



**HAL**  
open science

# Palette végétale : intégrer les sols construits et le milieu urbain, dans le contexte d'un projet expérimental mené par AGREGE

Louison Leroy

## ► To cite this version:

Louison Leroy. Palette végétale : intégrer les sols construits et le milieu urbain, dans le contexte d'un projet expérimental mené par AGREGE. Sciences du Vivant [q-bio]. 2019. dumas-02336596

**HAL Id: dumas-02336596**

**<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-02336596>**

Submitted on 29 Oct 2019

**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.

Année universitaire : **2018/2019**

Spécialité/Mention : **Paysage**

Spécialisation/Parcours :

**Paysage : opérationnalité et projet**

### 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)

## Palette végétale : intégrer les sols construits et le milieu urbain

Dans le contexte d'un projet expérimental mené par AGREGE

Par : Louison LEROY



(Yelloh village, n.d)

L'illustration représente la Dune du Pilat, en Gironde, c'est également le volume de terre végétale consommé tous les 20 ans en France

**Soutenu à Angers le 5 Septembre 2019**

#### **Devant le jury composé de :**

Président : Pierre-Emmanuel Bournet

Autres membres du jury (Nom, Qualité)

Maître de stage : Laurent Beyron

Enseignant référent : Laure Beudet

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

Ce document est soumis aux conditions d'utilisation

«Paternité-Pas d'Utilisation Commerciale-Pas de Modification 4.0 France»

disponible en ligne <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.fr>





## 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 <sup>(1)</sup>.

Date et signature du tuteur de stage <sup>(2)</sup> :

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

### Droits d'auteur

L'auteur<sup>(3)</sup> Nom Prénom : LEROY Louison

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

Oui  Non

Si oui, il autorise

la diffusion papier du mémoire uniquement<sup>(4)</sup>

la diffusion papier du mémoire et la diffusion électronique du résumé

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

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

Date et signature de l'auteur :

### Autorisation de diffusion par le responsable de spécialisation ou son représentant

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

Oui  Non

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

Si oui, il autorise

la diffusion papier du mémoire uniquement<sup>(4)</sup>

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

Tout d'abord, je tiens à remercier l'atelier VILLES & PAYSAGES de m'avoir ouvert leur porte pour mon stage de fin d'étude. Merci pour leur accueil chaleureux, le cadre de travail de qualité et le partage de connaissance qu'ils m'ont offert durant cette période. J'ai apprécié partager avec l'ensemble de cette équipe pluridisciplinaire, tant sur le métier de paysagiste-concepteur, qu'autour de parties de babyfoot endiablées. Merci à eux pour m'avoir accompagné dans cette dernière étape qui clôture ces cinq années d'études passées à Agrocampus-Ouest – INHP à Angers.

Un merci tout particulier s'adresse à Laure Vidal-Beaudet, ma professeur référente, pour avoir pris le temps de m'aiguiller lors de ce travail de réflexion et de rédaction. Merci à Laurent Beyron, mon maître de stage pour sa confiance et pour m'avoir fait évoluer durant cette période. Merci à Pauline Houlon et Camille Garreau pour le temps accordé et pour leurs précieux conseils.

Ces remerciements s'adressent également à mes parents, ainsi qu'à mon frère, qui m'ont toujours soutenu et m'ont permis d'arriver à ce but. Un merci tout particulier à mon père, qui m'a transmis dès mon plus jeune âge, sa passion pour le végétal que je porte désormais en moi.

Ensuite, un grand merci à mes amis de promotion et à mes compagnons de césure, qui représentent ma seconde famille, avec qui on s'est vu refaire le monde et partagé tellement de choses. Merci aux amis lyonnais et à mes colocataires d'avoir enrichi ces six mois de découverte. Merci à Erwan Richard et Maud Duval pour la relecture du manuscrit.

Pour terminer, merci aux arbres à qui nous devons beaucoup.



## LISTE DES ABREVIATIONS

**ADEME** : Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie

**AMM** : Autorisation de Mise sur le Marché

**ANR** : l'Agence Nationale de la Recherche

**AVP** : Avant-Projet

**CCTG** : Cahier des Clauses Techniques Générales

**CCTP** : Cahier des Clauses Techniques Particulières

**CEC** : Capacité d'Echange Cationique

**CED** : Catalogue Européen des Déchets

**DCE** : Dossier de Consultation des Entreprises

**DREAL** : Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement

**FUI** : Font Unique Interministériel

**ICU** : Îlot de Chaleur

**IPI** : Indice de Portance Immédiat

**MOA** : Maîtrise d'Ouvrage

**MOE** : Maîtrise d'Œuvre

**OAD** : Outil d'Aide à la Décision

**OPN** : Optimum Proctor Normal

**PLU** : Plan Local Urbanisme

**PRO** : Projet

**RNSA** : Réseau National de Surveillance Aérobiologique

**RPF** : Référentiel Pédologique Français

**SCOT** : Schéma de Cohérence Territoriale

**UNEP** : Union Nationale des Entreprises du Paysage



## LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Volume et profondeur minimales des fosses de plantations d'après le CCTG Fascicule 35 - Source : (Le Gourrierec, 2012) .....	5
Figure 2: Vue aérienne et thermographie d'un parc urbain à Paris - Source : (APUR, 2012).....	7
Figure 3 : Ilot de chaleur urbain (Paris, canicule 2003) - Source : (de Munck et al.,2013) .....	6
Figure 4 : Effet de l'arbre pour rafraîchir l'air– Source : (Leroy, 2019) d'après (APUR, 2012).....	7
Figure 5 : Effet de l'arbre sur les rayonnements solaires - Source : (Leroy, 2019) d'après (APUR, 2012).....	7
Figure 6 : Influence des arbres d'alignement dans la "rue canyon" – Source : (Pommier et al.,2014) .....	8
Figure 7 : Influence de l'urbanisation sur l'évolution des débits arrivant à l'exutoire d'un bassin versant, suite au ruissellement des eaux après un évènement pluvieux - Source : (CERPRI, 2014).....	9
Figure 8 : L'apport des différents éléments végétalisés urbains à la gestion des eaux de ruissellement urbaines - Source : (ADEME, 2017) .....	9
Figure 9 : Arbre de décision - Source : (UNEP, 2012) .....	14
Figure 10 : Présentation des enjeux de la protection des sols naturels et leur traduction dans la planification territoriale - Source : (Blanchard, 2018).....	15
Figure 11 : Evolution de l'utilisation des sols naturels en réutilisant des sols urbains sur site de projet - Source : (Blanchard, 2018).....	17
Figure 12 : Les trois espaces à dominante urbaine – Source : (Blanchard, 2018) .....	18
Figure 13 : Schéma du cycle circulaire du recyclage des matériaux de construction – Source : (Monacoparc, n.d).....	20
Figure 14 : Schéma synthétique des caractéristiques de chaque horizon – Source : (Leroy, 2019) d'après (Damas et Coulon, 2016) .....	21
Figure 15 : Etape de réalisation d'un mélange – Source : (Leroy, 2019) d'après (Damas et Coulon, 2016).....	22
Figure 16 : Modélisation et chronologie des coûts – Source : (Damas et Coulon, 2016) .....	23
Figure 17 : Plan de localisation de la revalorisation urbaine de St-Chamond : Source : (Leroy, 2019).....	27
Figure 18 : Plan de masse de la reconversion urbaine de Novaciéries - Source : (atelier VILLES & PAYSAGES, 2016) .....	28
Figure 19 : Andain de terre, suite au tri et au traitement - Source : (Leroy, 2019).....	28
Figure 20 : Répertoire de catalogue de végétaux – Source : (Plant d'Anjou, 2015).....	31
Figure 21: Schéma illustrant les architectures des arbres en condition d'alignement dans une rue - Source : (Leroy, 2019) .....	32
Figure 22 : Schéma de la relation entre l'usage, le sol et les végétaux – Source : Leroy, 2019) .....	33
Figure 23 : Résultat d'une échaudure sur un arbre - Source : (Ameglio at al., nd) .....	34
Figure 24 : Profil de sol pour la catégorie « Alignement d'arbre » - Source : (Leroy, 2019) .....	35
Figure 25 : Profil de sol pour la catégorie "Parcs et squares » - Source : (Leroy, 2019) .....	36

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Résultats des estimations des coûts (en €/tonne) pour l'horizon de croissance - Source : (Damas et Coulon, 2016).....	24
Tableau 2 : Type d'usage en fonction des typologies des espaces selon l'AITF - Source : (Damas et Coulon, 2016).....	32

