patrice CANNAVO

Maître de stage : Laure VIDAL-BEAUDET

Enseignant référent : Vincent BOUVIER

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

Fiche de confidentialité et de diffusion du mémoire

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⁾.

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).

Date et signature du maître de stage⁽²⁾ :

Droits d'auteur :

L'auteur⁽³⁾ autorise la diffusion de son travail

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)

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

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 d'études

(4) La référence bibliographique (= Nom de l'auteur, titre du mémoire, année de soutenance, diplôme, spécialité et spécialisation/Option)) sera signalée dans les bases de données documentaires sans le résumé

Remerciements

Je tiens à remercier toutes les personnes qui m'ont aidé et soutenu au cours de ce stage et de la rédaction de ce mémoire :

- Laure VIDAL-BEAUDET, Vincent BOUVIER et Marie-Claude ASSERAY dont la patience et la sollicitude m'ont permis de tenir la distance
- Gilles GALOPIN et Nicolas pour leur aide précieuse avec PiafDigit
- Claudie MAZZEGA, Yvette BARRAUD-ROUSSEL et Sylviane DELEPINE-BOURGEOIS pour leur aide et leur disponibilité
- Aux thésards et stagiaires de l'unité pour leur bonne humeur inébranlable. Sofiane pour son aide tout au long du stage et son travail sur les propriétés hydrodynamiques des sols...
- Au personnel de l'exploitation d'Agrocampus Ouest pour leur disponibilité
- Un immense merci aux membres du CLAP pour leurs nombreux conseils avisés et leur abracadabrantesque alacrité

Table des matières

Introduction.....	1
I/ Etat de l'art : synthèse bibliographique.....	2
A. L'environnement de l'arbre en milieu urbain.....	2
1. <i>L'incompatibilité des besoins des végétaux avec ceux de la voirie.....</i>	2
2. <i>Caractéristiques du système racinaire des végétaux ligneux.....</i>	2
3. <i>Caractéristiques des technosols urbains.....</i>	4
4. <i>Solutions à l'implantation dans cet environnement.....</i>	4
B. Le mélange terre-pierre.....	5
1. <i>Principe.....</i>	5
2. <i>Les sols caillouteux.....</i>	5
3. <i>Connaissances spécifiques aux mélanges terre-pierre.....</i>	7
C. Construction de technosols fertiles et utilisation de déchets et sous-produits urbains.....	8
D. Synthèse et problématique.....	8
II/ Matériel et méthodes.....	10
A. Les formules de substrats utilisées.....	10
1. <i>Matériau de croissance.....</i>	10
2. <i>Mélanges terre-pierre.....</i>	10
B. Le site expérimental.....	11
1. <i>Installation.....</i>	11
2. <i>Démontage partiel.....</i>	12
C. Relevés de l'architecture des arbres.....	12
D. Mesure de la biomasse des arbres.....	13
1. <i>Parties aériennes.....</i>	13
2. <i>Racines.....</i>	14
E. Étude des racines par analyse d'image.....	14
F. Mesure de la fertilité physico-chimique des mélanges.....	15
1. <i>Granulométrie.....</i>	15
2. <i>Propriétés hydrodynamiques.....</i>	15
3. <i>Analyse chimique.....</i>	16
III/ Résultats.....	18
A. Développement des parties aériennes.....	18
1. <i>Biomasse des feuilles et tiges.....</i>	18
2. <i>Architecture des arbres.....</i>	19
B. Développement racinaire : colonisation du substrat.....	21
1. <i>Biomasse racinaire.....</i>	21
2. <i>Mise en place du protocole d'analyse d'images.....</i>	24
C. Fertilité physico-chimique des sols.....	25
1. <i>Masse volumique apparente.....</i>	25
2. <i>Granulométrie.....</i>	25
3. <i>Propriétés hydrodynamiques.....</i>	26
4. <i>Propriétés chimiques.....</i>	27

IV/ Discussion	29
A. Comparaison de la performance des arbres étudiés.....	29
B. Mise en relation avec les résultats sur la fertilité physico-chimique des sols ...	30
C. Synthèse	31
D. Conclusions sur le protocole d'analyse d'images de racines	Erreur ! Signet non défini.
Conclusion	32
Références.....	32

Table des illustrations

FIGURE 1 : MORPHOLOGIE DES SYSTEMES RACINAIRES PIVOTANT (1), FASCICULE DE TYPE "HEARTROOT" (2) ET FASCICULE "EN GALETTE" (3).....	3
FIGURE 2 : PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT D'UN MELANGE TERRE-PIERRE	5
FIGURE 3 : CARACTERISTIQUES ET DISPOSITION AU SEIN DU SITE EXPERIMENTAL DES BACS DE PLANTATION.....	11
FIGURE 4 : STRUCTURE INTERNE DES BACS DE PLANTATION.....	12
FIGURE 5 : PRINCIPE DE SAISIE DES RELEVES D'ARCHITECTURE ET EXTRAIT D'UN FICHER DE RELEVES (PHOTO PAR BEN LEGLER)	13
FIGURE 6 : BIOMASSE FOLIAIRE (G). LA MASSE SECHE EST RELEVÉE SUR UN SEUL INDIVIDU PAR MODALITE.....	18
FIGURE 7 : MASSE SECHE MOYENNE ESTIMÉE DES TIGES (G) PAR ORDRE. LES BARRES D'ERREURS REPRESENTENT LES ERREURS STANDARDS.	19
FIGURE 8 : LONGUEUR MOYENNE DES AXES (MM) PAR ORDRE ; ECHELLE LOGARITHMIQUE DE BASE 10. LES BARRES D'ERREURS REPRESENTENT LES ERREURS STANDARDS.	19
FIGURE 9 : NOMBRE MOYEN DE METAMERES PAR ORDRE. LES BARRES D'ERREURS REPRESENTENT LES ERREURS STANDARDS.....	20
FIGURE 10 : NOMBRE MOYEN D'AXES PAR ORDRE. LES BARRES D'ERREURS REPRESENTENT LES ERREURS STANDARDS.	21
FIGURE 11 : BIOMASSES RACINAIRES (G) PAR BLOC DE LA COUCHE SUPERFICIELLE (COUCHE I) DES BACS.	21
FIGURE 12 : BIOMASSES RACINAIRES (G) PAR BLOC DE MTP DE LA COUCHE INTERMEDIAIRE (COUCHE II) DES BACS.	22
FIGURE 13 : BIOMASSES RACINAIRES (G) PAR BLOC DE LA COUCHE PROFONDE (COUCHE III) DES BACS.....	22
FIGURE 14 : BIOMASSE RACINAIRE MOYENNE (G) DES BLOCS DE MTP PAR PROFONDEUR. LES BARRES D'ERREURS REPRESENTENT LES ERREURS STANDARDS.....	23
FIGURE 15 : BIOMASSE RACINAIRE TOTALE (G) ET PROPORTIONS DE RACINES DANS LE MTP ET LE MATERIAU DE CROISSANCE.	23
FIGURE 16 : COURBES GRANULOMETRIQUES MOYENNES DES DIFFERENTS MTP.	25
FIGURE 17 : CONDUCTIVITE HYDRAULIQUE (CM/H) EN SURFACE DES MELANGES EN FONCTION DE LA TENEUR EN EAU VOLUMIQUE (e/e).....	26
FIGURE 18 : COURBES DE RETENTION EN EAU DE SURFACE DES MELANGES : POTENTIEL MATRICIEL (kPA) EN FONCTION DE LA TENEUR EN EAU VOLUMIQUE (e/e).	27
TABLEAU 1 : LISTE DES GRANDEURS ISSUES DE L'ANALYSE DES RELEVES D'ARCHITECTURE DES ARBRES	13
TABLEAU 2 : MASSES VOLUMIQUES APPARENTES SUPERFICIELLES DES MELANGES ET TASSEMENT APRES UN AN DE PLANTATION.	25
TABLEAU 3 : RESERVE UTILE DES DIFFERENTS MELANGES.....	27
TABLEAU 4 : PROPRIETES CHIMIQUES DES MATERIAUX. LES VALEURS SONT MESUREES POUR LA TERRE FINE ($\phi < 2$ MM).	28

Liste des abréviations

BR-CO : matériau de croissance composé de brique et compost

CE : conductivité électrique

CEC : capacité d'échange cationique

HDPE : high-density polyethylene (polyéthylène de haute densité)

MO : matière organique

MTP : mélange terre-pierre

PF2 : plateforme de type 2

RU : réserve utile

TA-BA-BS : mélange de terre acide, ballast et boues de station d'épuration

TA-DB-DV : mélange de terre acide, déchets du bâtiment et déchets verts

TDR : time domain reflectometry

Introduction

La végétalisation des villes, à travers les espaces verts et la végétation d'alignement, joue un rôle important en influant sur l'environnement, le climat et la santé et le bien-être des populations urbaines. Dans un pays où 80% de la population réside en milieu urbain (Chavouet et Fanouillet, 2000), les enjeux liés au développement et au maintien de la végétation en ville revêtent donc une importance particulière.

Pourtant, les sols urbains et *a fortiori* les sols sous trottoir, qui accueillent les plantations d'alignement, sont loin d'être favorables à la croissance et au développement des végétaux, en particulier des ligneux dont le système racinaire est le plus exigeant. En effet, les contraintes physiques et chimiques, telles que la compaction importante des sols, leur faible perméabilité, la fertilité moindre et la sensibilité accrue aux conditions climatiques, ou encore anthropiques via la pollution et les dégâts infligés par les usagers sont autant de facteurs à prendre en compte qui limitent les performances de croissance des arbres en ville. Le recours à des sols artificiels pour surmonter ces contraintes a permis de végétaliser les villes en dépit de ces difficultés. Ces sols artificiels sont appelés « anthroposols construits » d'après le Référentiel pédologique français (Baize et Girard, 1995). Un des types d'anthroposols les plus couramment utilisés en fosse de plantation est le mélange terre-pierre (ou MTP), dont les propriétés permettent de limiter les contraintes imposées aux végétaux tout en assurant l'installation et le maintien d'une chaussée stable et sécurisée.

Actuellement, ces mélanges sont construits à base de terre végétale d'une part, issue du décapage de la couche superficielle de terres arables gagnées par l'urbanisation, et des pierres extraites de carrières d'autre part. Ces matériaux présentent non seulement un coût non négligeable, mais leur utilisation soulève aussi une série de problématiques liées au développement durable. Dans un premier temps, ces matériaux ne sont pas renouvelables, ce qui pose la question de leur raréfaction probable dans un avenir proche, d'autant que les politiques de développement territorial tendent de plus en plus vers la limitation de l'expansion urbaine. D'autre part, les distances d'approvisionnement sont de plus en plus importantes, augmentant le coût financier mais aussi environnemental des matériaux.

C'est dans ce contexte et afin de répondre aux problématiques économiques, sociétales et environnementales qui en découlent que le projet SITERRE (procédé de construction de Sols à partir de matériaux Innovants en substitution à la TERRE végétale et aux granulats de carrière) a vu le jour. Financé par l'ADEME, il a pour but la recherche de matériaux alternatifs susceptibles d'être substitués aux matériaux actuellement en usage pour la construction d'anthroposols possédant les fonctions de fertilité agronomique et de portance recherchées et s'affranchissant des problématiques soulevées par la terre végétale et les pierres de carrière.

Ce mémoire s'inscrit dans la tâche 4 du projet SITERRE qui consiste à étudier l'évolution des mélanges de matériaux vers des sols construits sous l'influence de phénomènes pédogénétiques, c'est-à-dire, l'évolution physique et chimique des sols construits.

Pour répondre à cette problématique, il convient d'étudier le comportement des végétaux dans un milieu urbain, puis de définir la nature et les caractéristiques des MTP utilisés classiquement, et enfin de déterminer si l'utilisation de déchets est une solution viable à la construction de sols de plantation.

I/ ÉTAT DE L'ART : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

A. L'environnement de l'arbre en milieu urbain

1. *L'incompatibilité des besoins des végétaux avec ceux de la voirie*

La pérennité des ouvrages et la sécurité étant prioritaires, la compaction des sols urbains est souvent telle que la masse volumique apparente n'est pas favorable au développement de végétaux ligneux. En effet, pour permettre à l'arbre un développement satisfaisant, il est nécessaire que la masse volumique sèche apparente du sol ne dépasse pas $1,65\text{t/m}^3$ en moyenne (Craul, 1992) tandis que la compaction permettant la stabilité des structures qui reposent sur le sol (revêtement, fondations, mobilier etc...) doit être de 90 à 95% de son potentiel maximal de compaction (optimum Proctor – Gras, 1988), ce qui limite le gonflement et la contraction dus aux mouvements d'eau sous l'effet du gel (Holtz & Kovacs, 1981 *in* Grabosky & Bassuk, 1995). La masse volumique apparente des sols portés à un tel niveau de compaction est généralement trop grande pour permettre la survie du système racinaire (Craul, 1992 ; Jim, 1998).

Les réseaux enterrés (eau, gaz, électricité, télécommunications, assainissement etc.) doivent rester accessibles pour permettre leur maintenance ou leur remplacement. Cela réduit le volume disponible pour les fosses de plantation et les interventions sur les réseaux sont souvent à l'origine de dégâts causés au système racinaire des végétaux présents.

2. *Caractéristiques du système racinaire des végétaux ligneux*

Il est important de bien connaître les propriétés des systèmes racinaires afin de qualifier leur développement. Différents types de racines et d'architectures racinaires, dont le développement est affecté par les propriétés du milieu dans lequel elles se développent, peuvent être distingués.

a) Les différents types de racines

Les végétaux ligneux présentent, sur le plan morphologique et fonctionnel, trois groupes racinaires, chacun contenant plusieurs classes d'axes (Atger, 1992) :

Les racines ligneuses coniques verticales, pérennes et de gros diamètre. Elles initient le système ramifié, le soutiennent et commandent sa différenciation plagiotrope. Leurs homologues horizontales sont elles aussi pérennes, à croissance indéfinie. Elles édifient le système et explorent le milieu.

Les racines ligneuses cylindriques sont horizontales et il en existe deux catégories. Les premières, épaisses, sont à croissance indéfinie, s'élaguent à moyen terme et servent à coloniser le milieu. Les secondes sont grêles, à croissance définie, caduques à moyen terme, et servent à l'exploitation du milieu (prélèvement de l'eau et des éléments nutritifs).

Les racines non lignifiées, appelées aussi chevelu racinaire quand considérées dans leur ensemble, sont courtes, dépourvues de formations secondaires, caduques à court terme et ont un rôle essentiellement colonisateur.

b) Architecture du système racinaire des végétaux ligneux

Les systèmes racinaires peuvent être regroupés en deux grandes catégories selon l'organe (tige ou racine) sur lequel prennent appui les racines charpentières (Bell, 1991).

Le système racinaire pivotant est formé d'une racine centrale opposée à la tige dont dérivent tous les axes et qui supporte donc la totalité des racines du système. C'est le type d'architecture le plus fréquent chez les dicotylédones.

Le système racinaire adventif, ou fasciculé, présente plusieurs racines d'origine adventive, qui dérivent de la tige par ramification. C'est le type d'architecture le plus fréquent chez les monocotylédones (Atger, 1992).

Les végétaux ligneux étant des dicotylédones, les arbres plantés en ville présentent la plupart du temps un système racinaire pivotant, au moins au début du développement. Cependant l'architecture peut s'éloigner plus ou moins du modèle selon les essences. Certaines conservent plus longtemps un pivot fort mais il est courant d'observer l'apparition à moyen terme d'un système fasciculé (Raimbault, 2000). Ces systèmes fasciculés peuvent être répartis en deux catégories : dans le cas où la racine primaire ne s'enfonce pas en profondeur mais s'étend sous la surface, on parlera de système « en galette » ou « flatroot » tandis que le système dit de type « heartroot » présente des axes verticaux distribués plus verticalement et de façon plus homogène qui se divisent en plus petites racines. Les différents types d'architecture racinaire sont présentés par la Figure 1.

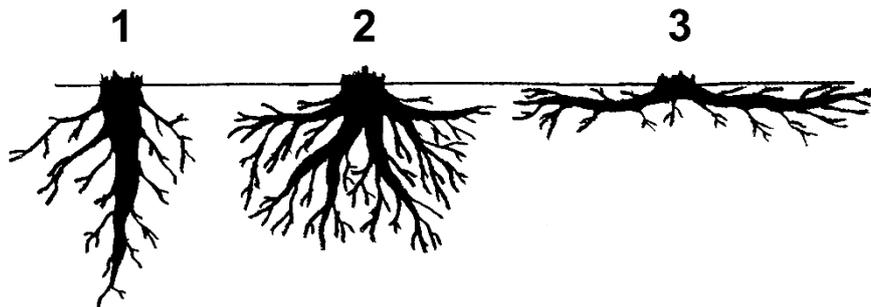


Figure 1: Morphologie des systèmes racinaires pivotant (1), fasciculé de type "heartroot" (2) et fasciculé "en galette" (3)

Le traitement des racines en préparation de la transplantation, extrêmement fréquente pour les arbres d'alignement, élevés majoritairement en périphérie, affecte le développement du système racinaire. Les racines sont régulièrement coupées pour favoriser leur développement en motte compacte, ce qui entraîne un développement fasciculé précoce du système racinaire. Un arbre transplanté étend son système racinaire en surface et n'émet de racines profondes que lorsque cet enracinement superficiel est suffisamment établi (Raimbault, 2000).

c) Longueur racinaire

La profondeur et la distribution des racines varient drastiquement en fonction des essences, du climat et des propriétés du substrat (Smit *et al.*, 2000). Le développement racinaire est affecté de manière quantitative et non qualitative par le milieu : ce dernier est susceptible d'agir sur des mécanismes de croissance d'axes racinaire mais n'influe pas sur la structure du système racinaire, qui est fixée génétiquement (Atger, 1991).

La densité de longueur racinaire est définie comme la longueur cumulée de racines dans un volume de sol donné et diminue avec la profondeur dans la majorité des systèmes racinaires (Gajri, 1994). Une grande proportion de la longueur racinaire est représentée par de courts axes de longueur inférieure à 10cm, y compris pour les systèmes racinaires explorant de grands volumes de substrat (Lyr et Hoffmann, 1967).

3. *Caractéristiques des technosols urbains*

Les sols sous trottoir n'ont pas les mêmes caractéristiques que ceux que l'on peut trouver dans des milieux présentant des contraintes moindres pour le développement des végétaux ligneux. La compaction artificielle de ces sols et la présence de revêtements imperméables en surface sont à l'origine de ces propriétés inhabituelles.

a) Masse volumique apparente

Les masses volumiques apparentes des sols urbains rapportées par Jim (1998) vont de 1,15 à 2,63t/m³. Il existe une différence significative de longueur de racines latérales lorsque la masse volumique passe de 1,40 à 1,55 t/m³ (Simmons & Pope, 1988 *in* Craul, 1992). Les masses volumiques apparentes au-delà desquelles on n'observe plus d'élongation racinaire sont respectivement de 1,46 t/m³ pour une texture fine (Craul, 1992) et 1,67 t/m³ pour une texture grossière (Foil & Ralston, 1967, Heilman, 1981, Landon, 1991 *in* Jim, 1998).

b) Porosité totale

Le compactage d'un sol a pour effet de réduire la porosité en même temps qu'il augmente la masse volumique apparente. La macroporosité est la plus concernée par ce phénomène et certains macropores passent à l'échelle de la microporosité (Craul, 1992). Dans un sol urbain, sujet à un compactage important, le diamètre moyen des pores est donc faible, ce qui augmente la résistance mécanique à la pénétration des racines.

c) Perméabilité et apport en eau

Le renouvellement de la réserve en eau par les précipitations est très limité en raison de deux facteurs : une faible surface d'entrée en surface due aux revêtements imperméables d'une part, et une baisse de porosité du sol en raison d'une perte de macroporosité (Bourgerly & Maillet, 1993). Les arbres d'alignement ont, en conséquence, généralement besoin d'un apport complémentaire en eau par irrigation.

d) Échanges gazeux

Les échanges gazeux sont réduits par la perte de macroporosité et la tortuosité de cette dernière, générée par le réarrangement des pores, qui limitent le volume disponible pour les gaz et nuisent à leur diffusivité (Schröder, 1993). Le renouvellement des gaz du sol étant limité, Craul (1992) note une accumulation de dioxyde de carbone à proximité des racines menant éventuellement à un dépassement du seuil de toxicité.