## LISTE DES ANNEXES

- ANNEXE I : Impact du milieu urbain sur les arbres – Source : (Bourgerie et al., 2008)
- ANNEXE II : Influence des façades végétalisées et d'une surface enherbée dans la "rue canyon" – Source : (Pommier et al.,2014)
- ANNEXE III : Profil de sol – Source : (Descroix.,2016)
- ANNEXE IV : Moteurs de l'étalement urbain – Source : (Laugier, 2012)
- ANNEXE V : Modulation morphologique de la densité et densification en dents creuses – Source : (Ile de France, 2015) et (Urbanews, 2011)
- ANNEXE VI : Modes de formation des différentes références d'anthrosols – Source : (Baize, Girard, 2008)
- ANNEXE VII : Evaluation semi-quantitative des services écosystémiques rendus par les sols construits, en comparaison des pratiques habituelles basées sur l'utilisation de ressources naturelles – Sources : (Damas et Coulon, 2016)
- ANNEXE VIII : Exemples de matériaux pour les quatre typologies identifiées dans le programme ADEME-SITERRE – Sources : (Damas et Coulon, 2016)
- ANNEXE IX : Résultats des expériences pour évaluer les fonctions des sols construits – Sources : (Damas et Coulon, 2016)
- ANNEXE X : Résultat des expérimentations des coûts pour les différents horizons dans le cadre du programme ADEME-SITERRE – Source : (Damas et Coulon, 2016)
- ANNEXE XI : Résultats des expériences menées sur l'implantation de végétation sur des sols construits dans le cadre du programme ADEME-SITERRE – Source : (Damas et Coulon, 2016)
- ANNEXE XII : Mise en œuvre de sols construits et une strate arborée en grandeur nature menée par le programme ADEME-SITERRE – Source : (Damas et Coulon, 2016)
- ANNEXE XIII : Mise en œuvre de sols construits et une strate arborée en grandeur nature menée par le programme ADEME-SITERRE – Source : (Damas et Coulon, 2016)
- ANNEXE XIV : Projet de reconstitution de sols fertiles à partir de matériaux recyclés – Source : (DNPB et al., 2014)
- ANNEXE XV : Localisation de la plateforme de tri et de traitement des terres à Novaciéries et localisation de la revalorisation de celles-ci – Source : (Leroy,2019)
- ANNEXE XVI : Photos d'une partie de la valorisation des terres suite au traitement – Source : (atelier VILLES & PAYSAGES, 2016)
- ANNEXE XVII : Profils fonctionnels des 5 usages modèles de sols en ville définis pour assurer les fonctions de support, d'alimentation en eau et de filtre et échange – Source : (Damas et Coulon, 2016)
- ANNEXE XVIII : Localisation du projet expérimental sur le site de Novaciéries – Source : (Leroy, 2019)
- ANNEXE XIX : Plan de de zonage des plantations pour le secteur 1 et 2 – Source : (Leroy, 2019)
- ANNEXE XX : Tableaux de sélection des essences pour la catégorie « arbre d'alignement » - Source (Leroy, 2019)
- ANNEXE XXI : Tableaux de sélection des essences pour la catégorie « parcs et squares » - Source (Leroy, 2019)
- ANNEXE XXII : Plan de plantation du secteur 1 – Source : (Leroy, 2019)
- ANNEXE XXIII : Plan de plantation du secteur 2 – Source : (Leroy, 2019)

## GLOSSAIRE

**Bioterre** : Technique de traitement des sites et sols pollués : dégradation par la mise en tas du sol puis en son traitement biologique par bio-augmentation ou biostimulation.

**Echaudure** : Nécrose corticale orientée qui apparaît sur les jeunes arbres quelques années après transplantation, sur le côté orienté sud-ouest du tronc (implication du rayonnement solaire).

**Essence** : Synonyme d'espèce en langage forestier, et par extension en paysage.

**Fosse de plantation** : Partie du sol travaillée en vue d'accueillir l'implantation d'un végétal. Cette fosse permet aux végétaux de démarrer leur croissance dans de bonnes conditions et par la suite les racines peuvent se développer dans le sol.

**Lysimètre** : Un lysimètre est un dispositif permettant d'étudier et de mesurer l'évolution de l'eau dans un sol naturel, agricole, forestier, expérimental, pollué ou dans un écotron. Le mot lysimètre décrit différents appareils, qui ont cependant en commun d'analyser les interactions Eau-Sol-Vivant, la part du vivant pouvant être limitée aux végétaux, ou incluant la microfaune et flore du sol, selon les cas. Lorsqu'il s'agit de mesurer uniquement l'évaporation des sols avec couverture végétale, on doit utiliser le terme « évapotranspiromètre ». Dans ce cas, le bac est muni d'un appareil de mesure des quantités d'eau ajoutées et perdues par évapotranspiration.

**Mail** : Allée bordée d'arbres se trouvant en ville.

**Noria** : Allers et retours ininterrompus de véhicules de transport.

**Résilience** : C'est la capacité d'un système à faire face à un événement ou une perturbation en répondant ou en se réorganisant de manière à maintenir sa capacité d'adaptation et retrouver ses fonctions et un état d'équilibre dynamique.

**Végétal d'ornement (ou d'agrément)** : utilisé pour introduire du végétal en ville, pour « embellir » la ville. Contrairement à l'arbre de production, le but recherché n'est pas la production de bois ou de fruits pour l'industrie ou l'agroalimentaire.





## AVANT-PROPOS

L'atelier VILLES & PAYSAGES, est une agence de paysage et d'urbanisme basée à Lyon. Depuis près de 30 ans, l'atelier est spécialisé dans la conception d'espaces publics et dans la mobilité en ville. L'agence positionne le végétal et la ville perméable au cœur de ses préoccupations afin d'augmenter le confort et la qualité des usages. Ce sont des spécialistes de projets de tramways avec la réalisation de près de 300 km en France et à l'international, mais également de projets de bus à haut niveau de service (BHNS). VILLES & PAYSAGES est composé d'une équipe de 15 collaborateurs dont sa force est la pluridisciplinarité.

Au cours de ce stage, j'ai principalement été affecté à des missions d'appui sur des projets divers (base de loisirs, tramway, BHNS, promenade verte), en plus de participer à des tâches de renfort plus ponctuelles sur d'autres projets lorsque cela s'avérait nécessaire. J'ai pu suivre le projet du programme AGREGE sur la reconstitution de sols urbains fertiles qui m'a fait prendre conscience de l'enjeu lié à la ressource « terre végétale ». J'ai donc choisi d'approfondir le sujet à travers ce mémoire.

## TABLE DES MATIERES

Introduction.....	1
<b>1 Le végétal en ville et les besoins en sol .....</b>	<b>3</b>
1.1 La place du végétal en ville .....	3
1.1.1 Une histoire riche et complexe .....	3
1.1.2 Le végétal tel que perçu par les acteurs de la planification urbaine et les citoyens .....	3
1.1.3 Des contraintes de développement dans le paysage urbain .....	5
1.2 L'arbre, un acteur indispensable pour répondre aux enjeux urbains actuels et futurs .....	6
1.2.1 Climatiser les villes .....	6
1.2.2 Gérer les eaux pluviales .....	8
1.2.3 Améliorer le cadre de vie et la santé des citoyens .....	10
1.2.4 Les autres enjeux .....	11
1.3 Arbre en ville, le défi des sols fertiles .....	12
1.3.1 Etat des lieux des sols en ville .....	12
1.3.2 Définition et emploi de la terre végétale dans les projets d'aménagements urbains .....	13
1.3.3 Prise de conscience des enjeux des sols urbains dans la planification territoriale... ..	14
1.3.4 La réglementation pour une protection des sols.....	16
1.3.5 Les freins à l'utilisation de la terre végétale dans les projets urbains.....	17
<b>2 Sols urbains : de la terre végétale à la construction de sol .....</b>	<b>18</b>
2.1 Création de sols issus de produits du recyclage .....	18
2.1.1 Sols urbains et sols anthropisés : éléments de définition .....	18
2.1.2 Une démarche s'inscrivant dans le recyclage et le réemploi.....	20
2.1.3 Les services écosystémiques rendus par ces sols.....	21
2.1.4 Capacité des sols à assurer leurs rôles.....	21
2.2 Une perspective encourageante pour ces anthroposols .....	22
2.2.1 L'aspect opérationnel : une organisation de proximité .....	22
2.2.2 Une économie viable et circulaire.....	23
2.2.3 Naissance d'une filière .....	24
2.2.4 Vers une évolution de la réglementation .....	25
2.3 Implantation du végétal sur des sols construits : de l'expérimentation à la pratique .....	25
2.3.1 Constitution d'un socle fertile pour le développement de végétation.....	25
2.3.2 Expérimentation sur sites lysimétriques .....	26
2.3.3 Mise en application sur le terrain .....	26