4. *Solutions à l'implantation dans cet environnement*

Une solution permettant l'implantation d'arbres dans ce milieu contraint est l'aménagement de fosses de plantation qui présentent des conditions satisfaisantes pour le développement des racines à proximité de la motte. En pratique, les fosses font entre 2 et 12 m³ afin de garantir la reprise au cours des premières années. Ces fosses sont ensuite remplies, dans la plupart des

cas, de terre végétale, terre provenant du décapage sur 30 cm de profondeur de terre agricole. On parle alors de reconstitution de sol (Baize & Girard, 1995).

Malgré le soin apporté aux substrats servant à la reconstitution des sols pour les préserver de tout compactage lors du transport et de l'installation, le sol se tasse toujours au cours du temps sous l'effet des vibrations résultant du trafic, du piétinement et des travaux environnants. Craul (1992) nous apprend que les sols situés à proximité des routes ou des tunnels de métro sont sujet à une importante compaction résultant de l'exposition importante et prolongée aux vibrations.

Une autre solution, apparue en France en 1986, consiste à mélanger de la pierre à la terre des fosses de plantation. Son usage s'est significativement étendu et c'est actuellement une solution privilégiée pour répondre aux exigences culturales des arbres en milieu urbain.

B. Le mélange terre-pierre

1. Principe

Le mélange terre-pierre est un sol reconstitué à partir, comme son nom l'indique, d'un mélange (dont les proportions varient selon les techniques) de terre de plantation et de pierres d'un calibre variant généralement entre 20 et 150mm (Figure 2).

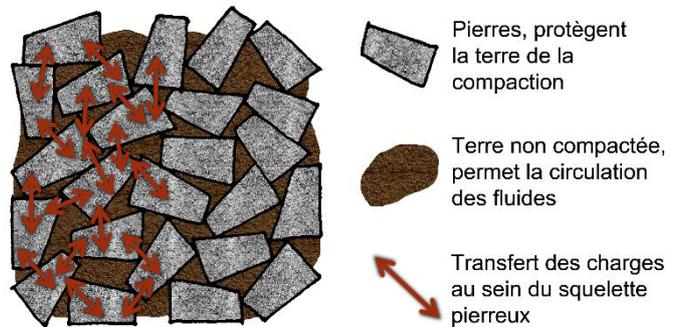


Figure 2 : Principe de fonctionnement d'un mélange terre-pierre

Les pierres forment, après compaction, un squelette rigide et peu déformable permettant le transfert des charges de pierre à pierre du fond de fosse de plantation au corps de chaussée/trottoir (Grabosky & Bassuk, 1995) qui assure la capacité de portance de la structure.

La terre de plantation occupe l'espace séparant les éléments du squelette et est préservée de la compaction. La réussite du mélange dépend donc du calcul des proportions de terre et de pierre dans le mélange. En effet, le volume de terre apporté doit être égal au volume d'espace vide entre les granulats après compactage. Un volume trop faible ne remplira pas entièrement les interstices tandis qu'un volume trop important autorisera le compactage de la terre et réduira l'intérêt de l'opération. Le volume de terre à apporter varie, en fonction des constituants du mélange, de 20 à 50% du volume de pierre utilisé.

Le matériau pierreux choisi doit pouvoir supporter les contraintes mécaniques lors de l'opération de compaction à la pose et pendant l'usage afin d'assurer la portance des structures. Son calibre est choisi pour avoir le plus grand volume de vide possible sans nuire à la résistance mécanique afin de permettre le développement des racines. La terre de plantation quant à elle doit avoir de bonnes capacités d'aération et de rétention d'eau.

2. Les sols caillouteux

La compréhension du fonctionnement des sols caillouteux naturels nous renseigne sur les propriétés que l'on peut attendre d'un mélange terre-pierre. Cependant, en agro-pédologie, les

références à ces sols sont assez rares et on s'intéresse plus souvent à la fraction non-caillouteuse des sols pour étudier leur fertilité, bien que la fraction la plus grossière des sols puisse jouer un rôle important dans leur fonctionnement. Raymond Gras (1994) a rassemblé dans un ouvrage les connaissances concernant les sols contenant des éléments grossiers. Ceux-ci agissent à trois niveaux : ils influencent la structure de la terre fine, la température du sol et la dynamique de l'eau dans ce dernier.

a) Structure de la terre fine

La présence d'éléments grossiers diminue les tassements provoqués par le poids des couches sus-jacentes de sol et par les contraintes extérieures (poids d'un véhicule par exemple). Lorsque la teneur en éléments grossiers atteint en moyenne 50% du volume de sol, ceux-ci constituent un réseau continu qui supporte la totalité des contraintes de surface.

En surface, les cailloux dissipent en grande partie l'énergie cinétique des gouttes d'eau (pluie, aspersion...). Ceci a pour effet de protéger la structure de surface contre le tassement et, à terme, permet une meilleure infiltration, diminue le ruissellement et donc l'érosion. Ils jouent aussi le rôle de couverture diminuant l'évaporation (Gras, 1994).

b) Température du sol

La forte diffusivité des granulats de diamètre important favorise les échanges de température dans le sol, ce qui les rend plus sensibles au réchauffement diurne et au refroidissement nocturne. En culture, cela a tendance à favoriser la précocité de production. Toutefois, la diffusivité du sol dépend aussi d'autres facteurs, telles que la porosité et la teneur en eau (Gras, 1994).

c) Dynamique de l'eau

L'influence des éléments grossiers sur la perméabilité d'un sol peut varier. En effet, s'ils ont tendance à augmenter la macroporosité de la terre fine, ils réduisent la section d'écoulement, ce qui peut induire une diminution de la perméabilité du sol dans son ensemble. Concernant l'écoulement des eaux, les cailloux poreux se comportent généralement comme des éléments inertes et pleins, les pores traversant rarement les éléments de part en part. Selon les propriétés et les proportions des matériaux utilisés, la présence d'éléments grossiers peut donc augmenter ou diminuer la perméabilité d'un sol (Gras, 1994).

Les éléments grossiers du sol participent à la réserve en eau. En effet, l'humidité de ces éléments varie en fonction de la teneur en eau du sol (capacité au champ / point de flétrissement). De plus, on peut généralement observer la présence de radicelles à la surface de ces éléments ou dans leurs éventuels pores. La capacité de rétention en eau des cailloux dépend des caractéristiques de leurs pores : les pores larges retiennent une quantité d'eau variant selon les conditions d'humectation et la dimension des granulats tandis que les pores étroits garantissent une humidité importante et indépendante de ces paramètres. Les échanges d'eau entre la terre fine et les éléments grossiers se font le plus souvent facilement. De manière générale, les éléments grossiers retenant souvent moins d'eau que la terre fine, la dilution de cette dernière par les éléments grossiers entraîne une diminution de la capacité de rétention globale du sol. L'irrigation doit donc se faire en plus petites quantités mais avec une fréquence supérieure (Gras, 1994).

3. Connaissances spécifiques aux mélanges terre-pierre

a) Caractérisation de la portance

Des essais à la dynaplaque ont été réalisés pour des MTP de granite et pouzzolane de calibre 40/120 en faisant varier différentes modalités (Sol Paysage, 1996). La dynaplaque est un générateur d'impulsions appliquant sur le sol à ausculter une sollicitation dynamique analogue au passage d'un essieu de 13t roulant à 60km/h. Elle permet un contrôle rapide de la portance d'un sol. Les MTP à base de granite ont une portance significativement supérieure à ceux à base de pouzzolane (respectivement 71,5 et 48,5 MPa). Des proportions granite/terre de 3:1 et 2:1 offrent la meilleure portance (respectivement 75 et 72 MPa) en comparaison d'un mélange 1:1 (54 MPa).

La mise en œuvre en 3 couches de 40 cm permet également d'obtenir une meilleure portance qu'en une unique couche de 120 cm (respectivement 78 et 68 MPa). L'établissement en tranchée donne aussi une meilleure portance par comparaison à la fosse de plantation individuelle (81 et 65 MPa). La classe de plate-forme correspondant à toutes ces valeurs de portance, PF2 (50 à 120 MPa), permet la circulation de piétons et cyclistes ainsi qu'une circulation faible ou un stationnement de véhicules ou utilitaires légers.

b) Observation de profils

Des observations de profils de mélanges en proportions 3:1 à base de granulats de granite et pouzzolane de calibre 40/120 ont été réalisées (Sol Paysage, 1996). Elles montrent que les pierres forment un squelette continu dont les espaces inter-granulats sont remplis de terre non compactée. Il existe un gradient vertical de densité pour chaque couche de 40 cm. On trouve une très fine couche de terre fortement compactée en surface de chaque couche, puis la densité de terre est de forte à moyenne en s'éloignant de la surface de la couche.

c) Observation de développement

La croissance de plusieurs essences d'arbres, plantés en fosses de MTP et dans le sol non compacté d'une pelouse de parc public, a été comparée (Grabosky *et al.*, 2002). Aucune différence significative n'a été observée.

Les racines de quatre essences d'arbres (*Tilia X euchlora*, *Carpinus betulus*, *Alnus cordata*, *Acer platanoides*) sont plus ramifiées, plus nombreuses et de plus faible diamètre dans un MTP que dans une terre simple. La longueur totale de racine est comparable mais les spécimens en MTP colonisent davantage le sol en profondeur (Bensaoud & Marié, 2000).

L'observation des racines, chez un *Fraxinus americana* en place depuis 2 ans, montre un chevelu racinaire abondant colonisant le milieu extérieur à la motte de pépinière (Raimbault, 2000).

Grabosky & Bassuk (1995) observent également des mycorhizes dans un essai sur des containers de 15 l de MTP.

Dans une terre compactée à une masse volumique de 1,67 t/m³, la croissance racinaire est complètement arrêtée. Des mélanges terre-pierre répondant aux mêmes exigences de portance permettent la croissance des racines avec des masses sèches racinaires comparables à celles trouvées sur des témoins en terre non compactée. Les racines en MTP sont déformées : elles

ont tendance à s'aplatir pour passer d'une cavité à l'autre et retrouvent leur forme cylindrique une fois l'interstice passé (Grabosky & Bassuk, 1996).

La mise en place d'un mélange terre-pierre nécessite l'acheminement en grande quantité de deux matériaux sur le site d'installation : de la terre végétale et un matériau pierreux. Compte tenu des nouvelles politiques visant à freiner l'expansion urbaine en faveur d'une densification et de l'optimisation croissante de la valorisation des matériaux sur site, les volumes de terre végétale disponibles sont amenés à diminuer au fil du temps. D'un point de vue logistique, l'acheminement de terre et de pierres sur une longue distance a un coût non négligeable. C'est donc un double enjeu de raréfaction de la matière première et d'économie qui pousse à rechercher de nouveaux matériaux à intégrer dans le processus de construction de sols.

C. Construction de technosols fertiles et utilisation de déchets et sous-produits urbains

De nombreux déchets permettent de répondre aux besoins nutritifs des plantes sous forme d'éléments nutritifs assimilables ou d'endosser la fonction de portance d'un sol. Il existe, entre autres, les matériaux organiques d'origine urbaine et industrielle et les matériaux grossiers issus le plus souvent de la déconstruction (Rosenbaum *et al.*, 2003). Sur 355 millions de tonnes de déchets produits en France pendant l'année 2010 (ADEME), 33% sont issus d'activités de construction et environ 50% sont des déchets d'origine organique. Parmi tous ces déchets, il convient de se demander quelle proportion est utilisable pour construire des sols. La gestion de déchets ménagers est réglementée par l'agence de l'environnement via le code de l'environnement Livre V Titre IV Chapitre I, « Elimination des déchets et récupération des matériaux » dans les articles 541-1 à 541-50 et Livre I Titre II Chapitre IV.

La brique peut être un bon substitut aux matériaux terreux de par sa porosité et sa contribution au stock d'éléments nutritifs tels que le potassium, le magnésium, le calcium ou encore le soufre (Nehls *et al.*, 2012). Les sous-produits papetiers, d'origine organo-minérale sont déjà utilisés en construction de sol et présentent des propriétés de rétention de l'eau intéressantes (Séré *et al.*, 2008 ; Séré *et al.*, 2010). Le compost et la tourbe permettent, entre autres, l'amélioration de la porosité, de la masse volumique apparente ou encore de la capacité de rétention en eau (Grosbellet *et al.*, 2011). La teneur en éléments nutritifs et le ratio carbone/azote de certains déchets organiques comme les boues de station d'épuration (STEP), les déchets municipaux solides et les composts en font des candidats potentiels en tant que ressource pour la production végétale (Van Voorhoeve, 1974 ; Misra & Hesse, 1983, Parr & Colacicco, 1987). Les résidus de végétaux renouvelables sont une source de phosphore pour le sol mais la disponibilité de l'élément dans les systèmes reste peu maîtrisée et demande une étude au cas par cas du couple déchet-sol (Fuentes *et al.*, 2006 ; Johnson *et al.*, 2004 ; Jimenez, 1993).

D. Synthèse et problématique

Le MTP est un mélange aujourd'hui éprouvé pour la plantation d'arbres d'alignement en milieu urbain. Il est utilisé dans de nombreux aménagements et il en existe une grande diversité de modalités. En revanche, la raréfaction des matériaux utilisés et leur prix croissant, ainsi que l'impact environnemental du traitement et du transport de ces matériaux, amènent à envisager des solutions alternatives à la terre végétale et la pierre de carrière. La connaissance

des propriétés des technosols et des systèmes racinaires permet-elle d'envisager la construction de sols supports à la fois des fonctions de la voirie et de la croissance de l'arbre à partir de déchets et sous-produits urbains ?

La valorisation des déchets des villes permettrait d'économiser sur la fourniture et le transport des matériaux mais aussi sur le traitement des déchets, généralement réalisé via des voies plus coûteuses. Cette solution présente aussi un aspect écologique car elle permet de recycler une partie des volumes important de déchets générés par les villes à faible coût énergétique et de réduire la distance de transport des matériaux utilisés. Cette proposition présente donc un intérêt certain du point de vue d'un développement durable mais il reste à vérifier la faisabilité technique d'un tel procédé.

Cette étude vise à déterminer, par une approche expérimentale, si des technosols construits à partir de déchets et sous-produits urbains peuvent être supports de croissance pour des végétaux ligneux en milieu contraint.

Afin d'évaluer la capacité des mélanges mis au point au cours des tâches précédentes du projet SITERRE à assurer les fonctions de fertilité agronomique nécessaires au développement de végétaux ligneux, cette étude vise à évaluer la performance de croissance et de développement d'*Acer platanoides* à l'issue de la première année de plantation sur les mélanges étudiés. Pour ce faire, ont été étudiés le développement des parties aériennes des arbres ainsi que la colonisation du substrat par les racines. De plus, une étude menée en parallèle concernant l'évolution des sols étudiés après un an de plantation a permis de caractériser les propriétés physico-chimiques des sols, ce qui permettra d'affiner les conclusions de cette étude.

II/ MATERIEL ET METHODES

Afin de caractériser le développement des parties racinaires et aériennes d'arbres plantés dans des mélanges terre-pierre construits à partir de déchets, des *Acer platanoides* ont été installés dans des fosses de plantation à échelles réduites contenant, en guise de substrat, des MTP de différentes compositions. Les arbres sont âgés de deux ans au moment de l'installation.

A. Les formules de substrats utilisées

Les formules des deux mélanges que l'on compare au témoin au cours de cette étude ainsi que celle du matériau de croissance résultent d'une étude préalable du programme SITERRE (rapport intermédiaire du programme SITERRE, 2007). Ce choix s'est fondé sur deux approches successives :

- La hiérarchisation, en fonction des objectifs de propriétés mécaniques, physiques et biologiques à atteindre pour chaque horizon, d'un grand nombre de mélange (749) dont les propriétés ont été prédites ou mesurées.
- Un classement complémentaire des mélanges par les partenaires du programme SITERRE à titre d'experts.

1. *Matériau de croissance*

Le matériau de croissance (BR-CO) est utilisé dans le trou de plantation pour permettre la reprise de croissance des jeunes arbres. Il est constitué d'un mélange de briques issues de déchets provenant d'une usine de fabrication et de compost de boues de stations d'épuration et de déchets verts de villes en proportion en masse de 59-41%. La masse volumique apparente du mélange était de 0,49 t/m³ au moment de l'installation, ce qui est relativement faible comparé aux valeurs usuelles, plutôt situées aux alentours de 1 t/m³.

2. *Mélanges terre-pierre*

Les formules des mélanges testés et du mélange témoin sont les suivantes :

- Le mélange Témoin est celui utilisé actuellement et depuis plus de 20 ans par le service espaces verts de la ville d'Angers. Sa composition est la suivante :
 - 65% en volume de pierres anguleuses concassées de calibre 40/90 mm
 - 35% en volume de terre végétale
 - En guise d'amendements organiques : un terreau forestier grossier et un régénérateur microbien (fumier de bovin et déchets d'abattoirs).
 - Une fumure de Patentkali et superphosphate 46.

Sa masse volumique apparente à l'installation était de 1,71 t/m³.

- Le mélange noté TA-BA-BS est constitué de 20% en masse de terre acide (TA), 76% de ballast (BA) provenant de l'entretien des voies de chemin de fer et 4% de boues de stations d'épuration (BS). Sa masse volumique apparente à l'installation était de 1,68 t/m³.
- Le mélange noté TA-DB-DV est constitué de 22% en masse de terre acide, 73% de déchets de démolition du bâtiment (DB) et 3% de déchets verts (DV). Sa masse volumique apparente à l'installation était de 1,38 t/m³.

La nette différence de masse volumique apparente entre le matériau de croissance et les mélanges testés et la gamme de valeur trouvée en littérature (pour rappel, les masses volumiques apparentes des sols urbains rapportées par Jim (1998) vont de 1,15 à 2,63t/m³) s'explique par l'absence de compactage du mélange de croissance lors de l'installation, nécessaire à la croissance initiale des racines.

B. Le site expérimental

1. Installation

Installé en avril 2013 sur une plateforme d'Agrocampus-Ouest, centre d'Angers, le site expérimental consiste en 9 bacs en polyéthylène de haute densité (HD-PE) de 535 ℓ, chacun servant de fosse de plantation à un *Acer platanoides*. Ce volume correspond à 1/3 du volume rencontré habituellement. Le choix d'un matériau impénétrable pour représenter l'encaissant est relativement réaliste et va dans le sens de la plus grande contrainte rencontrée sur le terrain. En effet, bien que dans une installation réelle les racines puissent, dans une faible mesure, pénétrer l'encaissant, les contraintes y sont souvent trop fortes pour permettre un développement correct.

Les trois MTP comparés dans cette étude sont chacun installés dans trois bacs en guise de répétition. L'ordre de succession dans l'alignement est prévu pour faciliter le démontage. Les bacs n'étant pas enterrés, des bottes de pailles sont installées sur leurs flancs afin de limiter les fortes variations de température du sol. Les caractéristiques et la disposition des bacs sont présentés sur la Figure 3.

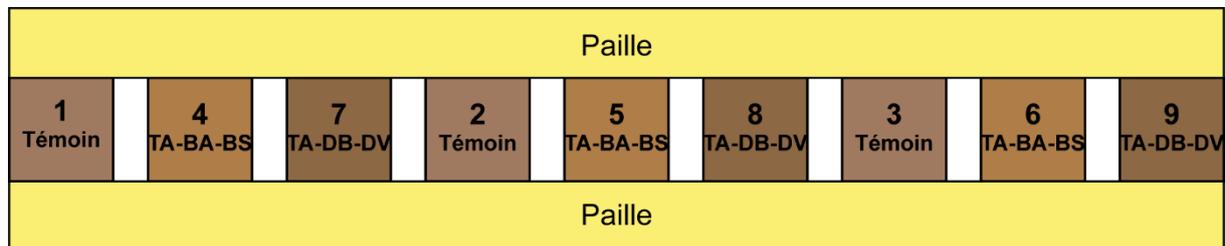


Figure 3 : Caractéristiques et disposition au sein du site expérimental des bacs de plantation

Au fond de chaque bac et sous une toile de géotextile est installée une couche drainante constituée de graviers de 4cm de diamètre permettant le drainage des eaux de percolation. Le mélange terre-pierre est ensuite installé sous forme de plusieurs couches successives, chacune damée manuellement avant l'installation de la suivante. Les spécimens d'érable étant livrés en petites mottes (~5 ℓ), un matériau de croissance vient compléter le trou de plantation. Celui-ci est aménagé au centre de la fosse sous la forme d'un cylindre de 25 cm de profondeur et d'environ 36 cm de diamètre. Pour permettre l'analyse spatiale du développement des racines, le volume de chaque bac est divisé virtuellement en 27 blocs répartis en 3 colonnes de 3 rangs. Une couche de 5 cm de pouzzolane vient recouvrir toute la surface du bac pour ralentir le développement d'adventices. La Figure 4 montre la structure intérieure de chaque bac. Des drains PVC sont raccordés à des orifices d'évacuation situés au niveau de la couche drainante et recueillent l'eau de percolation dans des bacs situés en bordure du site pour mesure bihebdomadaire du volume.

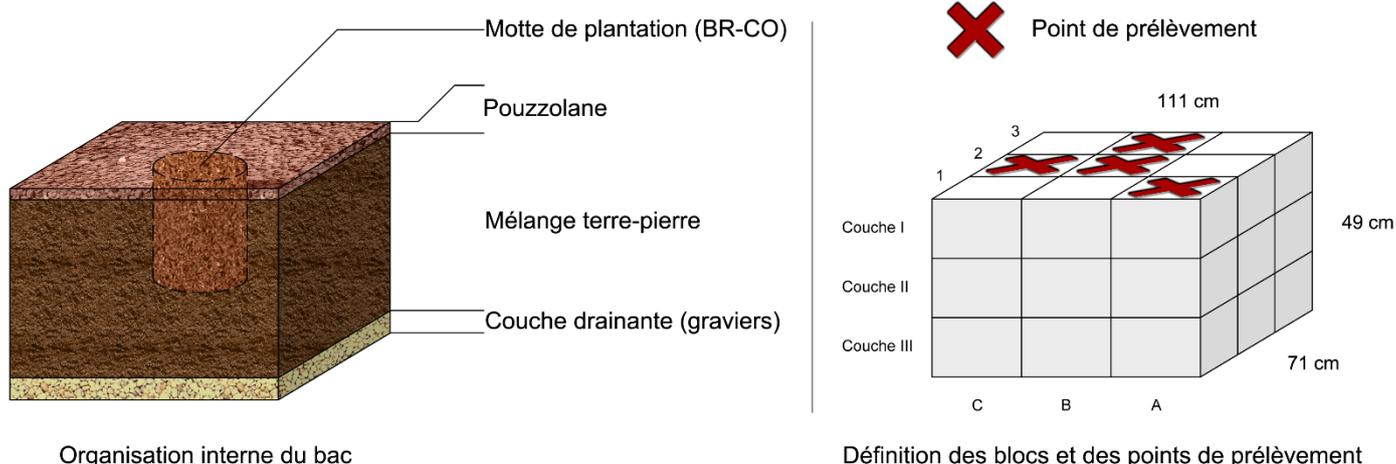


Figure 4 : Structure interne des bacs de plantation

2. Démontage partiel

Certaines mesures requises pour l'analyse de la croissance des végétaux sont destructives. Ainsi, à $t_1 = 12$ mois, $t_2 = 24$ mois et $t_3 = 36$ mois, une répétition de chaque mélange étudié doit être démontée afin de réaliser ces mesures. En avril 2014, les bacs 3, 6 et 9 ont été démontés. Le démontage des trois bacs suit un protocole précis.

- Abattage de l'arbre
- Mesures préliminaires : la couche de pouzzolane est déblayée pour permettre de mesurer la masse volumique apparente et le tassement du substrat. Ces variables nous donnent des indications sur la stabilité structurale des différents MTP après 12 mois d'utilisation. La masse volumique apparente est mesurée en surface grâce à la méthode du cylindre (pesée après séchage d'un échantillon de sol prélevé à l'aide d'un cylindre de volume connu). Le tassement moyen est déterminé en mesurant la différence de hauteur du mélange entre t_0 et t_1 .
- Découpage du bac : les bottes de paille bordant les bacs à démonter sont retirées pour permettre l'accès par le côté (face nord). Une face du bac est découpée de façon à pouvoir aisément extraire un par un les blocs définis sur la Figure 4.
- Extraction des blocs : des cordons sont utilisés pour délimiter les blocs entre eux avant de les extraire à l'aide d'un transplantoir et d'un seau. Des échantillons de MTP sont prélevés dans 3 blocs par couche et un échantillon de matériau de croissance est prélevé pour chacune des 2 premières couches (cf. Figure 4). Les racines de tous les blocs sont collectées pour être analysées.

C. Relevés de l'architecture des arbres.

Il s'agit de la seule mesure non-destructive réalisée permettant de caractériser la croissance des parties aériennes. Cette mesure est donc importante car elle nous permettra de prendre en compte les trois répétitions effectuées pour chaque mélange.

Le logiciel PiafDigit permet de renseigner la structure d'un arbre de manière extrêmement précise. Pour chaque métamère à partir de la cicatrice de greffe, sa longueur et le diamètre du nœud supérieur sont mesurés, tout en indiquant l'ordre de ramification (cf. Figure 5). La longueur des métamères mesurant moins d'1 mm de long est arrondie à 1 mm. Une analyse logicielle des données réunies dans le tableur permet de quantifier la croissance de l'arbre selon les trois critères d'élongation, d'organogénèse et de ramification à travers les grandeurs décrites par le Tableau 1 : liste des grandeurs issues de l'analyse des relevés d'architecture des arbres. De plus, le calcul du volume indicatif de matière fraîche permet, en corrélation avec la biomasse de bois mesurée sur trois arbres, d'évaluer la biomasse des arbres toujours sur pied par extrapolation.

Tableau 1 : liste des grandeurs issues de l'analyse des relevés d'architecture des arbres

Grandeur	Critère de croissance évalué		
	élongation	organogénèse	ramification
nombre d'ordres			Oui
nombre d'axe par ordre			Oui
longueur moyenne des axes	Oui		
longueur moyenne des axes par ordre	Oui		Oui
nombre total de métamère		Oui	
nombre de métamère par ordre		Oui	Oui

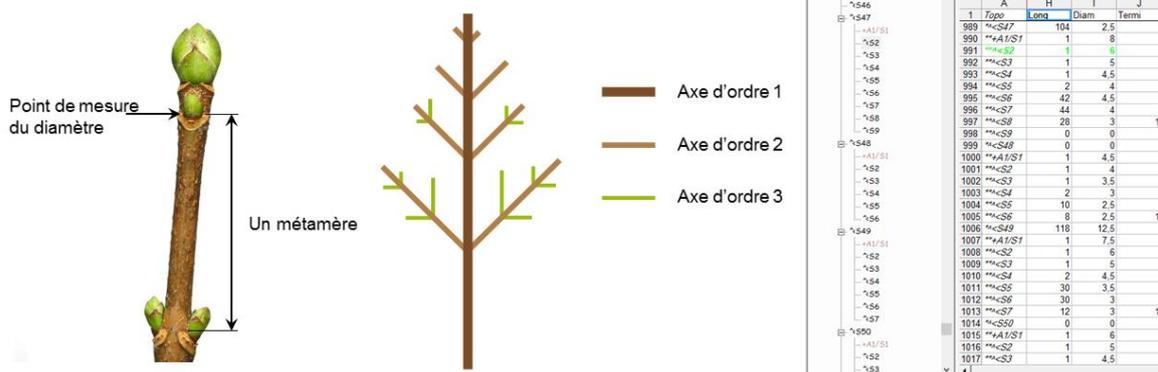


Figure 5: Principe de saisie des relevés d'architecture et extrait d'un fichier de relevés (photo par Ben Legler)

D. Mesure de la biomasse des arbres

La biomasse des parties aériennes et racinaires des arbres nous donnent une indication sur la croissance à travers la masse de tissu produit par l'arbre au cours de sa croissance.

1. Parties aériennes

Avant le démontage d'un bac, l'arbre est abattu pour en mesurer la biomasse. Chacun est débité par ordre de croissance à l'aide d'un sécateur. Une coupe a été réalisée à chaque ramification en essayant de couper au plus près de l'axe porteur. La matière fraîche, triée par ordre est pesée avant et après séchage de 120 h minimum à 65°C afin d'obtenir la masse fraîche, la masse sèche et la teneur en eau des tiges par ordre. De même, les feuilles sont pesées dès qu'elles sont détachées des tiges et après séchage pendant 48 h à 65°C.

Afin d'estimer la biomasse par ordre des tiges des arbres restés sur le site expérimental, une relation entre celle-ci et le volume des tiges, calculé grâce aux relevés sur l'architecture, a été

déterminée. Le couple masse-volume des tiges d'ordre II de l'arbre du bac 3 a été écarté car considéré comme aberrant en raison de son trop grand écart avec les autres paires de valeurs. Un modèle linéaire donne, pour la masse fraîche et la masse sèche, un R^2 respectivement de 0,9968 et 0,9957. Un modèle polynomial du second degré donne des R^2 de 0,9969 et 0,9986.

Le second modèle est donc très légèrement meilleur au prix d'une augmentation de la complexité. De plus, le terme en x^2 est négligeable pour la gamme de masse et volume décrite par le modèle. C'est pourquoi le modèle linéaire est utilisé.

Les relations liant la biomasse au volume de tige sont les suivantes :

$$M_F = 1010 V ; R^2 = 0,9968$$

$$M_S = 571,56 V ; R^2 = 0,9957$$

$M_F = \text{masse fraîche (g)} ; M_S = \text{masse sèche (g)} ;$ $V = \text{volume (l)}$
--

2. Racines

Les racines, récupérées au moment du démontage des bacs, sont triées par bac et bloc d'origine puis nettoyées consciencieusement à l'eau courante au-dessus d'un tamis afin d'éviter les pertes. Les racines sont ensuite essorées à l'aide de papier absorbant afin de retirer l'excès d'eau puis pesées avant d'être séchées pendant 48 h à 65°C et pesées à nouveau. Les masses obtenues concernent la totalité des racines présentes dans chaque bloc de sol.

Pour chaque bac, la densité des racines pour deux échantillons par couche de sol est mesurée avant séchage en utilisant le principe de la poussée d'Archimède pour déterminer leur volume.

E. Étude des racines par analyse d'image

L'objectif est ici d'établir un protocole expérimental permettant de caractériser et comparer la croissance des racines. Pour pouvoir comparer l'expansion des racines dans le volume disponible, le protocole devra être reproduit pour les blocs A.1, B.3 et C.2 de chacune des trois couches de sol ainsi que pour les deux blocs de motte (bloc B.2). Des échantillons supplémentaires pourront éventuellement être traités en guise de répétition. Pour chaque bloc, un échantillon de petites racines, un échantillon de racines larges et un échantillon mixte sera analysé. L'échantillon mixte doit être représentatif de la proportion de racines larges et fines dans le bloc.

La première étape consiste en l'acquisition des images de racines adaptées au traitement par le logiciel. Pour cela, les images obtenues doivent être nettes, sans ombres ni parasites et présentant le moins possible de chevauchement. Les racines sont disposées entre une feuille de papier blanc et un film transparent (type transparent pour rétroprojecteur) et numérisées grâce à un scanner EPSON Perfection V750 Pro avec les réglages suivants :

- Cache opaque
- Type d'image : 48-bits Couleur
- Qualité
- Résolution : 600 dpi
- Taille : défaut
- Format cible : original
- Echelle : 100%
- Format : JPEG sans compression

Les planches sont ensuite découpées grâce à photoshop afin de séparer chaque racine sur une image distincte.

Les images obtenues sont ensuite traitées grâce au logiciel Visilog afin d'en tirer les diamètres et longueurs moyennes des racines de l'échantillon scanné. À cette fin, une macro-instruction est implémentée dans le logiciel afin d'automatiser toutes les manipulations de l'image nécessaires à l'obtention des données recherchées. Pour calibrer la manipulation de l'image et vérifier la précision des valeurs trouvées, la macro-instruction sera testée sur des capillaires et des tiges métalliques de longueur et diamètre connus et cohérent avec la plage de valeur attendue pour les racines. L'écart entre les valeurs théoriques et mesurées donnera la fiabilité de l'outil.

F. Mesure de la fertilité physico-chimique des mélanges

L'analyse des propriétés physico-chimiques des sols étudiés permet d'identifier les mécanismes à l'origine des différences de croissance observées chez les arbres plantés sur ces sols.

1. *Granulométrie*

Pour comparer la granulométrie des différents mélanges de matériaux, une analyse granulométrique par tamisage sous eau a été effectuée sur 6 échantillons frais de 1000 g de chaque mélange de matériaux (2 par couche excepté le BR-CO). Une analyse granulométrique est réalisée sur le reste des 3 mélanges non utilisés lors de la mise en place des bacs à t_0 . Cela permet de comparer la courbe granulométrique des différents mélanges et de voir l'évolution des massifs terreux de chaque mélange après un an de plantation. Pour réaliser l'analyse granulométrique une colonne de 12 tamis a été utilisée (0,05 ; 0,1 ; 0,2 ; 0,5 ; 1 ; 2 ; 3,15 ; 5 ; 10 ; 20 ; 40 et 80 mm). Cette méthode permet de séparer les parties très fines des grains plus grossiers. La fraction contenant les limons et les argiles (<0,05 mm) est perdue avec l'eau. Connaissant l'humidité des échantillons utilisés, la masse des grains fins perdus dans l'eau est déduite par différence entre la masse sèche totale estimée de l'échantillon et la masse sèche des différents refus et tamis.

2. *Propriétés hydrodynamiques*

a) **Teneur en eau volumique**

La teneur en eau volumique du sol a été mesurée grâce à des sondes TDR (Time Domain Reflectometry). Le principe est de mesurer le temps de propagation dans le sol d'une onde électromagnétique à haute fréquence. Le temps de propagation dépend étroitement de l'humidité du sol.

Huit sondes TDR ont été installées par bac dont deux dans le matériau de croissance à 10 et 20 cm de profondeur et 6 autres installées dans le MTP à 15, 30 et 45 cm de profondeur.

Ces sondes ont été étalonnées grâce au prélèvement d'échantillons de sol à la tarière dans chaque mélange de matériaux et à différentes périodes de l'année. Quatre dates de prélèvements de sol ont été programmées pour l'étalonnage de chaque sonde, ce qui correspond à un compromis visant à couvrir la gamme de variation d'humidité la plus large

possible en limitant la perturbation du sol. L'humidité volumique des échantillons a été obtenue après séchage à 105 °C pendant 48 heures.

b) Potentiel matriciel

Le potentiel matriciel du sol est défini comme l'énergie résultant de la pression de l'eau due aux effets de liaison autour de particules solides et aux effets de capillarité dans les pores. À partir de ce potentiel, la courbe de rétention en eau du sol, qui exprime la teneur en eau volumique du sol en fonction du potentiel matriciel, est établie. Les sondes utilisées sont des sondes Watermark®. Chaque bac dispose de 4 sondes situées à différentes profondeurs (motte, 15, 30 et 45cm) donnant une lecture de tension allant de 0 à 200 centibars. Lorsque l'eau est disponible dans le sol, la tension est faible. Lorsque le sol sèche et l'eau est moins disponible, la tension augmente.

c) Infiltrométrie

Du fait de la présence importante d'éléments grossiers dans les MTP, il était impossible techniquement d'extraire des volumes de sol non remaniés sans les perturber pour les analyser en laboratoire. La courbe de rétention en eau et de conductivité hydraulique du sol ont donc été estimées par des mesures d'infiltration.

Pour cela un infiltromètre à minidisque de 8 cm de diamètre a été utilisé. Des essais ont été effectués en surface et à 35 cm de profondeur pour chaque matériau étudié. Des dépressions successives de -50, -30, -10 et 0 mm ont été appliquées. En raison de l'irrégularité de la surface du sol, une fine couche de sable est préalablement déposée sur la surface à infiltrer afin de maintenir un contact continu entre le disque poreux de l'infiltromètre et le sol. Une fois que la pression capillaire est réglée à -50 mm, le disque poreux est déposé sur la surface du sol et l'amorçage est ensuite effectué par l'apport de bulles d'air du réservoir de Mariotte. Pour chaque volume d'eau correspondant à une hauteur de 10 mm, le temps d'infiltration est noté. La pression capillaire est appliquée successivement par pression croissante et l'essai est arrêté une fois qu'une quantité d'eau suffisante est infiltrée.

La courbe de rétention en eau $h(\theta)$ et la courbe de conductivité hydraulique $K(\theta)$ des matériaux étudiés ont été obtenues par résolution inverse des données d'infiltrométrie à l'aide du logiciel Hydrus (Šimůnek et al., 2008). La caractérisation a été faite à partir des fonctions hydrodynamiques de Van Genuchten-Mualem (Mualem, 1976 ; Van Genuchten, 1980) par une équipe d'ingénieurs de recherche au laboratoire eau et environnement de l'IFSTTAR de Nantes.

3. Analyse chimique

Des mesures de pH et de conductivité électrique ont été réalisées en laboratoire. Les mesures ont été effectuées sur la terre fine (< 2 mm) de chaque échantillon prélevé à t_1 (33 échantillons), ainsi que le reste des mélanges non utilisés lors de la mise en place des bacs à t_0 (1 mesure pour chaque mélange et 1 pour le BR-CO). Pour chaque échantillon, un tamisage à sec à 2 mm est effectué afin d'obtenir la terre fine. Le pH et la conductivité électrique ont été déterminés respectivement selon la norme ISO 10390 (2005) et la norme ISO 11265 (1994). Un volume de sol a été préparé dans cinq fois son volume d'eau puis agité avec un agitateur

mécanique pendant une heure. Les mesures ont été réalisées avec un pH-mètre et un conductimètre après filtration.