3	Mise en place d'une palette végétale test dans le cadre du projet AGREGE sur le site pilote de Novaciéries à Saint-Chamond.....	27
3.1	Le projet dans son contexte .....	27
3.1.1	Le contexte du site pilote Novaciéries .....	27
3.1.2	Le travail de dépollution des terres <i>in situ</i> .....	28
3.1.3	Inscription du projet AGREGE dans le concept de ville durable.....	29
3.2	Quelle méthodologie élaborer pour le choix des végétaux dans le cadre du projet ? .....	30
3.2.1	Une multitude de critères de sélection .....	31
3.2.2	Définir la typologie des espaces urbains en fonction de l'usage .....	32
3.2.3	Identifier les conditions de développement en milieu urbain .....	33
3.2.4	Les autres critères .....	34
3.3	Exemple de l'arbre sur le site pilote de Novaciéries .....	35
3.4	Les limites et les pistes de réflexion à la proposition d'une gamme végétale adaptée .....	36
3.4.1	Un manque de retour temporel sur l'évolution des végétaux .....	36
3.4.2	Des outils d'aide à la décision (OAD) à la disposition des paysagistes concepteurs à encourager.....	37
3.4.3	Fortifier le lien entre la production et la conception .....	38
3.5	Vers une utilisation démocratisée des sols construits dans le paysage urbain.....	39
3.5.1	Développement d'outils annexes permettant de promouvoir les sols construits ..	39
3.5.2	La construction de sols, une technique à encourager .....	39
	Conclusion.....	41
	Bibliographie.....	42
	Sitographie.....	44



## INTRODUCTION

Depuis près de 60 ans en France, les populations ne cessent de se ruier vers le milieu urbain pour atteindre un niveau de vie plus correct et accéder à des services rares en milieu rural. Cette course effrénée de la population pour habiter en ville ne se termine pas, elle atteint une part de 80% dès 2017, en France [2]. Au fil du temps la ville est passée sous plusieurs stades de planification et d'urbanisation afin d'optimiser l'accueil des citoyens. De l'étalement urbain du XXème siècle à la densification du XXIème siècle, la valorisation de la ville intérieure est aujourd'hui de mise. Cette régénérescence s'accompagne par de grands projets urbains, tant sur le plan bâti que sur le plan de l'espace public desquels le paysagiste peut tirer son épingle du jeu.

Du Sommet de la Terre à Rio en 1992 à la COP 21 à Paris en 2015, les enjeux environnementaux qui menacent la planète, cheminent dans les esprits des citoyens et des acteurs politiques. Ils passent de la prise de conscience à la prise en main. L'ensemble des villes du territoire font face à des vagues de chaleur, des inondations et sont sensibles aux aléas climatiques. Elles doivent trouver des réponses aux enjeux qui les menacent. La nature et le végétal représentent un levier d'action majeur pour mener les villes à la résilience et garantir le bien-être des citoyens. Pourtant, la ville serait « perçue par beaucoup comme un espace hostile à la nature, voire un milieu anti-nature » [4], où le développement des espaces végétalisés serait compromis. Malgré tout, le végétal qui a peu à peu trouvé sa place au sein des villes, est source de multiples études qui ventent ses bienfaits économiques, écologiques et sociétaux.

Les grandes cités urbaines sont rendues à un point crucial de leur croissance et de leur développement. En effet, le besoin essentiel de végétaux et l'augmentation des trames vertes urbaines sont des facteurs pour lutter contre le changement climatique. Cependant, le socle et le support des espaces végétalisés tendent à disparaître. Comment accueillir des végétaux en ville sans avoir un sol fertile ? Les sols qui permettent de créer les espaces paysagers, des parcs, des squares et des autres espaces verts en ville, présentent des secrets que la majorité des citoyens ignorent. Ce sol qui a été déplacé pour construire de toutes pièces ces lieux, proviennent de la périphérie de la ville ou même d'ailleurs. Ils servaient il y a peu à cultiver des aliments avant d'être reconstitués. Nicolas Hulot dénonce les sols malmenés, « l'érosion fait des ravages, la perte de fertilité progresse, l'artificialisation est un fléau ». L'Homme est en partie responsable de la destruction des sols, lorsque la ville grignote et imperméabilise les espaces agricoles. La terre utilisée pour les chantiers en provenance des décapages des terres agricoles devient une ressource rare. Le volume de terre utilisée en France, représente tous les 20 ans, l'équivalent de la Dune du Pilat, avec ses 2,7 kilomètres de long, ses 100 m de haut et ses 500 m de largeur, soit un volume de 3 millions de mètres cubes tous les ans (Damas, Coulon, 2016). L'enjeu est donc de taille pour le milieu urbain, végétaliser la ville dans un contexte de crise climatique et développer de nouveaux sols fertiles dans un contexte de raréfaction des ressources.

Tandis que la ville importe de nombreux éléments, elle en exporte davantage. Les déchets représentent des flux importants et les volumes emplissent les centres de stockage et de traitement. Des questionnements subsistent quant à la mobilité des matériaux et à leur réutilisation, dont une maigre partie est recyclée. Des expérimentations étudient la possible utilisation des sous-produits et des déchets, afin de construire un sol fertile destiné aux espaces paysagers urbains. Cette approche s'éloigne des méthodes classiques mais s'inscrit dans un système qui brise le modèle linéaire : extraire, produire, consommer et jeter. Elle s'inscrit directement dans une démarche du développement durable qui apparait dès les années 80 pour limiter les impacts sur l'environnement. La construction de sol rentre avant tout dans un processus d'innovation qui vise à répondre aux évolutions contextuelles d'aujourd'hui.

Ainsi face à ces enjeux de végétalisation des villes et de protection des sols naturels, quelle influence le paysagiste peut-il avoir ? Quel est son rôle dans la végétalisation de l'espace public urbain au travers de sols construits avec des produits issus du recyclage ? En effet, cette notion de végétalisation implique des notions de prise en compte des contraintes liées à l'espace urbain, de choix de végétaux, de durabilité, de compréhension de ces nouveaux sols et d'interface avec une multitude d'acteurs que le paysagiste concepteur doit être en mesure de maîtriser.

Au cours de mon stage de fin d'étude, ma participation au projet AGREGE à Novaciéries sur l'expérimentation de la construction de sol, m'a fait prendre conscience de la raréfaction de la terre végétale et de la nécessité d'anticiper la pénurie pour trouver des alternatives. Le projet a pour objectif de tester différentes strates de végétation ornementale sur des sols construits à partir de résidus de criblage. Le choix des végétaux doit faire partie d'un processus de réflexion et doit être adapté à des conditions urbaines futures.

En découle donc la problématique : **Quelle méthodologie le paysagiste concepteur peut-il proposer, pour créer une palette végétale adaptée à des sols construits avec des matériaux recyclés, dans les projets d'aménagements urbains ?**

Il s'agira dans un premier temps de présenter la place du végétal en ville et de quelle manière il peut répondre aux enjeux urbains d'aujourd'hui et de demain. Les méthodes traditionnelles employées pour reconstituer un sol et les besoins en termes d'aménagements urbains seront définies. La deuxième partie abordera le sujet de la construction de sol en réponse au déficit de la terre végétale. Elle mettra en évidence ses bienfaits et ses méthodes de construction. Les aspects opérationnels et économiques pour le développement d'une nouvelle filière seront développés. Des expérimentations de mise en place de végétation sur des sols construits permettront d'appuyer les recherches et les analyses pour la partie suivante. Enfin, au sein de la troisième partie, une proposition de méthodologie pour faciliter le choix des végétaux sera développée. Elle sera focalisée sur la sélection d'arbres sur des sols construits, dans une optique d'insertion en milieu urbain. Elle sera illustrée à travers le projet AGREGE sur le site pilote de Novaciéries à Saint-Chamond.

# 1 LE VEGETAL EN VILLE ET LES BESOINS EN SOL

## 1.1 La place du végétal en ville

### 1.1.1 Une histoire riche et complexe

Le végétal et le milieu urbain ont eu une histoire riche et complexe, ils se sont rapprochés, éloignés, puis retrouvés. Les populations urbaines ont su donner un rôle au végétal dans le fonctionnement des villes. Dans l'antiquité tout comme au moyen-âge, le végétal et les arbres se font rares dans les cités. C'est à partir de la Renaissance, que les espaces publics émergent avec des promenades et des mails qui sont des lieux souvent fréquentés par l'aristocratie. La ville se dote donc d'arbres toujours à des fins pratiques (production de bois), et récréatives (jeu de mail) avec la plantation des mails (Segur et al., 2011).