Quatre échantillons de terre fine par bac démonté à t_1 (1 échantillon par couche et 1 pour le BR-CO) et 4 échantillons du reste des mélanges à t_0 (1 échantillon pour chaque mélange et 1 échantillon pour le BR-CO) ont été envoyés à un laboratoire d'analyse des sols (LCA, Laboratoire Centre Atlantique de la Rochelle¹). L'objectif est de déterminer quelques paramètres chimiques tels que la teneur en matière organique, le rapport C/N, la teneur en oligo-éléments et la capacité d'échange cationique (CEC). Ces paramètres permettent de comparer la fertilité des différents mélanges après un an de plantation, ainsi que leur évolution.

¹ LCA Laboratoire Centre Atlantique <http://www.laboratoirelca.com/>

III/ RESULTATS

Cette partie expose les résultats les plus pertinents permettant de comparer les traitements (pour rappel : terre acide + ballast + boue de station d'épuration (TA-BA-BS), terre acide + déchets du bâtiment + déchets verts, mélange du service espaces verts de la ville d'Angers (témoin)) à travers :

- La caractérisation du développement des parties aériennes et racinaires des arbres
- Certaines propriétés physico-chimiques des mélanges à t_0 et t_1

A. Développement des parties aériennes

1. Biomasse des feuilles et tiges

Le premier élément permettant de caractériser globalement la performance des arbres est la biomasse que ceux-ci ont générée lors de leur croissance.

a) Biomasse foliaire

Les données sur la biomasse des feuilles sont présentées par la Figure 6. La masse sèche de feuilles est nettement inférieure pour le mélange TA-BA-BS que pour le second mélange et le témoin, qui présentent des valeurs de masse similaires.

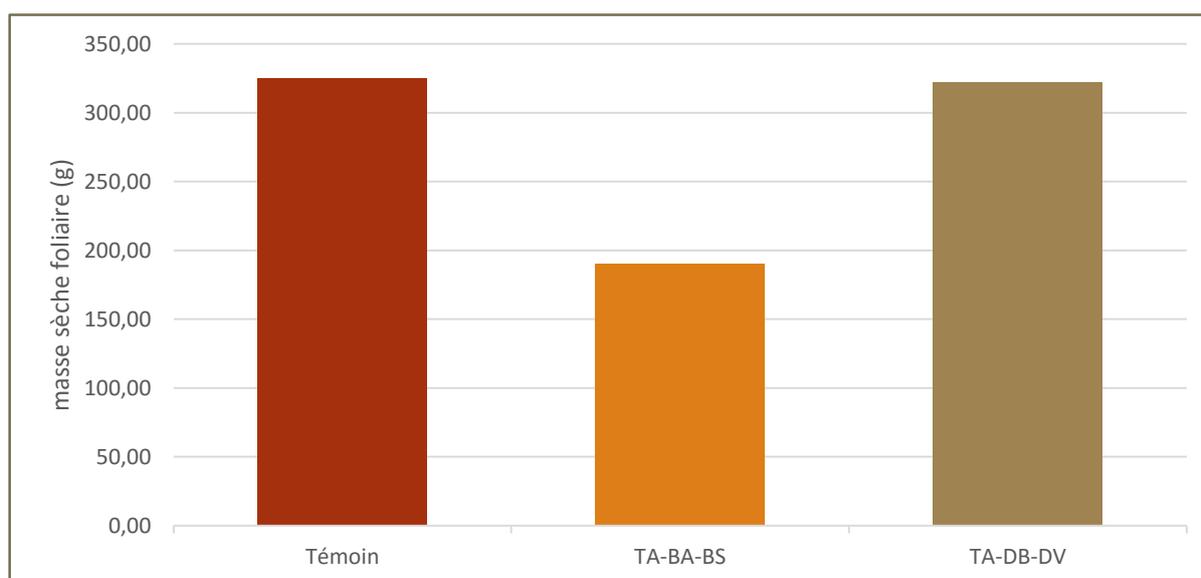


Figure 6 : Biomasse foliaire (g). La masse sèche est relevée sur un seul individu par modalité.

b) Biomasse des tiges

La Figure 7 présente les moyennes des masses sèches estimées par ordre pour chaque traitement. La série TA-BA-BS est la seule à présenter des tiges d'ordre IV. Ceci est dû à une rupture de l'axe d'ordre I d'un des spécimens lors de la première année de croissance qui a forcé un axe d'ordre 2 à prendre le rôle de flèche et à se ramifier de manière précoce. La biomasse produite par les arbres de la série TA-DB-DV est supérieure à celle produite par ceux de la série témoin. En revanche, la série TA-BA-BS ne présente pas de différence par rapport aux deux autres.

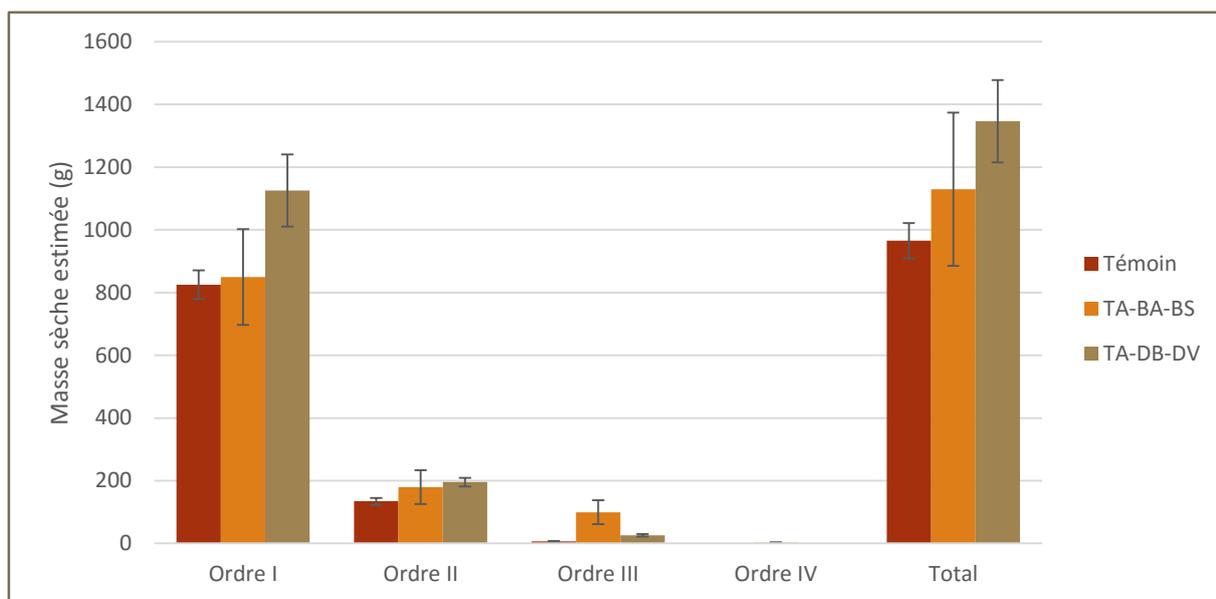


Figure 7 : Masse sèche moyenne estimée des tiges (g) par ordre. Les barres d'erreurs représentent les erreurs standards.

2. Architecture des arbres

Les données extraites des relevés d'architecture des arbres peuvent être utilisées pour caractériser la croissance des parties aériennes selon trois critères, qui relèvent tous de la performance de ceux-ci : l'élongation, l'organogénèse et la ramification.

a) Élongation

La grandeur permettant de quantifier l'élongation des arbres est la longueur moyenne des axes. La Figure 8 présente la longueur moyenne des axes par ordre et par traitement. Les longueurs moyennes totales sont comparables pour les trois traitements. Les arbres plantés dans le mélange TA-DB-DV présentent un profil semblable à ceux plantés dans le mélange témoin en regard de la longueur moyenne des axes par ordre. Les arbres plantés dans le mélange TA-BA-BS présentent des axes en moyenne plus courts pour les ordres I et II mais plus longs pour l'ordre III. Ceci pourrait être dû au fait que l'arbre n°6 présente un ordre

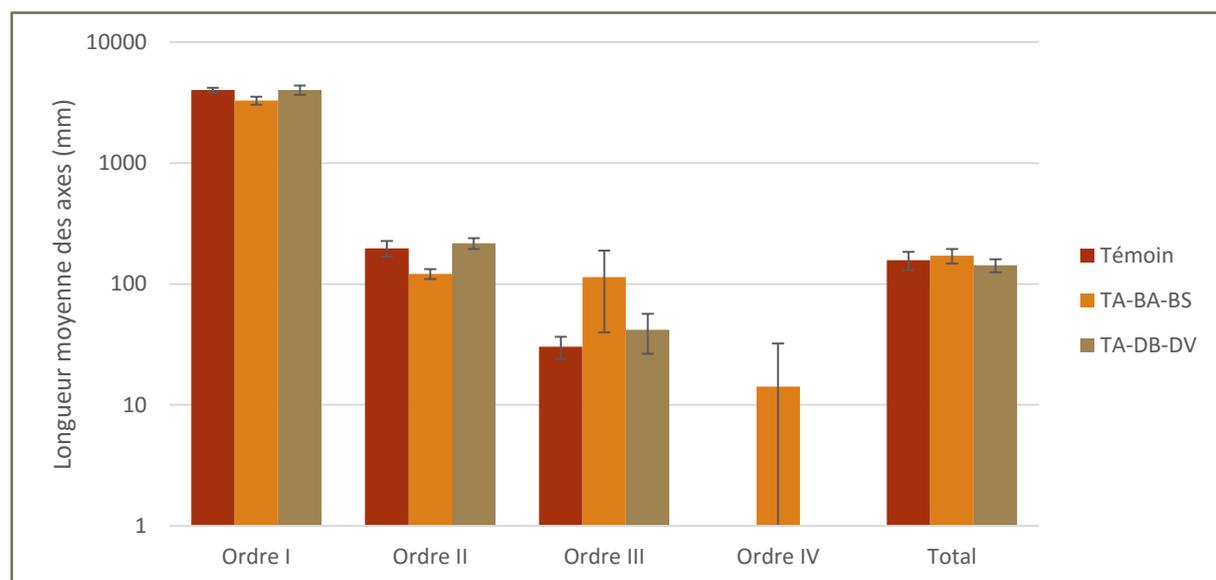


Figure 8 : Longueur moyenne des axes (mm) par ordre ; échelle logarithmique de base 10. Les barres d'erreurs représentent les erreurs standards.

supplémentaire en raison d'une rupture précoce de l'axe d'ordre I, ce qui a conduit un axe d'ordre II à prendre le relai de l'axe principal et à la présence d'un ordre IV, présent uniquement sur cet arbre. Une partie des axes d'ordre III de cet arbre sont donc en pratique équivalents à des axes d'ordre II et les axes d'ordre IV à des axes d'ordre III. Cette anomalie rend les résultats pour cette série peu conclusifs.

b) Organogénèse

L'organogénèse est quantifiée par le nombre de métamères. La Figure 9 présente les nombres moyens de métamères par ordre pour les trois traitements. Le nombre de métamères est comparable pour le témoin et le mélange TA-DB-DV et est globalement plus faible pour le TA-BA-BS.

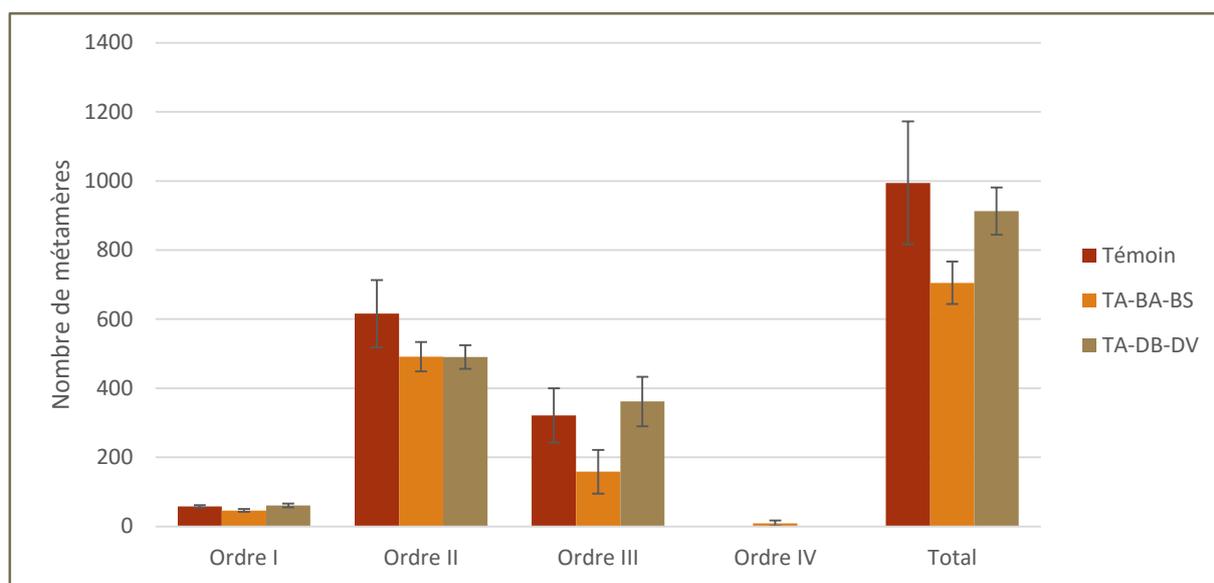


Figure 9 : Nombre moyen de métamères par ordre. Les barres d'erreurs représentent les erreurs standards.

c) Ramification

Les grandeurs permettant de quantifier la ramification sont le nombre d'ordres, le nombre d'axes, et la longueur des axes et le nombre de métamères par ordre.

À une exception près, l'arbre n°6 dont le cas est expliqué plus haut, tous les arbres ont 3 ordres de ramification. Ceci s'explique par l'âge des arbres. En effet, la première année, pendant la période de croissance, l'arbre croît sur son premier axe (d'ordre I) et met en place des bourgeons végétatifs le long de celui-ci. Au printemps suivant, ces bourgeons débourrent et donnent naissance à de nouveaux axes, d'ordre II, sur lesquels de nouveaux bourgeons apparaîtront qui donneront naissance à leur tour à de nouveaux axes (d'ordre III) au cours du printemps suivant et ainsi de suite. En absence de phénomène perturbateur exceptionnel, un et un seul nouvel ordre apparaît chaque année, ce qui explique l'homogénéité presque parfaite de cette grandeur sur la population étudiée.

Le nombre d'axe, présenté sur la Figure 10, donne une idée plus quantitative de la ramification des arbres. En effet, en plus d'indiquer si l'arbre s'est ramifié tous les ans ou non, il indique combien de nouvelles ramifications sont créées. Il n'existe pas de lien direct entre le nombre d'axes d'un ordre et la performance au cours de l'année pendant laquelle l'ordre est apparu car tous les axes se ramifient chaque année, pas uniquement ceux de l'ordre le plus

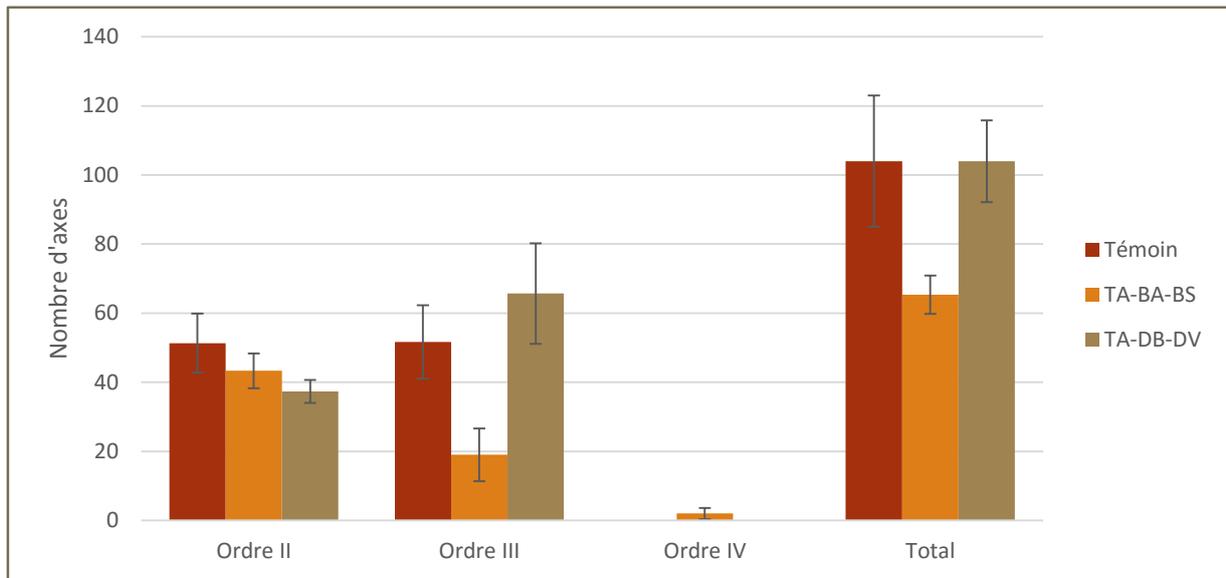


Figure 10 : Nombre moyen d'axes par ordre. Les barres d'erreurs représentent les erreurs standards.

grand. Les données pour l'ordre I ne sont pas présentées car, par définition, il ne peut y avoir qu'un seul axe d'ordre I. Les arbres du témoin et du mélange TA-DB-DV ont un comportement similaire, excepté pour l'ordre II, pour lequel le nombre d'axes est plus important chez le témoin. Les arbres du mélange TA-BA-BS présentent un nombre d'axes d'ordre II comparables aux autres modalités mais leur nombre d'axes d'ordre III et total sont nettement inférieurs aux autres.

Les Figure 8Figure 9 montrent que la répartition des longueurs moyennes et des nombres de métamères selon les ordres est assez homogène selon les traitements.

B. Développement racinaire : colonisation du substrat

1. Biomasse racinaire

Les données obtenues sur les biomasses racinaires dans les divers blocs délimités lors de l'extraction permettent de comparer la colonisation du substrat par les racines selon les mélanges utilisés. Pour cela, seront tout d'abord comparées les données brutes, puis la sortie de motte grâce aux proportions de racines dans le matériau de croissance et le MTP et enfin la colonisation en profondeur.

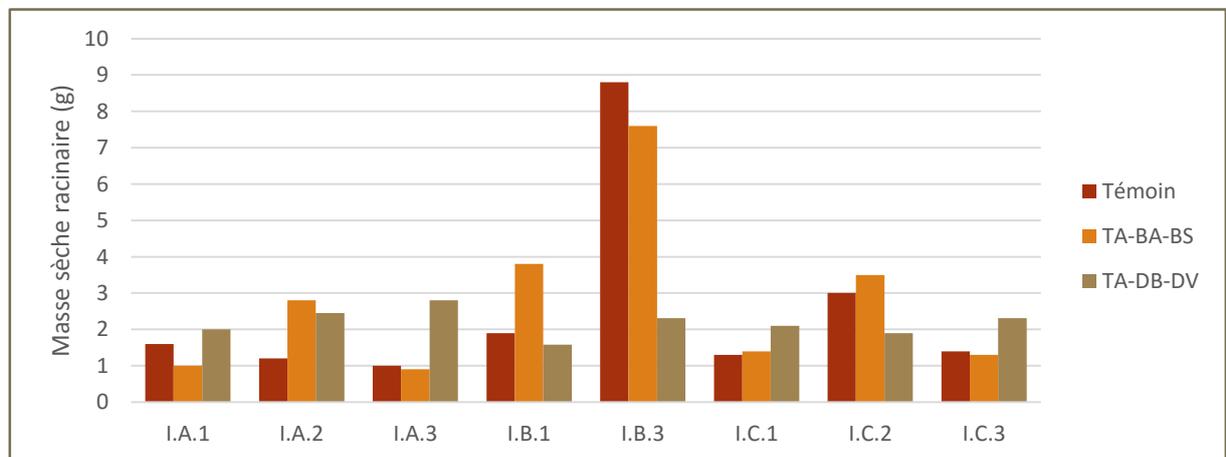


Figure 11 : Biomasses racinaires (g) par bloc de la couche superficielle (couche I) des bacs.

La Figure 11 montre les biomasses racinaires obtenues pour les différentes modalités par bloc de la couche superficielle du bac, pour les blocs de MTP. L'absence de répétitions ne permet pas de déterminer si les différences observées sont ou non significatives. Néanmoins, la biomasse racinaire de l'arbre ayant poussé sur le mélange TA-DB-DV présente une variabilité moindre que dans les deux autres cas, ce qui indique une répartition plus homogène des racines dans le milieu. Outre cette remarque, il apparaît que les blocs de coin (A.1, A.3, C.1, C.3) présentent globalement une biomasse inférieure à celle trouvée dans les blocs jouxtant le milieu de croissance (A.2, B.1, B.3, C.2). Ceci est attendu puisque les racines émergent toutes du bloc central, où se trouve le milieu de croissance.

La Figure 12 montre les biomasses racinaires obtenues pour les différentes modalités par bloc de la couche médiane du bac, pour les blocs de MTP. De la même manière que pour la couche superficielle, il n'est pas possible de déterminer si les différences observées sont significatives. De plus, l'homogénéité supérieure de la répartition des racines dans le mélange TA-DB-DV n'apparaît pas dans la couche intermédiaire. En revanche, il y a globalement la même répartition de la biomasse dans la couche que précédemment.

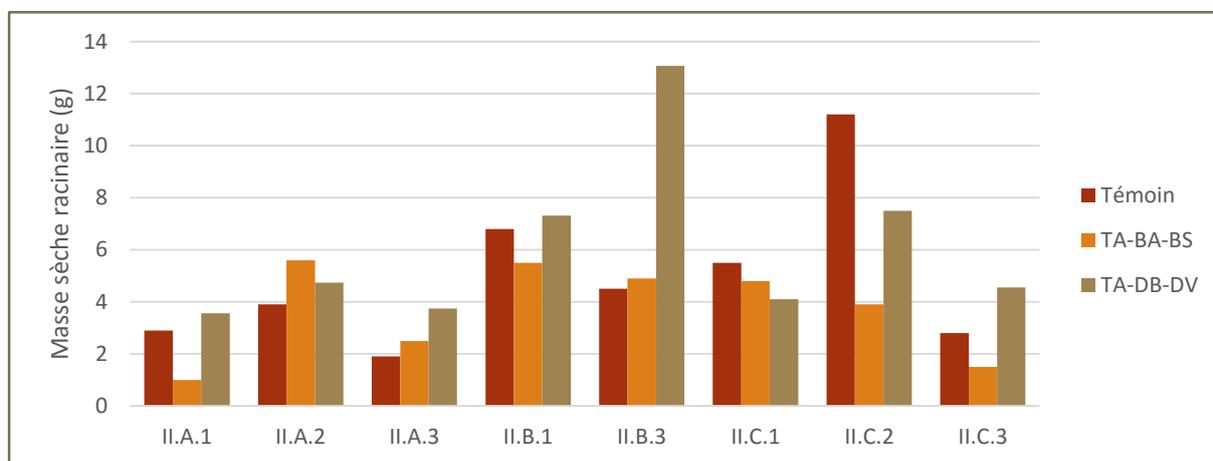


Figure 12 : Biomasses racinaires (g) par bloc de MTP de la couche intermédiaire (couche II) des bacs.

La Figure 13 montre les biomasses racinaires obtenues pour les différentes modalités par bloc de la couche profonde du bac, pour les blocs de MTP. Il existe une nette différence entre le témoin et le mélange TA-DB-DV d'une part et le mélange TA-BA-BS d'autre part, ce dernier présentant des biomasses racinaires environ dix fois inférieures pour tous les blocs de la couche profonde. La différence observée en surface entre les blocs de coin et les autres pour la couche superficielle n'est pas notable dans cette couche.

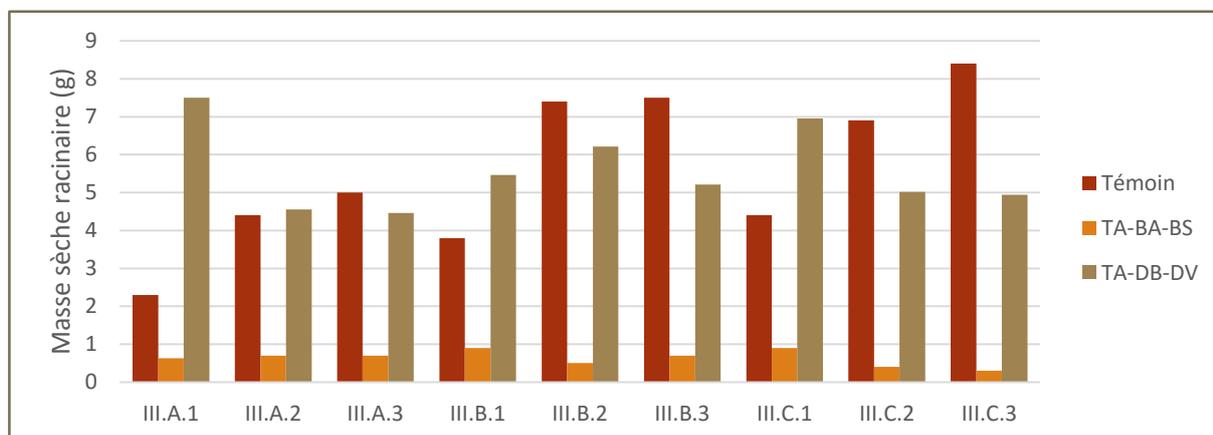


Figure 13 : Biomasses racinaires (g) par bloc de la couche profonde (couche III) des bacs.

La Figure 15 permet de comparer les biomasses racinaires présentes dans les mélanges utilisés et dans le matériau de croissance. Cela permet d'évaluer la colonisation du substrat par les racines. Le témoin présente la biomasse totale la plus importante, égale au double de celle présente dans le TA-BA-BS. Le TA-DB-DV présente une biomasse racinaire intermédiaire. Pour le témoin et le mélange TA-BA-BS, environ 1/5^{ème} de la biomasse racinaire se trouve dans le MTP, contre plus d'un quart pour le TA-DB-DV. Le témoin permettrait donc la meilleure performance globale, mais c'est le TA-DB-DV qui autorise le mieux l'exploration du volume par les racines. En outre, ce mélange présente la répartition la plus homogène des racines (soit la plus faible variation relative moyenne).

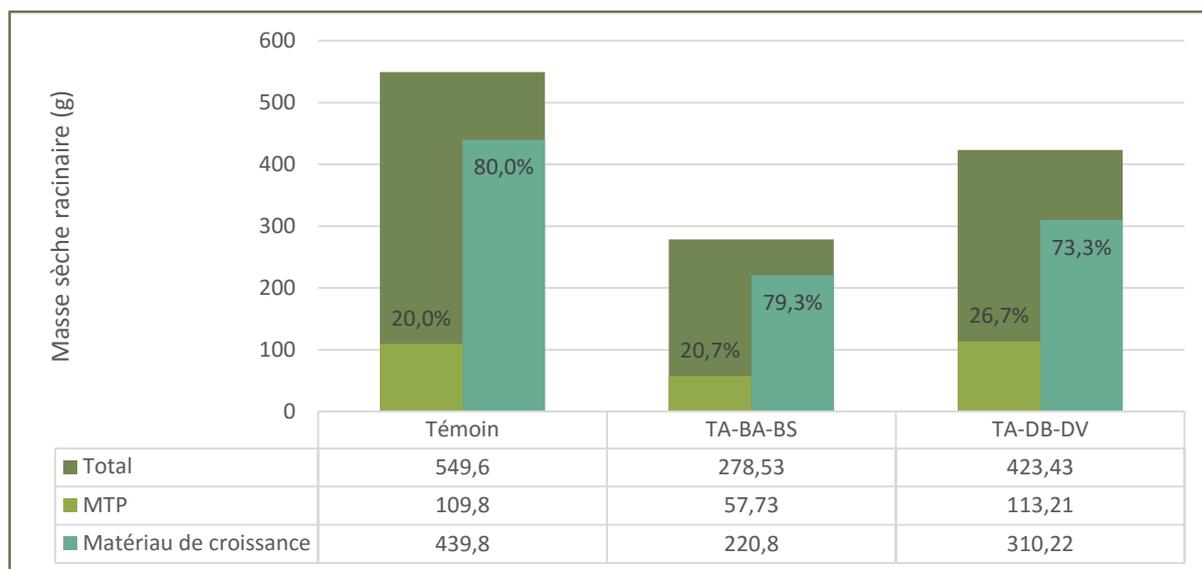


Figure 15 : Biomasse racinaire totale (g) et proportions de racines dans le MTP et le matériau de croissance.

La Figure 14 montre les biomasses racinaires moyennes par bloc de MTP en fonction de la profondeur. Il n'y a pas de différence significative de la biomasse racinaire en surface. Dans la couche intermédiaire, les mélanges sont tous deux comparables au témoin mais le TA-DB-DV montre une biomasse plus importante que le TA-BA-BS. Dans la couche profonde, le TA-BA-BS présente une biomasse racinaire dix fois inférieure aux deux autres modalités, comparables entre elles.

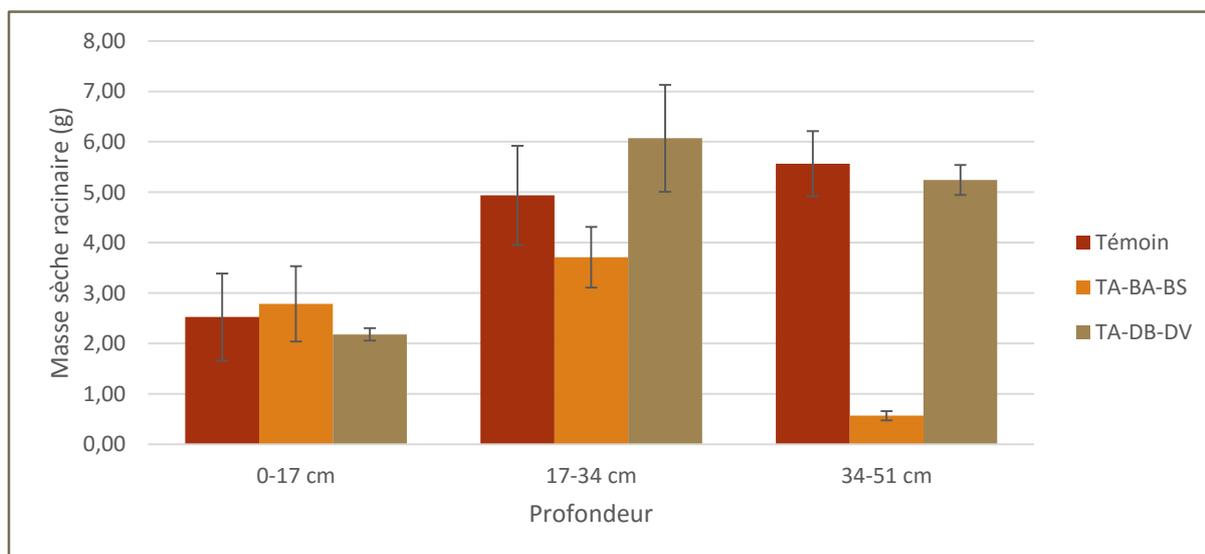


Figure 14 : Biomasse racinaire moyenne (g) des blocs de MTP par profondeur. Les barres d'erreurs représentent les erreurs standards.

2. Mise en place du protocole d'analyse d'images

Cette sous-partie décrit le traitement utilisé pour analyser les images sous Visilog et les valeurs de diamètre et de longueur obtenues pour les étalons utilisés comparées aux valeurs attendues.

Afin d'isoler la forme de l'échantillon et pour permettre au logiciel de l'analyser, il faut en premier lieu binariser l'image, c'est-à-dire attribuer une valeur de 0 ou 1 à chaque pixel. Pour cela un simple seuil de luminosité est utilisé. Il attribue une valeur de 1 à tous les pixels de luminosité $\leq 50\%$ et 0 pour les autres.

Un filtre est ensuite appliqué à l'image pour éliminer les petites surfaces éventuellement présentes en arrière-plan. Le filtre cible toutes les zones d'aire inférieure à 50 pixels² et les supprime (en leur attribuant la valeur de 0).

Afin de lisser l'image, elle est dilatée de 5 pixels, puis contractée de 5 pixels. La manipulation est neutre en matière de périmètre et d'aire de la forme, mais elle permet de se débarrasser des irrégularités de contour et des zones noires de petite taille.

Le prétraitement de l'image effectué, celle-ci est analysée par le logiciel pour déterminer le diamètre et la longueur des racines. Visilog est capable de mesurer l'aire et le périmètre des zones, mais pas la longueur ou la largeur. La formule suivante permet de déterminer les grandeurs recherchées en fonction de celles données par le logiciel :

$$L = \frac{P + \sqrt{P^2 - 16A}}{4} ; \varnothing = \frac{P - \sqrt{P^2 - 16A}}{4}$$

Le Tableau 2 présente les diamètres et longueurs réels et estimés par le logiciel. On observe des différences relatives moyennes pour le diamètre et la longueur respectivement de 16% et 36%. L'erreur sur la longueur n'est pas acceptable pour la mesure des racines, c'est pourquoi ces valeurs ont été corrigées via une régression polynomiale d'ordre 2 sur les valeurs réelles et estimées. Le coefficient R² est de 0,9549. On obtient après correction une erreur relative moyenne de 3%. La correction des valeurs de diamètre a été abandonnée car elle n'améliorait pas significativement la fiabilité des résultats.

Tableau 2 : Comparaison des diamètres et longueurs réels et estimés par Visilog pour étalonner le protocole d'analyse d'images

	diamètre réel (mm)	longueur réelle (cm)	diamètre estimé (mm)	longueur estimée (cm)	erreur diamètre (%)	erreur longueur	longueur corrigée (cm)	erreur longueur corrigée
Tige 1	1,12	9	0,94	12,6	16%	41%	8,5	5%
Tige 2	1,55	6,6	1,84	8,0	18%	22%	6,4	3%
Tube 1	0,3	4,9	0,31	6,2	2%	26%	4,9	1%
Tube 2	0,3	7	0,39	9,5	30%	36%	7,3	4%
Tube 3	0,3	8,3	0,25	13,1	15%	58%	8,7	4%

C. Fertilité physico-chimique des sols

1. Masse volumique apparente

Le Tableau 3 présente les valeurs de masses volumiques apparentes mesurées en surface lors de la mise en place du dispositif expérimental et après 1 an de plantation ainsi que le tassement observé dans les bacs. Après 1 an, un tassement de 5 cm en moyenne est observé, soit environ 10% de la hauteur totale. Il en résulte une augmentation de la valeur de masse volumique apparente pour tous les bacs, notamment concernant le mélange TA-BA-BS.

Tableau 3 : Masses volumiques apparentes superficielles des mélanges et tassement après un an de plantation.

	Masse volumique apparente (t/m^3)			tassement (cm)
	t_0	t_1	$\Delta\rho_{t_0-t_1}$	$\Delta h_{t_0-t_1}$
BR-CO	0,49	0,53	0,04	4,78
Témoïn	1,71	1,83	0,12	3,83
TA-BA-BS	1,68	1,89	0,21	6,29
TA-DB-DV	1,38	1,49	0,11	4,21

2. Granulométrie

Les courbes granulométriques moyennes par mélange à T12 sont illustrées dans la Figure 16. Les courbes granulométriques des différentes couches de chaque mélange de matériaux sont présentées en Annexe A.

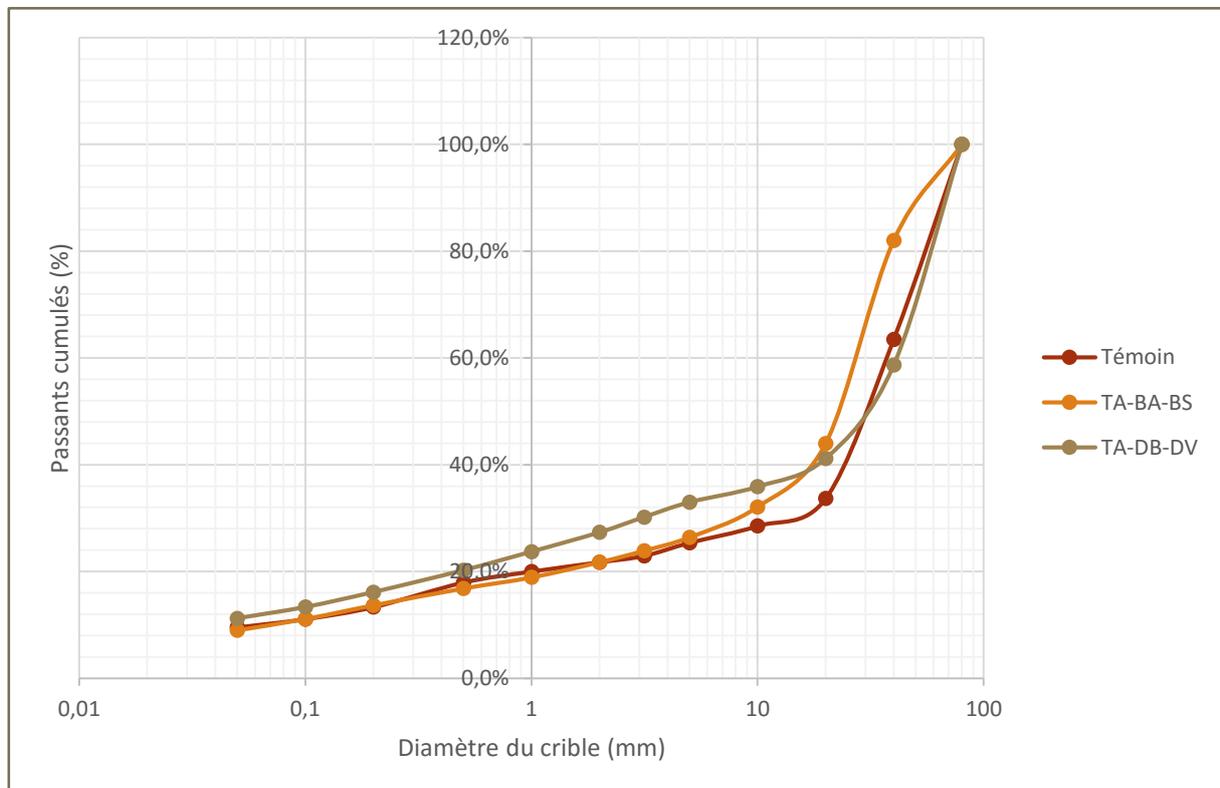


Figure 16 : Courbes granulométriques moyennes des différents MTP.