Le 17<sup>ème</sup> et 18<sup>ème</sup> siècle signent l'apparition de grands projets d'aménagement en ville qui s'imbriquent dans une stratégie d'hygiénisme. La planification urbaine et la création de voies de circulation (boulevard et cours) et de places sont motrices de l'apparition des alignements d'arbres au sein des cités. En effet, l'arbre est employé pour structurer et uniformiser les paysages urbains et soulignent les grandes perspectives (Segur et al., 2011). Au 19<sup>ème</sup> siècle, la tendance à l'utilisation des arbres et des autres végétaux se systématise et devient un outil dans les stratégies d'urbanisme (Segur et al., 2011). Les opérations de transformations urbaines de Paris par le Baron Haussmann en sont un exemple. La création de parcs et de jardins publics s'accélère et le caractère ornemental est désormais mis en avant. Ces espaces permettent la promenade et le divertissement pour les populations urbaines.

Une rupture s'établit au 20<sup>ème</sup> siècle, les mutations technologiques et les guerres entraînent un bouleversement de la place du végétal en ville. Le bâti prend une place bien plus importante que celui-ci. En effet, les travaux de reconstruction se multiplient et de nombreux quartiers voient le jour sans attribuer une véritable place aux espaces végétalisés. L'automobile est également un facteur des réductions de ces espaces, les voies s'élargissent au détriment des arbres d'alignement (Segur et al., 2011). Avec l'émergence des préoccupations environnementales dans les années 1980 et 1990, les stratégies évoluent et permettent la plantation de nombreux végétaux. Des parcs naturels apparaissent aux abords des villes et la nature reprend une part importante dans la mentalité des citoyens et des acteurs de l'urbanisation. La planification urbaine est en partie responsable de l'installation définitive des espaces verts au sein des politiques d'aménagement. Au 21<sup>ème</sup> siècle, les études scientifiques ont démontré les bienfaits du végétal sur la population urbaine et son environnement, et elles ont permis de renforcer l'intérêt des villes pour les espaces végétalisés urbains.

### 1.1.2 Le végétal tel que perçu par les acteurs de la planification urbaine et les citoyens

Sans aucun doute, les citoyens portent un regard attentionné et positif sur les espaces végétalisés urbains, et en souhaitent même davantage. Pour cause, ces espaces verts sont synonymes de qualité de vie et ont des retombées sociales et économiques, « De nombreuses études ont ainsi démontré le lien entre nature en ville et bien-être » (Robert, Yengué, 2018), et elles font état de « demande sociale de nature en ville » [5]. Le désir de la nature au sein de celle-ci, n'est pas nouveau, mais daterait du XIX<sup>ème</sup> siècle. Il serait devenu omniprésent dans la quête du bonheur dans nos sociétés devenues « hyper urbaines » (Bourdeau-Lepage, Vidal, 2012). La perception positive des citoyens se traduit par une attente élevée en matière d'espaces végétalisés et par un engouement pour devenir acteur de la végétalisation des villes.

Avant tout, les habitants sont des usagers assidus des espaces verts. En effet, des chiffres évoquent les attentes des Français sur la nature en ville : « respectivement 72 % et 75 % des Français en 2008 déclarent se rendre souvent dans les espaces verts de leur commune et prendre en compte les espaces verts dans leur choix résidentiel » (Bourdeau-Lepage, Vidal, 2012). Ils évoquent également un besoin de surfaces allouées aux espaces paysagers, « un Français sur deux souhaiterait que, dans tous les projets immobiliers ou commerciaux, un pourcentage minimal d'espaces verts soit obligatoire. [...] (UNEP-IPSOS 2008) » (Bourdeau-Lepage, Vidal, 2012). Une enquête téléphonique (Boutefeu, 2002), réalisée en 2002 auprès de 350 habitants de la communauté urbaine de Lyon a permis de mettre en lumière un désir de verdure de la population citadine : « 56% des personnes interrogées estiment que le nombre d'espaces verts dans l'agglomération lyonnaise est insuffisant contre 37% qui sont apparemment satisfaits » (Boutefeu, 2002). L'espace végétalisé est connoté tel un espace bucolique et isolé : « l'espace vert incarne « le petit coin de nature » de la ville [...] ce petit bout de verdure est un lieu de nature détaché de la ville ; une enclave située à l'écart de l'agitation urbaine » (Boutefeu, 2002).

Outre, leur fréquentation et leurs attentes en termes de surfaces végétalisées, les populations urbaines sont également actrices de la végétalisation des espaces. De nombreuses métropoles ont mis en place des moyens à disposition des citoyens pour végétaliser des espaces en ville. Paris a initié le permis de végétaliser depuis 2015, qui se développe désormais dans une multitude de cités en province [13]. La municipalité met à disposition des morceaux d'espace public pour permettre aux citoyens de jardiner. « Installer des bacs fleuris sur le bitume, semer sur les trottoirs, faire courir des plantes sur les murs... Voilà qui est désormais autorisé et même encouragé à Montpellier » [13]. Cette tendance est née dans les années 70 à New York via le mouvement de la « guerilla gardening », où des habitants prenaient le droit de jardiner les espaces délaissés.

Les élus et gestionnaires semblent être favorables à la nature en ville, ils sont conscients des bienfaits qu'elle apporte à ses habitants mais également à la municipalité en termes d'image. Ces espaces sont utilisés comme des arguments de séduction pour attirer de nouveaux habitants (Robert, Yengué, 2018) et participent grandement à l'attractivité du territoire. Cependant les gestionnaires sont tiraillés par les citoyens qui sont les usagers de ces espaces publics mais également de potentiels électeurs. Effectivement, les habitants semblent très exigeants en termes d'entretien et favorables à une nature « maîtrisée ». Des témoignages de gestionnaires mettent en lumière une vision antinomique des citoyens sur la nature en ville. D'après eux, les populations citadines ne souhaiteraient recevoir que les avantages liés au végétal, et non ses inconvénients. A titre d'exemple : le citoyen est content de l'ombre qu'un arbre apporte en été mais se plaint des salissures qu'il va produire sur sa voiture via les feuilles qui tombent (Robert, Yengué, 2018). Afin d'éviter les plaintes, les mécontentements et de satisfaire les administrés, les gestionnaires n'ont d'autres choix que de mettre la nature urbaine « sous contrôle », et en rendant l'entretien visible. Les citoyens peuvent parfois faire obstacle à l'intégration de la nature spontanée en ville auxquels s'ajoute la baisse des budgets de gestion (Robert, Yengué, 2018). « Elle est paradoxalement remise en cause par ce désir de nature urbaine qu'exprime le citoyen et que tentent de satisfaire les gestionnaires, désir d'une nature maîtrisée, sans inconvénients, niant dès lors les dynamiques même de la nature » (Robert, Yengué, 2018).

Par conséquent, les citoyens et les élus éprouvent un besoin et une volonté de développer les espaces paysagers en ville, cependant les plantes font face à des freins quant à leur développement au sein de ce milieu si artificiel.

### 1.1.3 Des contraintes de développement dans le paysage urbain

« En écologie, le terme « milieu » désigne l'ensemble des facteurs physiques et biologiques qui régissent la répartition et la croissance des organismes sur un territoire donné » (Bourgerie et al., 2008). Le milieu urbain est composé d'éléments physiques, biologiques, chimiques mais également anthropiques qui vont rentrer en connexion. Il est hostile à l'implantation du végétal et les conditions de croissance et de développement y sont extrêmes (annexe 1). La strate arborée est la plus touchée par les contraintes liées à ce milieu. L'architecture, l'emprise du houppier et des racines font de l'arbre un élément difficile à implanter contrairement aux strates arbustives et herbacées. En effet, l'arbre doit :

- Se faire une place dans le sol pour installer ses racines et disposer d'une réserve hydrique importante
- Développer son houppier pour qu'il puisse respirer et transpirer
- Se battre contre les pollutions, les blessures et chocs, et autres nuisances du milieu

En premier lieu, les cœurs urbains dégagent un climat particulier et différent de celui que l'on peut trouver dans le milieu naturel. Effectivement, des facteurs tels que la lumière, la température et le vent tendent à changer. La température plus élevée en ville par les effets de réverbération peut entraîner des brûlures des feuilles, mais également des échaudures chez les sujets les plus jeunes. La densité du bâti favorise le tourbillonnement du vent qui peut avoir pour conséquence la rupture de branches. (Bourgerie et al., 2008). L'atmosphère est chargée en polluants qui se disséminent dans l'air, l'effet direct des polluants sur les végétaux est difficile à évaluer. La résistance des arbres à la pollution (SO<sub>2</sub>, NO, poussières et particules) est très variable (Bourgerie et al., 2008).