On observe, pour toutes les modalités, un alignement de points en croissance régulière entre les particules très fines ($\varnothing = 0.05$ mm) et les grossières ($\varnothing = 10$ mm).

Le mélange TA-DB-DV présente la proportion de terre fine ($\varnothing < 2$ mm) la plus importante avec 27,3% en masse. La proportion de terre fine est comparable dans le mélange TA-BA-BS et le témoin, avec respectivement 21,7% et 21,8%.

Les mélanges diffèrent légèrement au niveau de la portion caillouteuse. En effet, au sein de la portion des éléments de diamètre supérieur à 10 mm, le témoin et le mélange TA-DB-DV présentent respectivement 50% et 60% d'éléments de calibre 40-80 mm d'une part et 40% et 30% d'éléments de calibre 20-40 mm d'autre part tandis que la portion grossière du mélange TA-BA-BS se compose de 25% d'éléments de calibre 40-80 mm, de 55% d'éléments de calibre 20-40 mm et 20% d'éléments de calibre 10-20 mm. En somme, les éléments grossiers du mélange TA-BA-BS sont de plus petit calibre que pour les deux autres mélanges.

3. Propriétés hydrodynamiques

Les mesures d'infiltrométrie permettent de déterminer les courbes de conductivité hydraulique et de rétention en eau des différents mélanges.

a) Conductivité hydraulique

La Figure 17 présente les courbes de conductivité hydraulique obtenues en surface pour les mélanges testés et les courbes théoriques obtenues en présence d'un sol sableux, limono-sableux et limoneux pour comparaison. Tous les MTP ont un comportement proche de celui de sols sableux tandis que le comportement du matériau de croissance se rapproche plus de celui d'un sol limoneux. Ceci est dû à la forte proportion d'éléments très grossiers dans les MTP, facilitant l'écoulement et rendant le mélange analogue à un sol sableux.

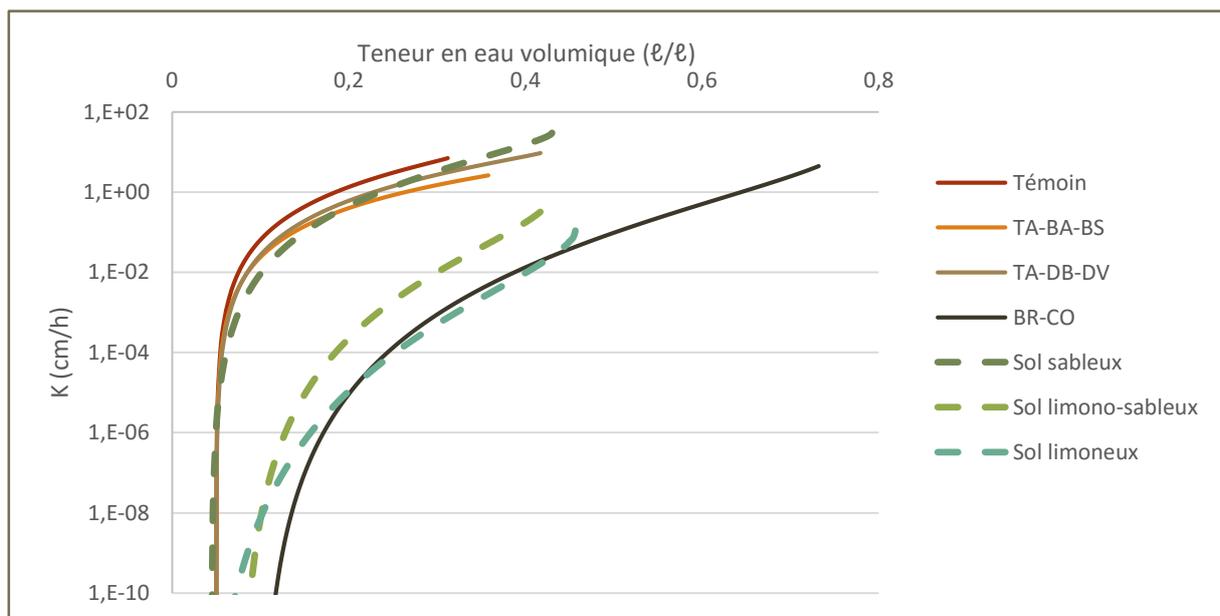


Figure 17 : Conductivité hydraulique (cm/h) en surface des mélanges en fonction de la teneur en eau volumique (l d'eau / l de sol).

b) Capacité de rétention en eau

La Figure 18 présente les courbes de rétention en eau obtenues en surface pour les mélanges testés et les courbes théoriques obtenues en présence d'un sol sableux, limono-sableux et limoneux pour comparaison. Le BR-CO a un comportement proche de celui d'un sol limono-sableux tandis que le mélange témoin et le TA-DB-DV se comportent comme des sols sableux. Le mélange TA-BA-BS a un comportement intermédiaire entre un sol sableux et un sol limono-sableux.

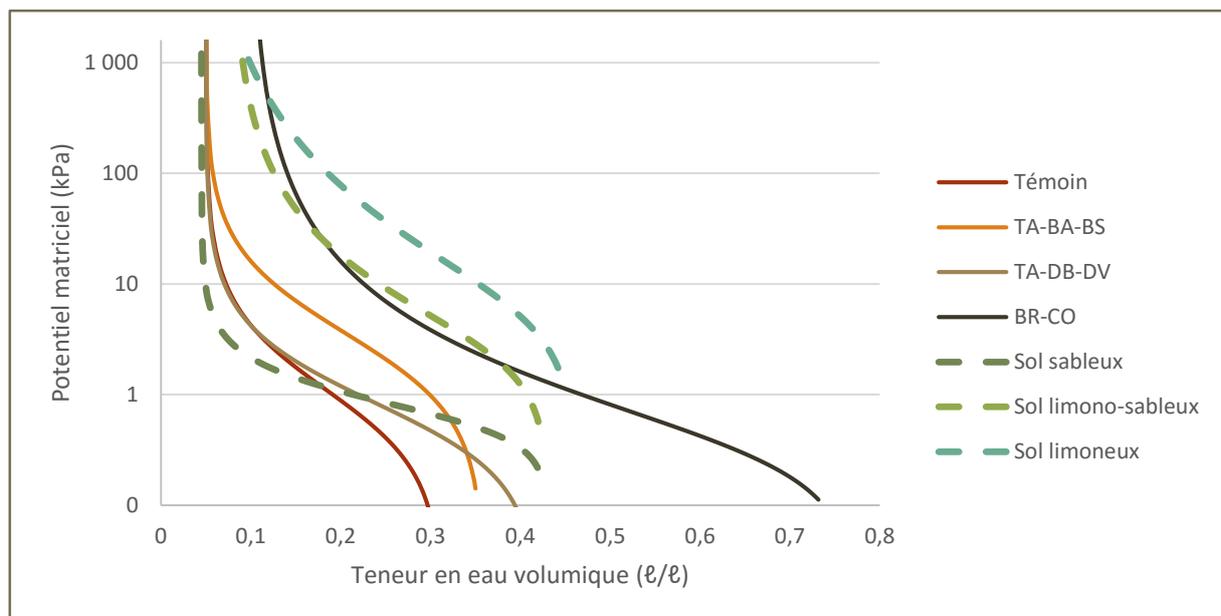


Figure 18 : Courbes de rétention en eau de surface des mélanges : Potentiel matriciel (kPa) en fonction de la teneur en eau volumique (ℓ d'eau / ℓ de sol).

c) Réserve utile

La réserve utile des sols a été calculée à partir des courbes de rétention en eau du sol. La réserve utile correspond au volume d'eau compris entre la teneur en eau volumique à la capacité de rétention et la teneur en eau volumique au point de flétrissement. Le Tableau 4 présente les réserves utiles des différents mélanges.

Le matériau de croissance a une réserve utile supérieure à celles des MTP. Le mélange TA-BA-BS a la réserve utile la plus importante des MTP, nettement supérieure à celle du témoin. Le mélange TA-DB-DV a une réserve utile plus faible que le témoin. De manière générale, les MTP ont tous une réserve utile relativement faible, nécessitant une irrigation régulière.

Tableau 4 : Réserve utile des différents mélanges

	BR-CO	Témoin	TA-BA-BS	TA-DB-DV
Réserve utile (mm)	15,35	4,07	9,87	2,65

4. Propriétés chimiques

Le Tableau 5 présente les propriétés chimiques de la portion de terre fine ($\varnothing < 2$ mm) des mélanges étudiés, y compris le matériau de croissance, aux temps t_0 et t_1 . Une nette chute des

quantités de matière organique dans le BR-CO est survenue après un an de plantation et ce dans tous les contextes. Cette diminution correspond au phénomène de dégradation de la MO. Les mélanges TA-BA-BS et TA-DB-DV présentent une teneur en matière organique à t_1 supérieure à celle de t_0 , et plus particulièrement dans TA-BA-BS. Ceci est probablement dû à l'état de la MO dans les mélanges à t_0 . En effet, la matière organique est présente initialement sous formes de conglomérats de plus de 2 mm de diamètre qui ne sont pas passés au tamis lors du prélèvement de la portion de terre fine, a fortiori pour les boues de station d'épuration présentes dans le mélange TA-BA-BS. Dans les bacs et sous l'effet de l'humidité et de la dégradation de la MO, les agrégats se seraient fractionnés, conduisant à une augmentation apparente de la MO dans la terre fine. La teneur en MO dans le témoin est restée semblable entre t_0 et t_1 . Dans tous les cas, la teneur en MO est considérée comme élevée.

La CEC présente des variations semblables à celles de la MO, les deux grandeurs étant fortement liées. En effet, la MO permet de fixer des cations, ce qui explique la corrélation de ces grandeurs. Les valeurs de CEC dans le BR-CO et les MTP sont satisfaisantes.

Globalement, les MTP obtenus à partir de déchets ont des teneurs en éléments majeurs équivalentes ou supérieures au témoin, ce qui est un critère agronomique important pour la performance des arbres.

Tableau 5 : Propriétés chimiques des matériaux. Les valeurs sont mesurées pour la terre fine ($\varnothing < 2$ mm).

	Mélanges	MO (g/kg)	C/N	pH	CE (mS)	CEC (cmol+/kg)	CaO (g/kg)	P2O5 (g/kg)	K2O (g/kg)	MgO (g/kg)
t_0	BR-CO	271,10	9,30	7,00	1,12	42,90	13,30	0,85	4,33	1,78
	Témoin	62,40	18,20	4,60	2,03	14,30	3,97	0,16	0,34	0,48
	TA-BA-BS	23,90	7,70	6,70	1,16	4,70	3,64	0,16	0,24	0,27
	TA-DB-DV	23,40	14,90	7,70	2,72	4,10	15,10	0,10	0,49	0,22
t_1	BR-CO Dans Témoin	126,90	11,00	7,10	0,39	22,60	7,05	0,46	0,29	0,30
	BR-CO Dans TA-BA-BS	98,60	9,20	7,10	0,35	16,30	5,50	0,52	0,19	0,29
	BR-CO Dans TA-DB-DV	133,00	9,10	7,60	1,37	21,00	11,90	0,65	0,31	0,25
	Témoin	61,77	18,03	4,63	1,23	13,00	3,14	0,20	0,10	0,10
	TA-BA-BS	48,10	8,10	6,53	0,41	11,10	3,00	0,42	0,17	0,28
	TA-DB-DV	26,83	14,40	7,77	2,26	4,77	14,03	0,10	0,13	0,08

IV/ DISCUSSION

Afin de déterminer si des MTP construits à partir de déchets des villes présentent la fertilité agronomique nécessaire au développement de végétaux ligneux, la performance de croissance et de développement d'*Acer platanoides* ont été caractérisées et évaluées à l'issue de la première année de plantation sur les mélanges étudiés. Le mélange terre-pierre utilisé par le service espaces verts de la ville d'Angers fait office de témoin. Le mélange TA-BA-BS est constitué de terre acide, de ballast et de boues de stations d'épuration. Le mélange TA-DB-DV est constitué de terre acide, de débris du bâtiment et de déchets verts.

Pour ce faire, différents critères d'évaluation de la performance, dont les résultats des mesures ont été présentés précédemment, ont été établis. Les données collectées sur les propriétés physico-chimiques des sols étudiés serviront de support pour expliquer en partie les tendances observées.

Le protocole d'analyse d'images des racines a pour vocation de servir dans la suite de l'étude.

A. Comparaison de la performance des arbres étudiés

Le premier indicateur de performance des arbres est la génération de biomasse. En effet, il est attendu d'un sol urbain qu'il limite le moins possible la croissance des arbres.

La biomasse des tiges des arbres plantés dans le mélange TA-DB-DV est environ 30% plus importante que celle du témoin, ce qui indique une performance des arbres sur ce milieu meilleure qu'avec un MTP classique. Les biomasses foliaires et racinaires mesurées pour ce même mélange sont équivalentes à celles du groupe témoin.

Le mélange TA-BA-BS présente des résultats plus mitigés avec une génération de biomasse au mieux équivalente à celle du témoin. En effet si la biomasse de tiges et la colonisation latérale de la fosse de plantation sont comparables pour ce mélange et le témoin, la biomasse foliaire générée est d'à peine 60% de celle obtenue chez le témoin. De plus ce mélange est globalement le moins favorable à la colonisation du sol par les racines car la biomasse racinaire totale du témoin est de deux fois supérieure à celle du mélange TA-BA-BS et la proportion de racines dans la couche profonde est d'à peine 10%, contre des proportions autour de 40% pour les deux autres modalités. Cette difficulté de pénétration du sol par les racines pourrait limiter virtuellement le volume de fosse disponible pour l'arbre.

Afin d'affiner les conclusions dégagées grâce à l'analyse de la biomasse des arbres, des données extraites des relevés architecturaux des arbres permettent d'évaluer leur développement selon trois critères : l'élongation, l'organogénèse et la ramification.

La longueur moyenne des axes permet de caractériser leur élongation. Comme décrit précédemment, la seule différence notable quant à l'élongation entre les différentes modalités étudiées pourrait venir d'une anomalie survenue au cours de la première année de croissance de l'arbre n°6, un des individus plantés sur le mélange TA-BA-BS. Toutes les modalités donnent des résultats comparables en matière d'élongation en regard des moyennes globales. Les résultats sont comparables par ordre entre le témoin et le mélange TA-DB-DV.

L'organogénèse est caractérisée par le nombre moyen de métamères. Encore une fois, le mélange TA-DB-DV présente des résultats comparables au témoin et le mélange TA-BA-BS est légèrement en deçà. Cet écart s'explique par un nombre de métamère plus faible pour l'ordre III, ce qui semble indiquer qu'il est fortement lié à une ramification moins importante chez les arbres plantés dans le mélange TA-BA-BS.

Le nombre d'axes est l'indicateur le plus évident de la ramification. Le mélange TA-DB-DV et le témoin donnent des nombres d'axes comparables. Le mélange TA-BA-BS donne des arbres présentant un nombre d'axes nettement moins élevés avec en moyenne un écart de 40%. Cette tendance est confirmée par le nombre de métamères par ordre, lui aussi indicateur de la ramification.

Le Tableau 6 synthétise les résultats permettant de comparer la performance des arbres des mélanges testés avec ceux du témoin.

Tableau 6 : Comparaison des résultats obtenus pour les deux mélanges testés avec ceux du témoin

	TA-BA-BS	TA-DB-DV
Élongation	=	=
Organogénèse	-	=
Ramification	-	=
Biomasse foliaire	-	=
Biomasse des tiges	=	+
Pénétration du MTP	=	+
Colonisation en profondeur	-	=

B. Mise en relation avec les résultats sur la fertilité physico-chimique des sols

Les données issues de l'analyse de la fertilité physico-chimique des sols sont cohérentes avec les différences de performance des arbres et permettent donc de formuler des conjectures sur leur origine.

La masse volumique apparente des mélanges à t_1 est respectivement de $1,83 \text{ t/m}^3$ pour le témoin, de $1,89 \text{ t/m}^3$ pour le mélange TA-BA-BS et de $1,49 \text{ t/m}^3$ pour le mélange TA-DB-DV. Les valeurs pour le témoin et TA-BA-BS sont supérieures au seuil de $1,67 \text{ t/m}^3$ au-delà duquel la croissance racinaire est entièrement stoppée dans les sols à texture grossière (Foil & Ralston, 1967, Heilman, 1981, Landon, 1991 *in* Jim, 1998). Pourtant, les racines ont pénétré dans ces mélanges, bien que moins efficacement que dans le TA-DB-DV. La nature particulière du MTP pourrait expliquer ce phénomène. En effet, la grande quantité d'éléments de diamètre important présents dans celui-ci est susceptible d'augmenter artificiellement la masse volumique apparente du mélange tout en conservant une portion fine de terre suffisamment peu compactée pour permettre la croissance des racines.

Le mélange TA-DB-DV présente une plus grande proportion de la biomasse racinaire totale ayant pénétré le MTP que le témoin et TA-BA-BS. Ceci s'explique sa faible masse volumique apparente. La difficulté des racines à explorer en profondeur le mélange TA-BA-BS pourrait quant à elle résulter de la forte masse volumique apparente du mélange.

L'analyse granulométrique a montré une grande similarité des mélanges dans leur constitution au niveau de la portion de terre de calibre inférieur à 10 mm. En revanche, le calibre inférieur du ballast en comparaison des éléments grossiers des deux autres mélanges explique l'importance du tassement observé pour le mélange TA-BA-BS et donc le développement racinaire plus limité.

Le comportement des trois mélanges en matière de conductivité hydraulique est équivalent et proche de celui que l'on observe au sein d'un sol sableux. Concernant la rétention en eau, le mélange témoin et le mélange TA-DB-DV se comportent comme des sols sableux et le mélange TA-BA-BS comme un sol sablo-limoneux, ce qui se traduit par des réserves utiles faibles dans l'ensemble. Cela est attendu d'un MTP et se traduit par des besoins en irrigation accrus, idéalement par petites quantités rapprochées. Il est à noter que cela en fait un sol relativement drainant, ce qui doit être pris en considération lors de la sélection des essences d'arbres à installer.

La composition chimique des deux mélanges est extrêmement satisfaisante avec des teneurs en MO et en éléments trace importantes. Le pH des mélanges construits à base de déchets est même plus neutre que le témoin, ce qui en fait de bons substrats pour une plus vaste palette de végétaux. En revanche, ni le sol ni les eaux de drainages n'ont été testées pour la présence de polluants et il pourrait être pertinent de se poser la question étant donnée la nature des matériaux utilisés.

C. Synthèse

En somme, le mélange TA-DB-DV semble être un bon substitut aux MTP classiques tels que le mélange utilisé par le service espaces verts d'Angers, utilisé comme témoin. En effet, pour une grande majorité des indicateurs de performances utilisés pour comparer les mélanges, les arbres issus de la série TA-DB-DV présentent des résultats au moins aussi satisfaisants que le témoin. Le seul point sur lequel ce mélange semble être moins efficace est la biomasse racinaire totale, pour laquelle la valeur était 25% inférieure dans le cas du mélange TA-DB-DV. Cependant, la biomasse racinaire dans le MTP est plus élevée pour ce dernier que pour le témoin, ce qui indique que la différence de biomasse racinaire totale est plus vraisemblablement liée à la variabilité de physiologie des plantes qu'à une résistance à la pénétration du substrat par les racines.