En second lieu, les arbres ont des conditions hydriques difficiles. Les revêtements imperméables sont principalement responsables de ce manque d'eau dont les sujets ont besoin pour vivre. Les situations de sécheresse sont accrues en milieu urbain avec une augmentation des températures, une hygrométrie faible, et une difficulté d'accès aux nappes souterraines. Le surplus d'eau peut également représenter un danger pour les végétaux qui se retrouvent asphyxiés en sous-sol (Bourgerie et al., 2008).

Ensuite, le sol urbain est un facteur majeur de contraintes pour les arbres de ville. Ces sols dont les caractéristiques techniques seront développées plus tard dans le manuscrit, sont le support des végétations. Pourtant, ils sont peu propices à leur croissance par une composition très hétérogène. Ils sont relativement peu vivants et peu fertiles, subissent le tassement et enfin peuvent éprouver la sécheresse ou l'asphyxie (Bourgerie et al., 2008). L'espace attribué aux arbres est peu important et se définit dans la majorité des cas en fonction de la voirie et des réseaux. Les dimensions des fosses lors de la plantation des sujets sont également très réduites pour un développement optimal des sujets à l'image de ce que préconise le CCTG Fascicule 35 (Figure 1).

Type de plantation	Volume	Profondeur
<b>Pour les végétaux implantés dans un milieu qui leur est favorable</b>		
arbres tiges et conifères en bac	6 m <sup>3</sup>	1 m à 1,50 m
arbres et conifères à racines nues ou en motte	2 m <sup>3</sup>	1 m à 1,50 m
baliveaux	0,70 m <sup>3</sup>	0,70 m
<b>Pour les végétaux implantés dans un milieu qui leur est hostile</b>		
arbres tiges et conifères à grand et moyen développement	12 m <sup>3</sup>	1 m à 1,50 m
arbres et conifères de petit développement (3e grandeur)	9 m <sup>3</sup>	1 m à 1,50 m

Figure 1 : Volume et profondeur minimales des fosses de plantations d'après le CCTG Fascicule 35 - Source : (Le Gourrierec, 2012)

Enfin, l'environnement urbain est source d'agression pour les végétaux. Les dommages mécaniques blessent les arbres sur leurs parties aériennes mais également souterraines. Les houppiers des arbres peuvent subir de multiples déformations. Par exemple, des tailles drastiques pour privilégier les lignes aériennes ou encore une plantation trop proche de façades déséquilibrent et déportent les arbres. Le tronc quant à lui est sensible au vandalisme et aux blessures portées par les véhicules. Le système racinaire est affecté par les travaux de voiries

qui ne se préoccupent pas de l'emplacement des arbres et de leurs racines (Bourgerie et al., 2008).

Malgré ces contraintes liées à l'implantation des arbres en ville, leur emploi dans les aménagements urbains doit être démultiplié et facilité car ils se présentent comme des atouts majeurs pour une ville résiliente.

## 1.2 L'arbre, un acteur indispensable pour répondre aux enjeux urbains actuels et futurs

Les métropoles et les grandes agglomérations du monde entier font actuellement face à des enjeux liés aux changements climatiques. Les risques environnementaux, sanitaires, et sociaux menacent directement la qualité de vie des populations citadines à long terme. Les cités n'ont pas d'autres choix que de s'adapter aux changements climatiques en devenant des systèmes résilients et en menant des projets s'inscrivant dans la démarche de transition écologique. Les enjeux fonctionnent de manière connexe, et sont liés entre eux, obligeant ainsi à une intervention non pas contextuelle mais globale sur l'ensemble de l'aire urbaine. Le végétal semble être un levier d'action pour mener la ville vers sa résilience et permettre aux populations de continuer à y vivre dans le futur.

### 1.2.1 Climatiser les villes

A l'heure du changement climatique les cités surchauffent jusqu'à devenir insupportables pour les populations durant les épisodes de canicule. Les îlots de chaleur urbains (ICU) sont responsables de ces échauffements et se définissent par une augmentation locale de la température en ville par rapport aux zones rurales alentours et aux températures moyennes régionales. Ce phénomène reste pour le moment épisodique mais pourrait s'accroître dans les années futures. Plusieurs paramètres sont liés à cette différence de température entre les deux milieux (Provendier, 2017) :

- La typologie surfacique : forte proportion de la surface à des matériaux artificiels imperméables qui réduisent d'une part l'évapotranspiration et emmagasinent la chaleur dans les matériaux aux heures les plus chaudes de la journée (Figure 3) pour les restituer plus tard en soirée.
- La morphologie urbaine : la forme du tissu urbain est un piège radiatif par la réflexion entre les parois et le sol de rayons infrarouges. Il peut également accélérer ou réduire les flux de ventilation.
- Les activités anthropiques : les émissions de chaleur dues au trafic automobile et la climatisation des bâtiments, sont rejetées dans l'atmosphère.

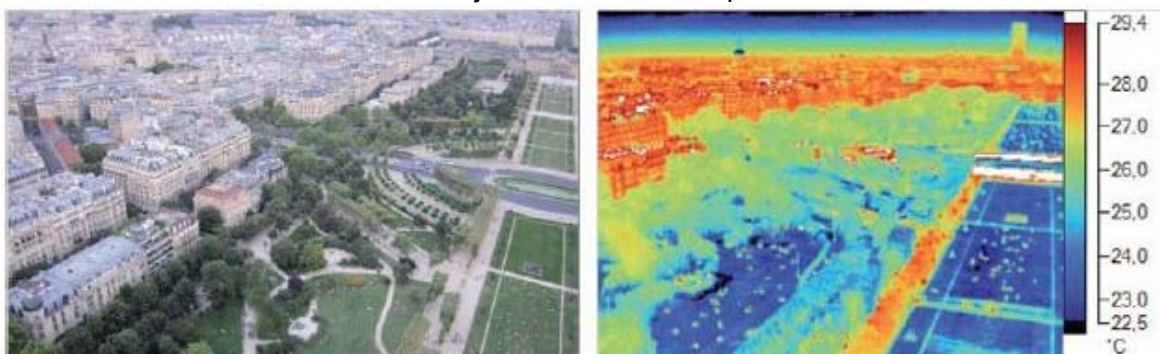


Figure 2 : Vue aérienne et thermographie d'un parc urbain à Paris - Source : (APUR, 2012)

Au cours de la journée, durant les heures les plus chaudes, l'ICU est quasiment inexistant entre le milieu urbain et rural. En revanche, pendant la période nocturne, l'écart de température se creuse. Le milieu rural va pouvoir profiter des redescentes des températures tandis que les aires urbaines vont conserver une température quasi similaire (Figure 2). Selon des mesures réalisées à Paris en 2012 (APUR, 2012), une différence de 8,4 °C aurait été remarquée entre le centre de Paris et Melun durant un épisode caniculaire du 18 au 20 Août 2012.

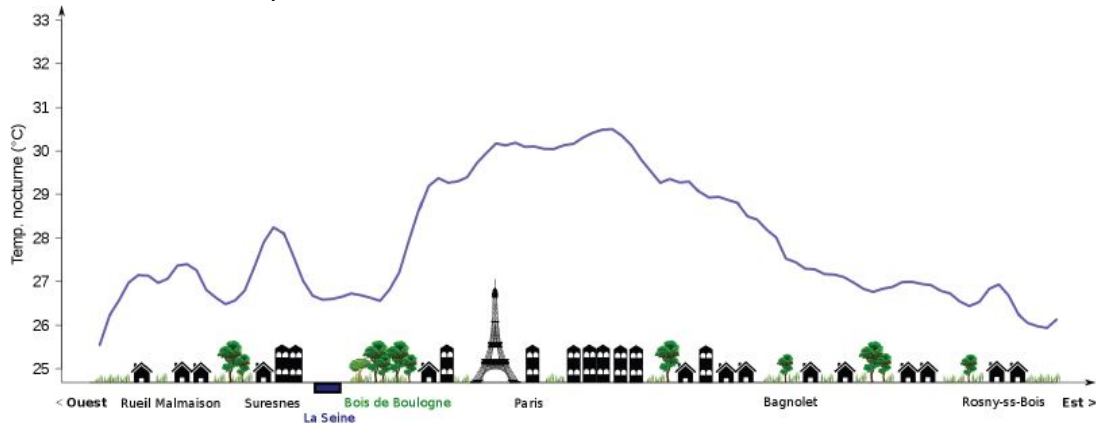


Figure 3: Ilot de chaleur urbain (Paris, canicule 2003) - Source : (de Munck et al., 2013)

Face à ces enjeux de surchauffe des villes, les politiques publiques s'interrogent sur les leviers d'action pour tempérer celles-ci et arriver à un confort thermique. Ce confort est défini par la situation où le corps humain n'est pas gêné par les échanges de chaleur (chauds ou froids) avec l'environnement. L'eau est un climatiseur qui est présent partout en ville, sous forme de rivière (dépend de l'implantation), de fontaines et de bassins, et à travers l'arrosage des espaces verts. La rivière joue un rôle de régulateur thermique. En période de canicule, elle agit comme un circuit de refroidissement de la ville en prélevant la chaleur dans l'air ambiant puis en l'évacuant (APUR, 2012).