Le mélange TA-BA-BS présente des résultats plus mitigés. Sur tous les indicateurs de performance, les arbres plantés dans ce mélange présentent des valeurs au mieux comparables à celles du témoin et parfois nettement en deçà. Il semble donc que ce mélange soit moins adapté à la croissance et au développement de végétaux ligneux que le mélange TA-BA-BS et le mélange témoin. Pourtant, il est à noter que sur les neuf arbres étudiés, tous étaient en excellente santé et aucun ne présentait de dégâts liés à un système racinaire insuffisant (décoloration et chute des feuilles, dépérissement des branches proches de la cime etc.). Le mélange, bien qu'il ne permette pas une performance optimale, est donc tout de même viable pour la plantation d'arbres d'alignement. Il reviendra aux concepteurs et aux gestionnaires d'espaces verts de décider si les avantages inhérents à l'utilisation de ce mélange (coût moindre, matériaux recyclés et donc renouvelables, disponibles à proximité) surpassent son efficacité moindre. L'étude au temps t_1 ne permet pas d'être catégorique sur la viabilité pour des arbres de plus grande taille ou sur la durée mais il est possible d'imaginer, si les résultats des tests ultérieurs le confirment, l'utilisation intentionnelle des propriétés nanisantes de ce mélange.

Conclusion

Cette étude a montré que les mélanges employés possèdent la fertilité agronomique nécessaire au développement de végétaux ligneux et qu'ils se présentent comme des alternatives satisfaisantes à l'usage de matériaux issus de ressources non-renouvelables. De plus, le protocole expérimental de mesure des racines par analyse d'images permettra à l'avenir d'affiner l'analyse de la capacité des arbres à coloniser les fosses de plantation.

La tâche 4 du projet SITERRE va se poursuivre encore sur deux années au cours desquelles il sera possible de tirer de premières conclusions sur la viabilité à moyen et long terme de tels mélanges, ce que n'a pas réellement permis cette étude, qui se situe à seulement 12 mois de la mise en place du dispositif expérimental. Si les conclusions dégagées par cette étude se confirment au terme des trois ans d'expérimentation, Il pourra être envisagé de mettre en place un test *in situ* à plus grande échelle et concernant une population plus importante.

Il est possible, selon l'évolution postérieure de cette expérimentation, que la construction de sols urbains en tant que support de croissance de végétaux ligneux à partir de déchets devienne une pratique courante dans les services espaces-verts et pour les aménageurs, en raison de la raréfaction des matériaux communément utilisés aujourd'hui et de l'augmentation de leur coût. Ceci impliquerait la modification des processus de traitement et de stockage des déchets des villes, en particulier dans les domaines de l'infrastructure et des espaces verts afin de faciliter, voire de permettre, l'approvisionnement en matériaux de récupération en quantité satisfaisante. Une telle modification des pratiques et de l'organisation des services peut être perçue comme une contrainte supplémentaire à la mise en place d'un dispositif potentiellement extrêmement durable. Le travail de sensibilisation des collectivités et du public sur l'intérêt de cette nouvelle pratique sera certainement décisif sur son impact, si elle s'avérait être aussi intéressante que cette première étude le suggère.

Références

- Atger C. (1992). Essai sur l'architecture racinaire des arbres. Doctorat sciences agronomiques, Université de Montpellier II, Montpellier, 287 p.
- Baize D., Girard M.C. (1995). Référentiel pédologique 1995. INRA Ed., Paris, 332 p.
- Bell A. (1991). Plant form: an illustrated guide to flowering plant morphology. Oxford University Press, Oxford, 341 p.
- Bensaoud A., Marié X. (2000). Arbres d'alignement : évaluation de l'enracinement par la méthode tensiométrique. *PHM-Revue horticole*, 415, pp. 40-43.
- Bourgery C., Maillet L. (1993). L'arboriculture urbaine. Collection mission du paysage, Institut pour le développement forestier, Paris, 318 p.
- Craul P.J. (1992). Urban soil in landscape design. John Wiley & Sons, New York, 416p.
- Fuentes B., Bolan N., Naidu R. and de la Luz Mora M. (2006). Phosphorus in organic-waste soil systems. *Revisita de la ciencia del suelo y nutrición vegetal*, 6 (2), pp. 64-83.
- Gajri P.R., Arora V. K., Kumar K. (1994). A procedure for determining average root length density in row crops by single-site augering. *Plant Soil*, 160, pp. 41-47.
- Grabosky J., Bassuk N. (1995). A new urban tree soil to safely increase rooting volumes under sidewalks. *Journal of Arboriculture*, 21 (4), pp. 187-201.
- Grabosky J., Bassuk N. (1996). Testing of structural urban tree soil materials for use under pavement to increase street tree rooting volumes. *Journal of Arboriculture*, 22 (6), pp. 255-263.
- Grabosky J., Bassuk N., and Marranca B.Z. (2002). Preliminary findings from measuring street tree shoot growth in two skeletal soil installations compared to tree lawn plantings. *Journal of Arboriculture*, 28 (4), pp. 106-108.
- Gras R. (1988). Physique du sol pour l'aménagement. Masson Ed.
- Gras R. (1994). Sols caillouteux et production végétale. INRA Ed., 175 p.
- Grosbelet C., Vidal-Beaudet L., Caubel V., Charpentier S. (2011). Improvement of soil structure formation by degradation of coarse organic matter. *Geoderma*, 162 (1-2), pp. 27-38.
- Jim C.Y. (1998). Urban soil characteristics and limitations for landscape planting in Hong Kong. *Landscape and Urban Planning*, 40, pp. 235-249.
- Jimenez E.I. (1993). City refuse compost as a phosphorus source to overcome the P-fixation capacity of sesquioxide-rich soils. *Plant and Soil*, 148(1), pp. 115-127.
- Johnson A.F. et al. (2004). Fate of phosphorus in dairy wastewater and poultry litter applied on grassland. *Journal of Environmental Quality*, 33 (2), pp. 735-739.

- Lyr H., Hoffman G. (1967). Growth rates and growth periodicity of tree roots. *International Review of Forestry Research*, 2, pp.181-236.
- Mualem Y. (1976). A new model predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resources Research*, 12, pp. 513-522.
- Nehls T., Rokia S., Mekiffer B., Schwartz C., Wessolek G. (2012). Contribution of bricks to urban soil properties. *Journal of Soils and Sediments*, 13 (3), pp. 1-10.
- Parr J.F. et Colaccio D. (1987). Organic materials as alternative nutrient sources. *Energy in plant nutrition and pest control*, 2, pp. 81-99.
- Raimbault P. (2000). Colonisation des sols urbains par les racines des arbres. *PHM-Revue horticole*, 414, pp. 45-49.
- Rosenbaum M.S., McMillan A.A., Powell J.H., Cooper A.H., Culshaw M.G., Northmore K.J. (2003). Classification of artificial (man-made) ground. *Engineering Geology*, 69 (3-4), pp. 399-409.
- Schröder K. (1993). Concept d'assainissement et mesures techniques pour le réaménagement de la place Grosse Domfreiheit à Osnabrück. *Document des journées d'Osnabrück*. Traduction Sol Paysage, 5 p.
- Séré G., Schwartz C., Ouvrard S., Sauvage C., Renat J.C., Morel J.L. (2008). Soil construction: A step for ecological reclamation of derelict lands. *Journal of Soils and Sediments*, 8, pp. 130-136.
- Séré G., Schwartz C., Ouvrard S., Renat J.C., Watteau F., Villemin G., Morel J.L. (2010). Early pedogenic evolution of constructed technosols. *Journal of Soils and Sediments*, 10, pp. 1246-1254.
- Šimůnek J., Van Genuchten M.Th. and Sejna M. (2008). Development and applications of the HYDRUS and STANMOD software packages and related codes. *Vadose Zone J.*, 7, pp. 587–600.
- Smit A.L., Bengough A.G., Engels C., Noordwijk M. van, Pellerin S., Geijn S.C. van de (2000). *Root methods : a handbook*. Springer, 587 p.
- Sol Paysage (1996). Rapport d'expérimentation sur les mélanges terre-pierres. Caractérisation physique et mécanique en vraie grandeur. *Document interne*, 12 p.
- Van Voorhoeve J.J.C. (1974). Organic fertilizers: problems and potential for developing countries. *World Bank Fertilizer Background Paper*, (4).

AGROCAMPUS
OUEST

CFR Angers

CFR Rennes



Année universitaire : 2013-2014

Spécialité :

Paysage

Spécialisation (et option éventuelle) :

Maîtrise d'Œuvre et Ingénierie

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)

Emploi de déchets dans la constitution de sol support de croissance des végétaux ligneux en milieu contraint : approche expérimentale

Par : Romain DAOLIO-DERVAUX

ANNEXES

Soutenu à Angers le 29/06/2015

Devant le jury composé de :

Président : Patrice CANNAVO

Maître de stage : Laure VIDAL-BEAUDET

Enseignant référent : Vincent BOUVIER

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

Liste des annexes

Annexe I : photographies du site expérimental.....	I
Annexe II.1 : courbes de granulométrie détaillées pour le témoin.....	II
Annexe II.2 : courbes de granulométrie détaillée pour TA-BA-BS.....	III
Annexe II.3 : courbes de granulométrie détaillées pour TA-DB-DV.....	IV
Annexe III : courbes de régression ayant servi à l'extrapolation de la biomasse des tiges..	V

Annexe I : photographies du site expérimental

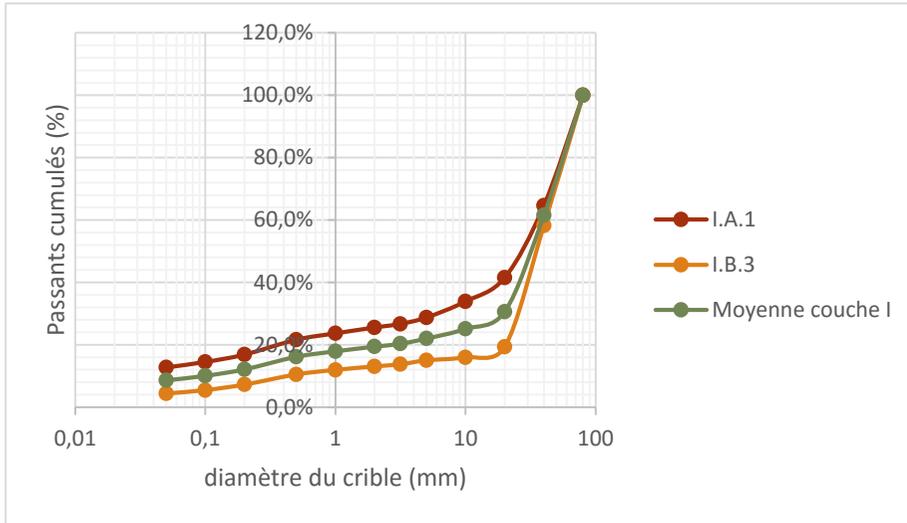


Annexe I.1 : Photographie du site expérimental

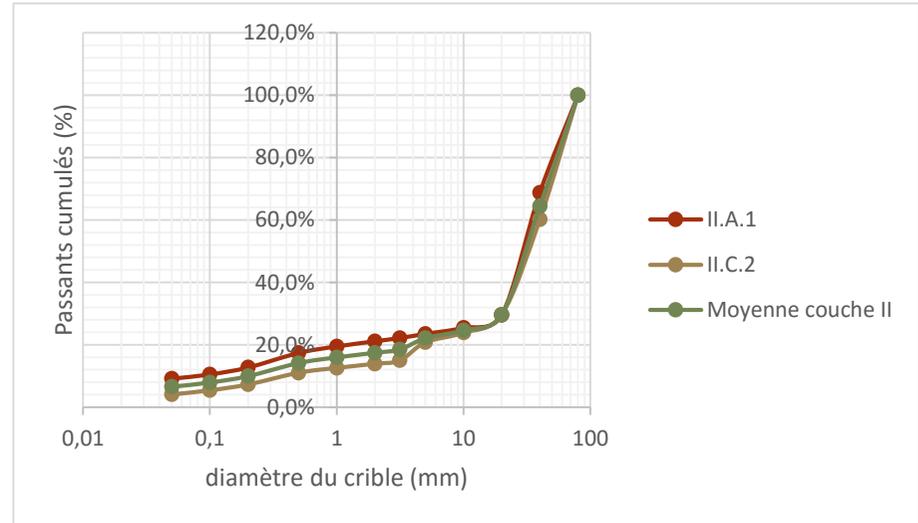


Annexe I.2 : Photographie d'un bac découpé avant extraction des racines et des échantillons de sol

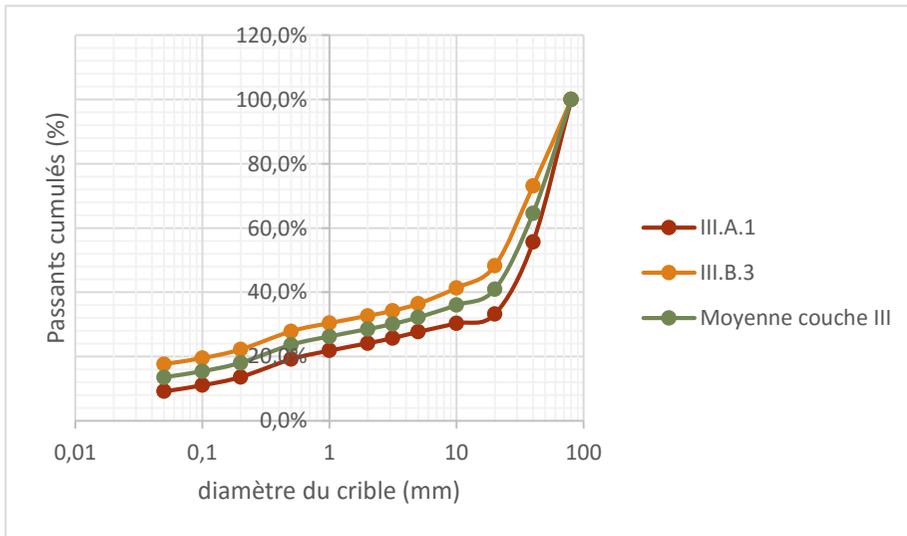
Annexe II.1 : courbes de granulométrie détaillées pour le témoin



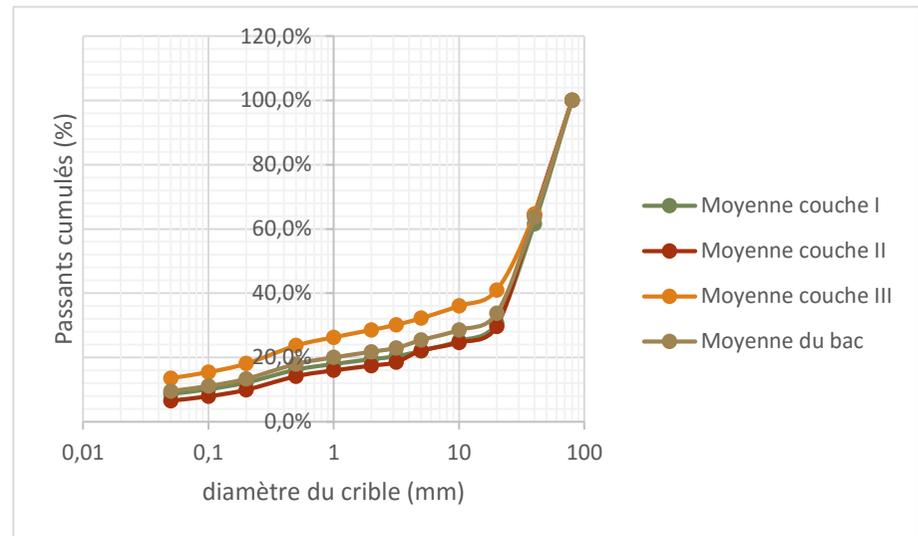
Annexe II.1.a : Courbes granulométriques de la couche superficielle du témoin



Annexe II.1.b : Courbes granulométriques de la couche médiane du témoin

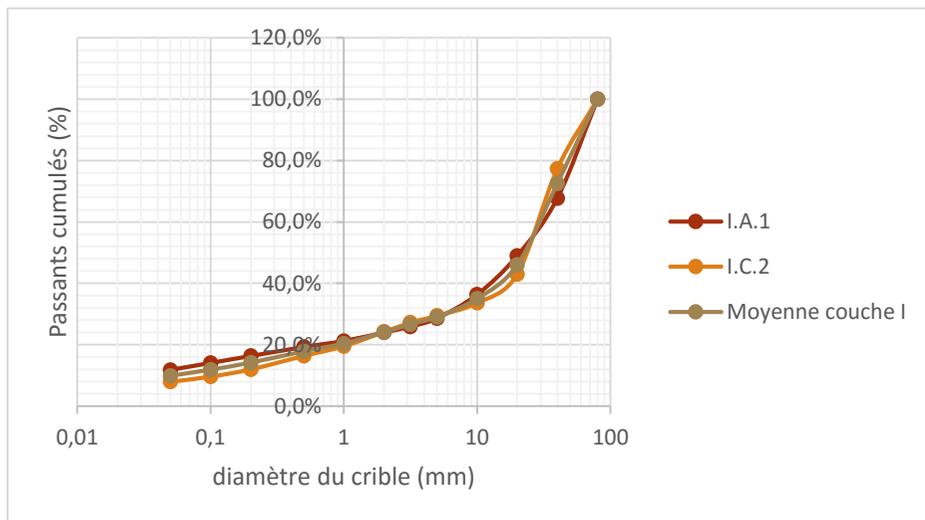


II Annexe II.1.c : Courbes granulométriques de la couche profonde du témoin

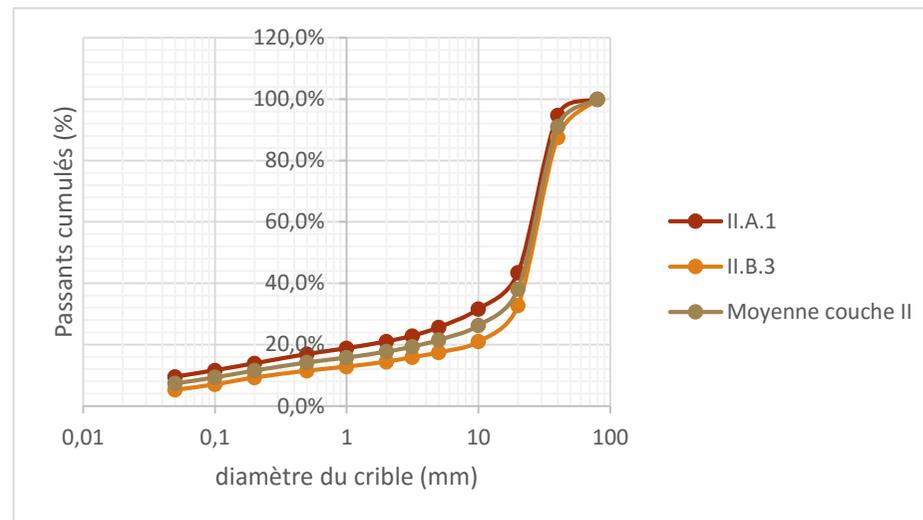


Annexe II.1.d : Courbes granulométriques moyennes par couche du témoin

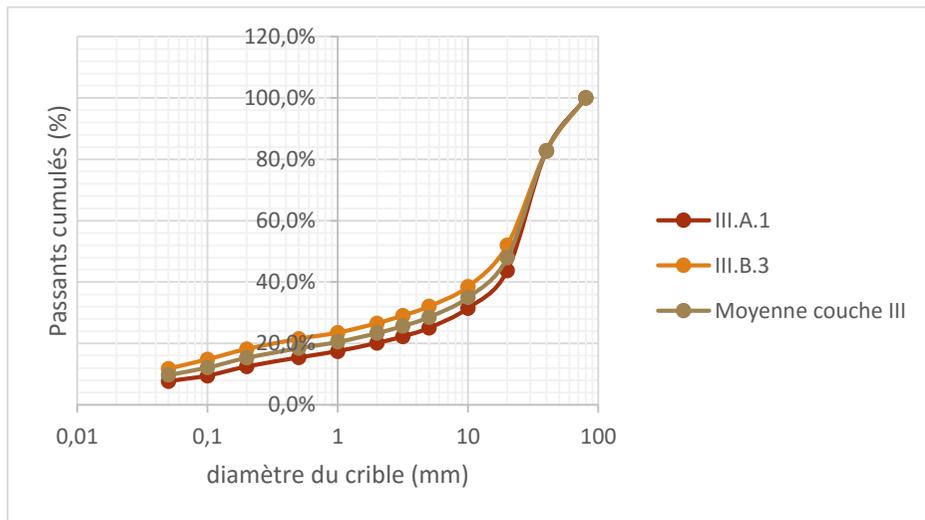
Annexe II.2 : courbes de granulométrie détaillée pour TA-BA-BS



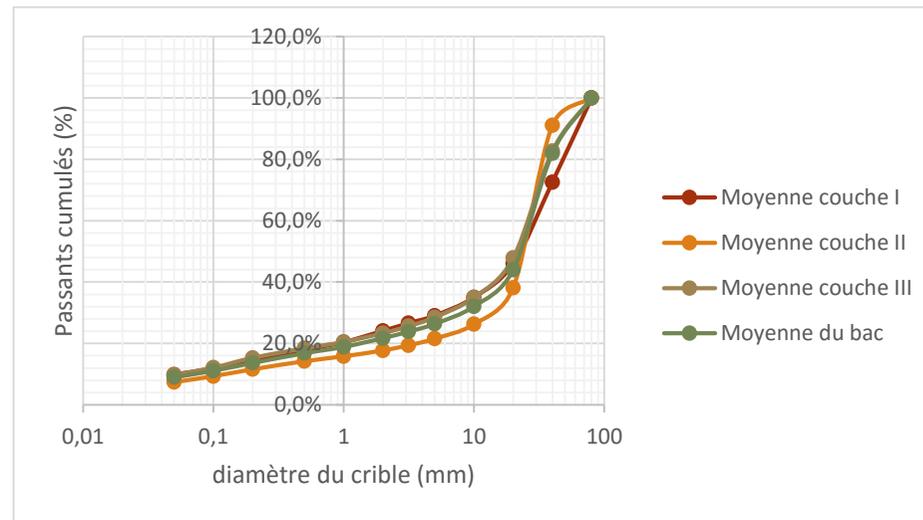
Annexe II.2.a : Courbes granulométriques de la couche superficielle de TA-BA-BS



Annexe II.2.b : Courbes granulométriques de la couche médiane de TA-BA-BS

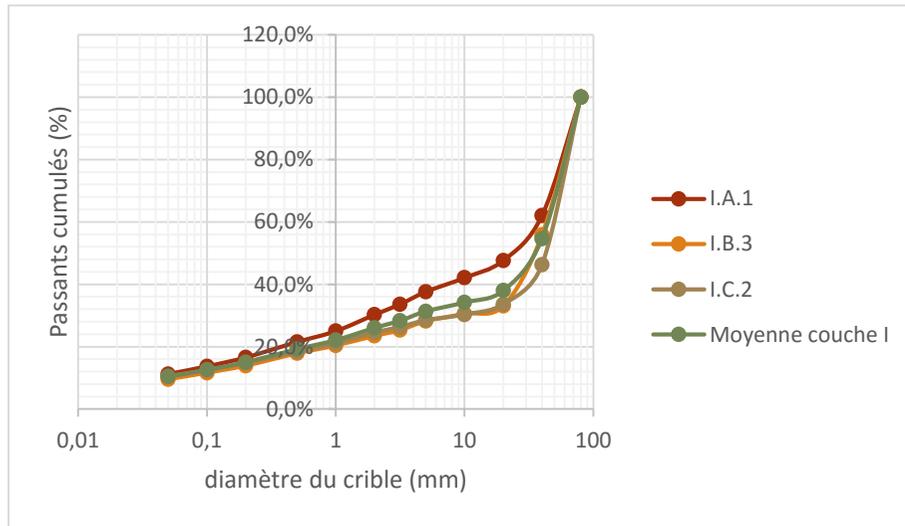


Annexe II.2.c : Courbes granulométriques de la couche profonde de TA-BA-BS

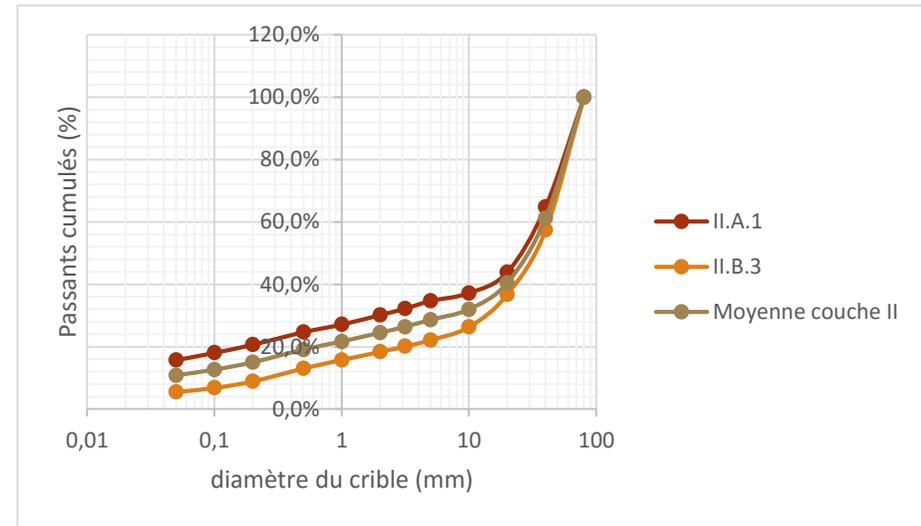


Annexe II.2.d : Courbes granulométriques moyennes par couche de TA-BA-BS

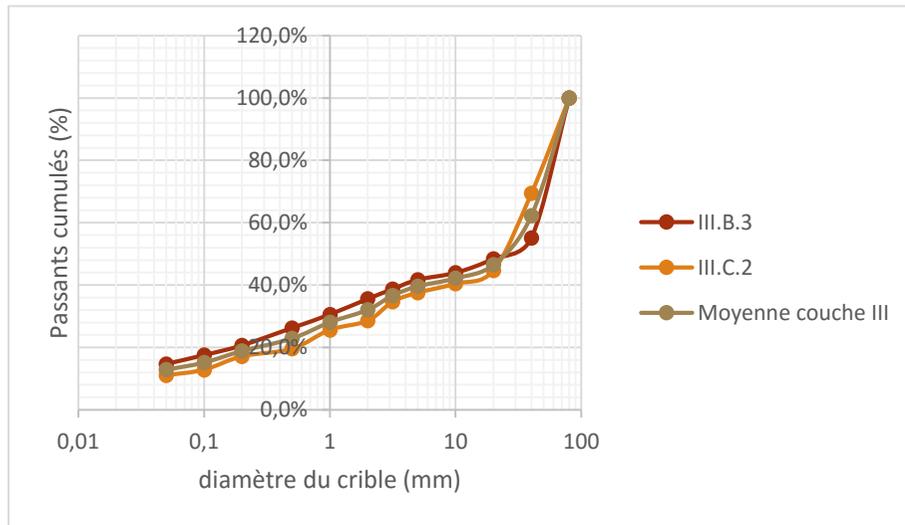
Annexe II.3 : courbes de granulométrie détaillée pour TA-DB-DV



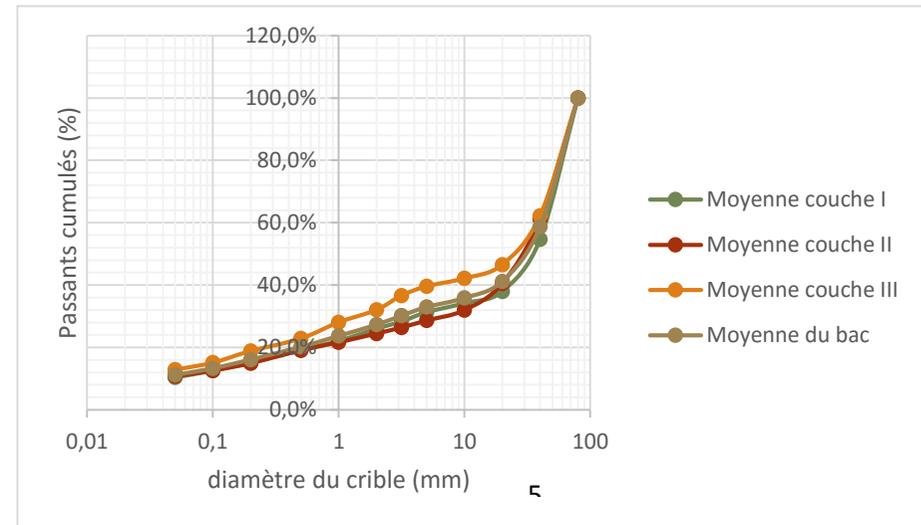
Annexe II.3.a : Courbes granulométriques de la couche superficielle de TA-DB-DV



Annexe II.3.b : Courbes granulométriques de la couche médiane de TA-DB-DV

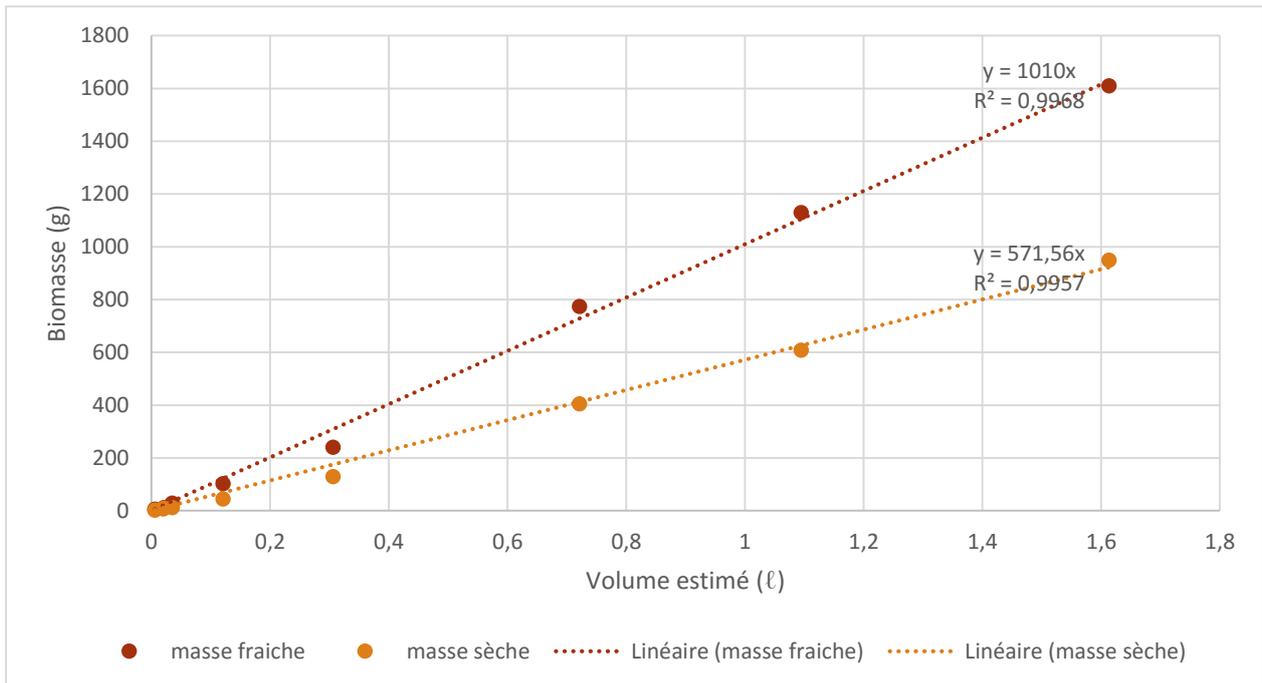


IV Annexe II.3.c : Courbes granulométriques de la couche profonde de TA-DB-DV

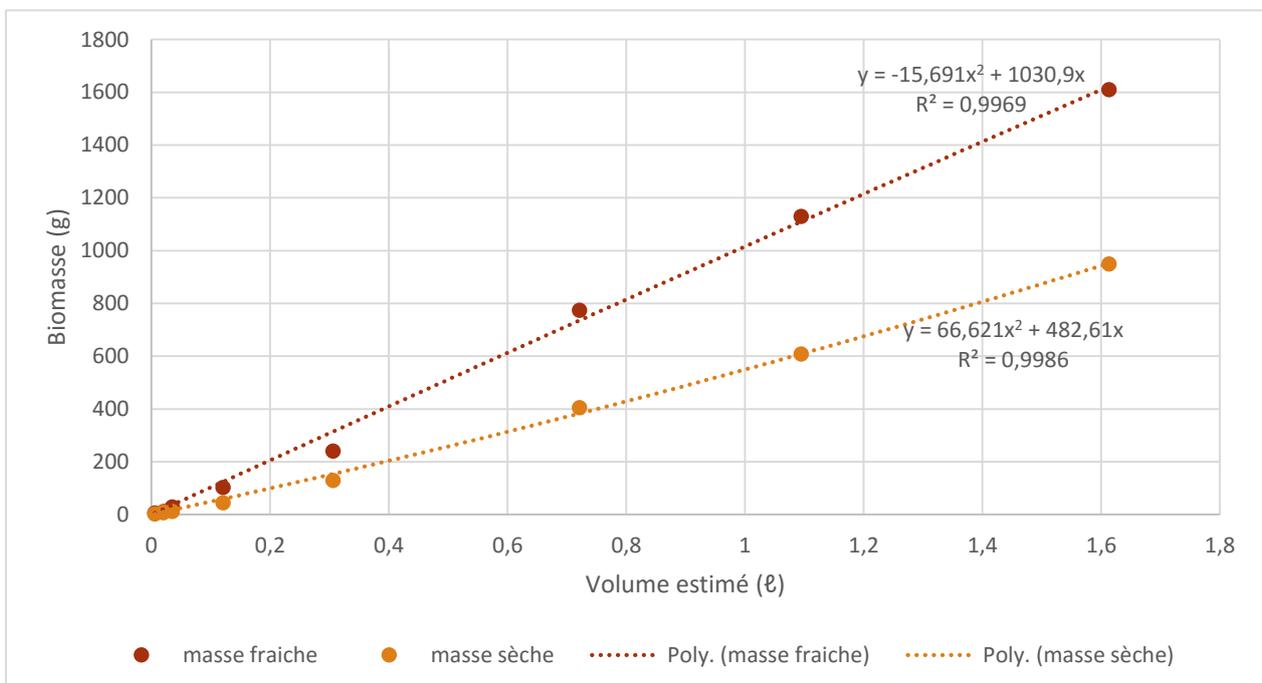


Annexe II.3.d : Courbes granulométriques moyennes par couche de TA-DB-DV

Annexe III : courbes de régression ayant servi à l'extrapolation de la biomasse des tiges



Annexe III.a : Biomasse de tige (g) en fonction du volume de tige estimé (l). Utilisation d'un modèle linéaire avec membre constant nul.



Annexe III.a : Biomasse de tige (g) en fonction du volume de tige estimé (l). Utilisation d'un modèle polynomial du second degré avec membre constant nul.

	Diplôme : Ingénieur Spécialité : Paysage Spécialisation / option : MOI Enseignant référent : Christophe MIGEON
Auteur(s) : Romain DAOLIO-DERVAUX	Organisme d'accueil : Agrocampus Ouest Centre d'Angers
Date de naissance* : 05/12/1991	Adresse : 2 rue André Le Nôtre, 49000 Angers
Nb pages : 34 Annexe(s) : 5	
Année de soutenance : 2015	Maître de stage : Laure VIDAL-BEAUDET
Titre français : Emploi de déchets dans la constitution de sol support de croissance des végétaux ligneux en milieu contraint : approche expérimentale Titre anglais : Use of waste materials in the formation of soil as a growing medium for ligneous plants in strained environment: experimental approach	
Résumé (1600 caractères maximum) : Les techniques actuelles d'installation de végétaux d'alignement en milieu urbain mettent en œuvre des matériaux dont l'origine et la nature ont un coût économique et écologique élevé. De plus, ceux-ci n'étant pas renouvelables, il existe un risque important qu'ils se raréfient dans un avenir relativement proche. La piste des déchets comme matière première de construction des anthroposols urbains semble pallier les inconvénients des méthodes classiques. L'objet de cette étude est de comparer le développement de végétaux ligneux, en l'occurrence des <i>Acer platanoides</i> , après un an de plantation dans deux mélanges terre-pierre constitués de déchets des villes et un mélange utilisé par le service espaces-verts de la ville d'Angers. La biomasse et l'architecture des arbres ont été choisies comme indicateurs de croissance et de développement des arbres. Elles ont été mises en relation avec les paramètres de fertilité physico-chimique des sols afin de déterminer s'ils se présentent comme une alternative satisfaisante au MTP classique. En parallèle, un protocole de mesure des racines par analyse d'images a été mis au point pour permettre des mesures qualitatives de la colonisation de la fosse de plantation dans les études ultérieures de ce projet. Les mélanges testés présentent des résultats comparables au témoin et pourraient donc être envisagés comme substitut des mélanges classiques mais seule la poursuite de l'étude permettra de le confirmer.	
Abstract (1600 caractères maximum) : Current installation techniques of ligneous plants in urban environment use materials whose origin and nature have a high economic and ecological cost. Moreover, not being renewable, there is a significant risk of them getting rarer in a relatively close future. The use of waste materials as raw material to build urban anthroposols seem to palliate the drawbacks of the usual methods. The goal of this study is to compare the development of ligneous plants, in this case <i>Acer platanoides</i> , after one year of growth on two waste-based soil-stones mixtures and the one used by the Parks Department of Angers (France). Biomass and architecture of the trees serve as development and growth indicators. They have been linked to soil physicochemical fertility parameters in order to determine if they are a satisfying alternative to usual soil-stone mixture. In addition, a measurement protocol of roots by image analysis has been developed to allow qualitative measurement of plant ditch colonisation by the root systems of the trees during subsequent studies. Tested mixtures give similar results to the control and could therefore be considered as a substitute to usual mixtures but only the pursuit of the study will confirm that fact	
Mots-clés : MTP, déchets, arbre urbain, biomasse, croissance et développement, fertilité, anthroposols construits, racines, tiges Key Words: soil-stone mixture, waste materials, urban tree, biomass, growth & development, fertility, anthroposol reconstituted, roots, stems	

* Élément qui permet d'enregistrer les notices auteurs dans le catalogue des bibliothèques universitaires