Tout comme l'eau, la végétalisation de manière générale peut participer à limiter ces ICU. En effet, l'évapotranspiration est le premier phénomène des végétaux permettant de rafraîchir l'air (Figure 5). L'eau liquide prélevée dans le sol est alors diffusée sous forme de vapeur d'eau par la plante. (APUR, 2012). Le second phénomène est lié au volume de la végétation et sa capacité à créer de l'ombrage. Les arbres filtrent une partie des rayonnements solaires et infrarouges et évitent que les surfaces (revêtement et bâti) ne s'échauffent et stockent l'énergie solaire (Figure 4) (APUR, 2012). La végétation peut se décliner sous différentes formes : des arbres et des surfaces enherbées dans les rues, des murs végétaux pour les façades des bâtiments, puis des toitures végétales pour le toit des bâtiments (Pommier et al., 2014).

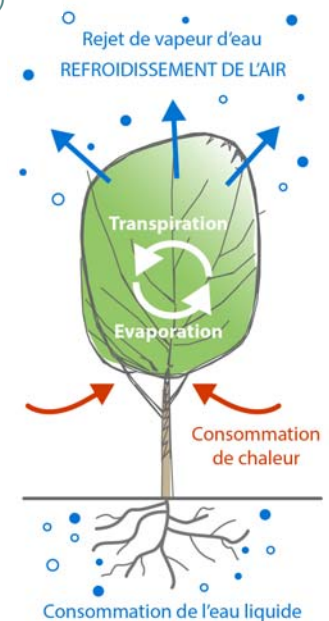


Figure 4 : Effet de l'arbre pour rafraîchir l'air - Source : (Leroy, 2019) d'après (APUR, 2012)

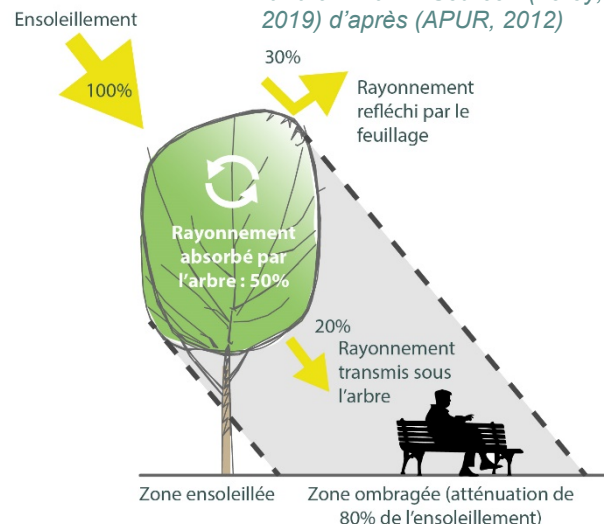


Figure 5 : Effet de l'arbre sur les rayonnements solaires - Source : (Leroy, 2019) d'après (APUR, 2012)

La « rue canyon » obtenue par la morphologie urbaine, est un bon exemple de piège radiatif qui peut être atténué par la végétation. On considère dans cet exemple que les toitures végétalisées n'ont pas de conséquence directe avec la rue. En revanche, les façades végétales, les surfaces enherbées et les arbres (Figure 6) limitent directement les rayonnements infrarouges et solaires émis (Pommier et al., 2014). Chaque dispositif présente des avantages et des contraintes, et leur diversité permet de répondre aux enjeux des îlots de chaleur (annexe 2).

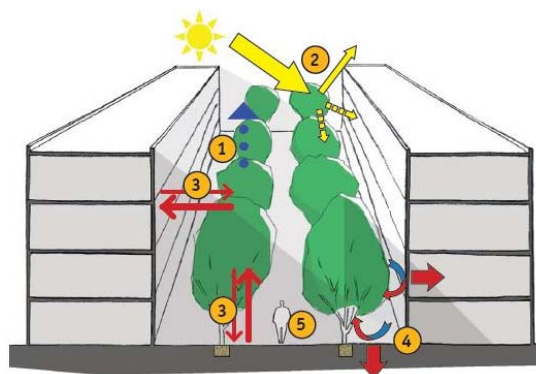
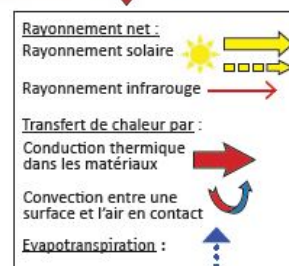


Figure 6 : Influence des arbres d'alignement dans la "rue canyon" – Source : (Pommier et al., 2014)



Le sol joue un rôle pour augmenter la fraîcheur en ville. En effet, sols perméables facilitent l'infiltration de l'eau et sont également source d'évapotranspiration. Ils sont indispensables à l'implantation des strates végétales et par ce biais, réduisent l'imperméabilisation des sols.

Aujourd'hui, des solutions sont connues pour lutter contre les ICU : usage de l'eau, emploi de la végétation, modification de revêtement, et diminution des consommations du territoire. Malgré tout, l'hétérogénéité de la morphologie des villes forme une diversité d'îlots de chaleur pour lesquels chacune doit trouver des solutions. La réduction des surfaces imperméabilisées et l'augmentation des surfaces végétalisées, sous différentes formes (verticale, horizontale, ...) auxquelles l'arbre fait partie, sont des solutions prometteuses pour une régulation thermique.

### 1.2.2 Gérer les eaux pluviales

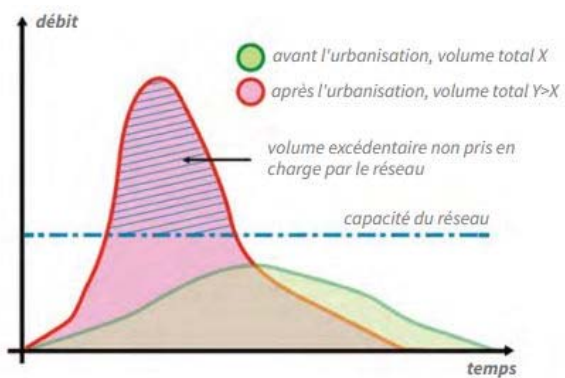
L'extension urbaine et l'artificialisation des sols qui vont de pair perturbent le phénomène d'infiltration de l'eau dans le sol. Dans le milieu naturel, l'eau qui provient des pluies possède plusieurs façons de s'évacuer. La première partie des volumes d'eau reste en surface ou dans les couches superficielles du sol pour être ensuite évaporée et évapotranspirée dans l'atmosphère. Une deuxième partie s'infiltré en profondeur jusqu'à rejoindre les nappes phréatiques. Enfin, la troisième, rejoint les eaux de surface par le ruissellement. Au sein de l'aire urbaine, la fonctionnalité d'infiltration de l'eau par les sols est très peu significative. Leur surface a été modifiée et imperméabilisée afin d'y installer les bâtiments, les voies de circulations, et l'aménagement urbain. Pour ce qui est des sous-sols proches de la surface, leurs fonctionnalités ont également évolué. Désormais ils sont transformés afin d'améliorer la portance et permettent de stocker des réseaux que l'on ne souhaite pas voir en surface. De par l'artificialisation des sols, le ruissellement de l'eau augmente à la surface induisant de nombreuses problématiques (Pommier et al., 2014) :

- Une augmentation des volumes d'eau collectés et de la vitesse d'écoulement.
- Une diminution de l'infiltration et un assèchement des sols.
- Une concentration des polluants du milieu urbain dans les eaux, représentant un risque pour les milieux naturels.
- Les inondations urbaines sont souvent le résultat final lors de gros épisodes orageux.



Elles dépendent de nombreux facteurs naturels (caractéristiques des pluies) mais sont aggravées par l'activité humaine (Figure 7) (ADEME, 2017). « En France, les inondations constituent le premier risque naturel. 16 000 communes sont concernées et les dégâts causés représentent 250M€/an » (ADEME, 2017).

La stratégie élaborée dans la gestion classique des eaux pluviales nommée « tout tuyau » (ADEME, 2017), consiste à collecter l'ensemble des eaux tombées sur les surfaces imperméables puis de les envoyer dans un système de réseau en souterrain, tout ça le plus rapidement possible. Ce système demande une infrastructure importante et coûteuse. Le problème, surgit lors des gros orages, la quantité d'eau tombée par unité de temps est beaucoup trop importante par rapport au dimensionnement des réseaux. S'ajoute à cela, une vitesse d'écoulement très rapide sur les surfaces imperméabilisées. Les collecteurs se retrouvent vite « engorgés » et une inondation est provoquée. La stratégie alternative se base sur le principe de gestion « à la source » (Pommier et al., 2014). Elle met en place des systèmes qui vont ralentir les flux d'eau, les stockent pendant quelques temps, jusqu'à les infiltrer sur place en favorisant l'évaporation et l'évapotranspiration (Figure 8). De nombreuses solutions végétales contribuent à limiter la part d'eaux pluviales dans le cas d'épisodes orageux (ADEME, 2017) : les surfaces plantées, les toitures végétalisées, les ouvrages végétalisés (noue, tranchée d'infiltration, bassin d'infiltration et de rétention, jardin de pluie).



**En vert**, l'occupation des sols (agriculture, forêt, naturelle) a un effet tampon sur l'écoulement des eaux : les débits progressent lentement. Le réseau d'assainissement ne sature pas.

**En rouge**, les volumes d'eau ruisselée sont supérieurs du fait de l'imperméabilisation des surfaces et l'écoulement de l'eau est accéléré. Les capacités d'insertion dans le réseau sont dépassées et les eaux ruissellent dans la ville située en aval du bassin versant, pouvant provoquer une inondation urbaine

Figure 7 : Influence de l'urbanisation sur l'évolution des débits arrivant à l'exutoire d'un bassin versant, suite au ruissellement des eaux après un évènement pluvieux - Source : (CERPRI, 2014)

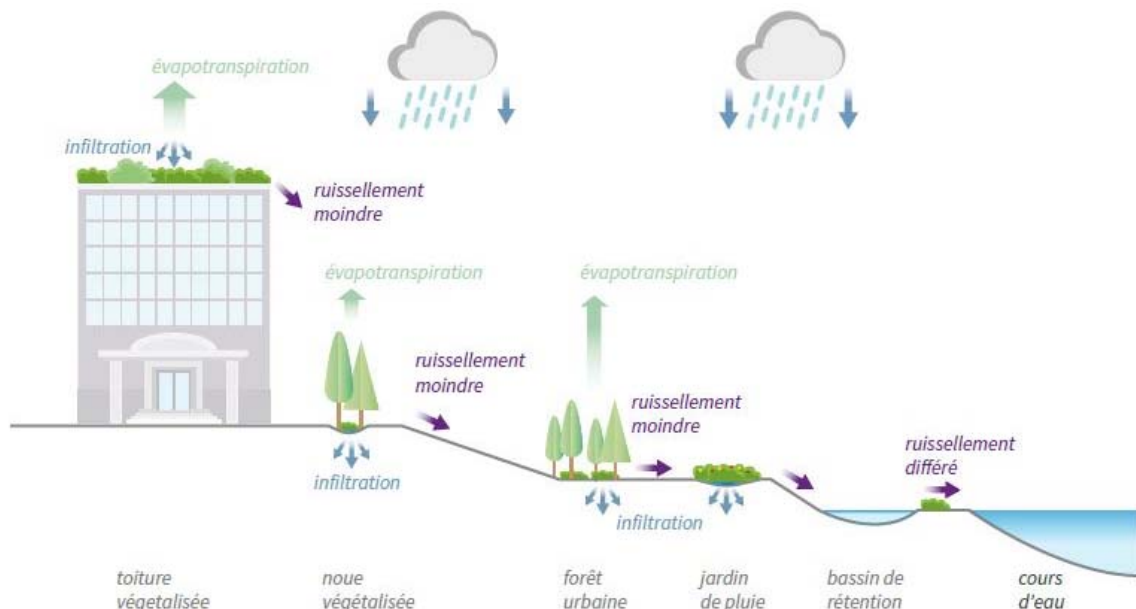


Figure 8 : L'apport des différents éléments végétalisés urbains à la gestion des eaux de ruissellement urbaines - Source : (ADEME, 2017)

« À Burnsville (États-Unis, MN), des jardins de pluie expérimentaux ont été aménagés dans un quartier résidentiel afin de comparer l'impact du ruissellement avec un quartier similaire sans jardin pluvial. Le volume des eaux de ruissellement du quartier qui abritait les jardins de pluie s'est avéré de 90 % inférieur à celui de l'autre quartier. » (ADEME, 2017).

D'autres options permettent également de limiter les volumes d'eau à collecter et à évacuer via les réseaux. En effet, le concept des trames brunes, s'inscrit également dans le principe de collecte « à la source ». Comme le principe des trames vertes et bleues, la trame brune se constitue comme un réseau formé de continuités écologiques pour le domaine des sols. Elle permet dans un premier temps de créer des corridors écologiques pour la faune édaphique mais elle peut également jouer un rôle dans la gestion des eaux en augmentant la surface de sol perméable en milieu urbain.

Par conséquent, les aménagements végétalisés remplissent un rôle majeur dans la gestion des eaux pluviales, ils sont directement intégrés dans le paysage urbain et augmentent la part de végétalisation en ville. De ce fait, ces espaces remplissent également un rôle dans la climatisation de celle-ci, dans le développement de la biodiversité urbaine et dans l'amélioration du cadre de vie.

### 1.2.3 Améliorer le cadre de vie et la santé des citoyens

« La santé est un état de complet bien-être physique, mental et social, et ne consiste pas seulement en une absence de maladie ou d'infirmité » [9]. L'Organisation Mondiale de la Santé décrit par cette définition, une santé qui englobe totalement l'état physique et mental de l'être humain lui permettant d'évoluer au cours de sa vie. L'environnement dans lequel l'humain interagit va sensiblement affecter son état de santé et de bien-être, de manière négative comme de manière positive. La santé publique agit de façon à « prévenir des maladies, de prolonger la vie et d'améliorer la santé physique et mentale à un individuel et collectif » [7].

Chaque jour des personnes rejoignent les villes, elles laissent entrevoir une future humanité totalement urbanisée. Le taux de population mondiale au sein de celles-ci, a franchi la barre des 50% (Véron, 2007), et atteint même 80% en France [10]. Alors que ce taux ne cesse d'augmenter sur le territoire national et à l'étranger, une mauvaise réputation précède les cités. Elles sont décrites comme stressantes, surpeuplées, hyper-bruyantes, polluées et ne facilitant pas les rapports humains. Pour pallier cela il est nécessaire de concevoir un environnement et des aménagements urbains favorables au bon développement de l'être humain. Le végétal via les espaces verts et les aménagements végétalisés semble être un levier d'action pour améliorer la qualité du cadre de vie au cœur des aires urbaines (Plante & Cité, 2016). De nombreuses études ont montré que le végétal en ville apporte des bienfaits à la population. Il va répondre à des enjeux sociaux, écologiques et économiques tout en rendant des services gratuits aux individus et à l'économie.(Provendier, Laïlle, 2013).

#### - Les bienfaits sur la santé humaine

« L'accès aux espaces verts et à la nature en ville contribuent directement à la santé publique en réduisant le stress, en favorisant l'activité physique, en améliorant le cadre de vie et l'état de santé ressenti. » (Provendier, Laïlle, 2013). En effet, l'accessibilité à des espaces verts tels que les parcs est bénéfique pour la santé physique, elle augmente la pratique d'une activité physique (marche à pied, course, vélo) (Kaczynski, Henderson, 2007). Elle est d'autant plus renforcée lorsque la réflexion sur la mobilité (connexions avec le tissu urbain), et sur les équipements est poussée (Provendier, Laïlle, 2013). Une activité physique peut dans certains cas limiter les situations de surpoids et d'obésité. La santé mentale est également directement impactée, puisque la fréquentation des espaces verts affecte l'humeur et le stress des individus. D'autres effets sont détectés et agissent de manière indirecte sur les individus. Effectivement, le végétal contribue à l'atténuation du bruit, à un confort thermique, et influe sur la qualité de l'air. Il contribue aussi au renforcement du lien social et présente une réelle opportunité récréative pour

la population citadine. Certes ces effets indirects sont moins avérés par des études précises mais restent dans le champ du possible. (Provendier, Laille, 2013)

- Les bienfaits sur l'environnement et sur la biodiversité

Au début de la croissance des aires urbaines, la biodiversité ne faisait pas partie du discours au cœur des politiques de développement. Et pourtant, depuis quelques années, elle s'est peu à peu fait sa place pour devenir un enjeu majeur dans les stratégies de développement de la ville. Ces stratégies se traduisent par l'écologie urbaine, les trames vertes et bleues. Plusieurs études ont montré que ces aires étaient en capacité d'accueillir une biodiversité riche et variée et que par exemple, les parcs représentaient des maillons importants de la biodiversité urbaine (Cornelis, Hermit, 2004). L'étude sur les trames vertes en ville, menée par l'Agence Nationale de la Recherche (ANR) a permis de démontrer deux choses : le fonctionnement des corridors en ville et la nécessaire prise en compte des espaces privés dans la politique de trames vertes (Provendier, Laille, 2013).

- Les bienfaits sur l'économie

En milieu urbain, la valeur économique peut être abordée via les valeurs foncières mais peut varier du centre urbain aux zones périurbaines. Il est avéré que « si un acheteur accorde de la valeur à un espace vert, il sera prêt à payer plus cher un logement plus proche de ce dernier (toutes autres caractéristiques égales par ailleurs) » (Laille et al., 2013). Les espaces verts en ville entraînent des plus-values foncières et immobilières dans un premier temps par leur proximité avec le logement (Crompton, 2001) que ce soit une maison ou un appartement. Dans un second temps, la vue sur le paysage et sur du végétal constitue également une plus-value (Luttik, 2000). La présence de végétal au sein de l'aire urbaine peut également jouer un rôle sur l'attractivité de la ville pour les habitants et les visiteurs. Elle renvoie une image de qualité de cadre de vie et un soin apporté à l'environnement dont certaines revendiquent dans leurs stratégies touristiques. A titre d'exemple, la ville d'Angers a reçu le premier prix du classement national des « ville verte » attribué par l'UNEP [12].

#### 1.2.4 Les autres enjeux

D'autres enjeux pèsent sur les villes. Le choix ici a été de les citer, de les commenter sans rentrer dans détails dans ce manuscrit. Différentes raisons expliquent ce choix. Certains enjeux n'ont pas la même dimension que les éléments cités précédemment. Ils n'ont pas le même degré de prise en compte actuel par les politiques publiques même si cela tend à évoluer rapidement. Ensuite, une autre raison est expliquée par le manque d'étude et de retours scientifiques dans certains domaines. Enfin, malgré les impacts positifs que peut avoir la végétation sur ces enjeux, la dimension de l'étude ne permet pas de s'étendre et de rester synthétique. La ville fait face à beaucoup de nuisances néfastes pour l'environnement mais aussi pour les populations citadines. Nombre de ces enjeux sont liés à des pollutions qui se déclinent sous plusieurs natures :

- La pollution atmosphérique et la qualité de l'air
- La pollution des eaux
- La pollution de sols
- La pollution sonore

En définitive, le végétal se distingue comme un levier d'action pour répondre aux enjeux du milieu urbain. La nécessité d'augmenter les surfaces végétalisées est grandissante et doit s'inscrire dans les politiques de planification et dans les projets d'aménagement urbain. En revanche, elle ne doit pas se traduire seulement par une réponse quantitative. Afin d'accueillir le végétal et de pérenniser les espaces, l'aspect qualitatif doit être pris au sérieux et doit être au cœur des

réflexions lors de la conception des espaces. Pour cela, la prise en compte du sol est essentielle. Il est le socle du bon et long développement des strates végétales en ville.

### 1.3 Arbre en ville, le défi des sols fertiles

#### 1.3.1 Etat des lieux des sols en ville

Les civilisations ont utilisé les sols comme structure portante pour bâtir leurs cités. L'urbanisation a peu à peu grignoté les terrains agricoles au profit de la ville, et procédé à l'artificialisation et l'imperméabilisation de ceux-ci. Ce problème majeur dans la protection des sols par les politiques de planification sera détaillé ultérieurement dans le manuscrit. La croissance démographique et économique ne cessant de croître, le besoin accru d'espaces et de sols pour supporter les activités humaines suit le même engouement. Les sols en ville sont ainsi porteurs de nombreuses structures tels que les bâtiments, les réseaux routiers et ferroviaires, les zones industrielles et commerciales, et les espaces verts (Gis Sol, 2011).

Afin de supporter au mieux l'ensemble de ces éléments, les sols subissent de nombreuses transformations et remaniements : fabrication, scellement, compactage, imperméabilisation, reconstitution, confinement, etc. Ils peuvent être impactés par les usages passés et exercés sur le site. Les activités industrielles et de service comme l'artisanat en sont des exemples. Les sols urbains se caractérisent par une palette très hétérogène présentant des variations (physiques, chimiques et biologiques) verticales et latérales ainsi que des discontinuités. Ces variations sont dues à des apports de matériaux divers sur un espace temporel long. Ils sont le résultat des modifications anthropiques et ses caractéristiques dépendent du degré de modification qu'a fait subir l'Homme à l'aire urbaine.

Ils sont constitués de plusieurs matériaux : matériaux de construction (craie, argile, béton, graviers...), matériaux industriels et artisanaux (fer, charbon, acier, ...), déchets et ordures (déchets ménagers, boues, ...). Ils permettent de constituer différents types de sol (Rossignol, 2015) :

- Sols sur matériaux polycycliques et anciens : entassement de plusieurs matériaux depuis les origines de la ville
- Sols sur terre-pleins : sol récent, mélange de matériaux terreux et d'éléments grossiers (pierre ou gravier)
- Sols des chaussées et trottoirs : terre-pleins caillouteux et compactés, présentant souvent une couche de surface imperméable
- Sols des tranchées et réseaux : mélange de matériaux remués pendant l'installation des canalisations

Les sols des centres urbains présentent des caractéristiques physiques modifiées par rapport aux sols naturels. En effet, leur compacité très élevée est liée au passage des piétons et des véhicules. Elle influence directement la perméabilité et l'aération de ceux-ci qui tendent à être très faible en ville (Rossignol, 2015). La compaction des sols est souvent liée à la surcharge des infrastructures et provoque la diminution de la porosité des sols. Ils s'asphyxient limitant ainsi l'enracinement des végétaux et perturbant le développement de la faune édaphique. Ces capacités d'infiltration sont également mises en péril favorisant ainsi le ruissellement des eaux. Les sols en ville présentent des masses volumiques synonymes de compactations et dont les valeurs se situent entre 0,5 t.m-3 jusqu'à 2 t.m-3. A partir de 1,5 t.m-3 les racines ont du mal à avancer et à explorer le sol (Damas, Coulon, 2016). Globalement, ces sols ont de grands déficits et manquent de stabilité. La structure des sols est dégradée au niveau pédologique et présente des difficultés d'agrégation des particules. Les éléments grossiers d'origine naturelle ou

anthropique sont présents en quantité et peuvent contenir de fortes valeurs en polluant (El Khalil et al., 2012)

Ensuite, au niveau chimique, les sols font face à des problèmes de fertilité. En effet, ils ont un déficit en éléments majeurs tels que l'azote (N), le phosphore (P) et de potassium (K). Le pH est basique souvent situé entre 7 et 8 et parfois 9 (Rossignol, 2015). Plusieurs types de pollution peuvent impacter les sols en ville : pollutions industrielles (hydrocarbures et métaux lourds), les remblais et les terres d'apport de mauvaise qualité, les pollutions atmosphériques (liées aux industries et transports), certaines pratiques d'épandage (amendement, produits phytosanitaires), utilisation d'eaux contaminées (Besnard et al., 2017)

### 1.3.2 Définition et emploi de la terre végétale dans les projets d'aménagements urbains

Le sol représente une infime épaisseur qui lie et connecte l'atmosphère, la biosphère, l'hydrosphère et la lithosphère entre elles. Cet épiderme de notre planète Terre, est défini par les pédologues et les agronomes comme une couche superficielle des surfaces continentales, qui s'est formée par l'altération de la roche sous-jacente sous l'action du climat et des organismes vivants (Gis Sol, 2011). La pédogenèse est l'ensemble des processus responsables de la création de plusieurs strates dans le sol à savoir : l'altération de la roche mère, l'incorporation et l'évolution des matières organiques, et enfin les mouvements et accumulations de matière intervenant à différents états (soluble, pseudo-soluble, solide) (Duchauffour, 1983). Le socle est composé de plusieurs horizons débutant par la roche mère et se terminant par une couche de terre arable. Cette dernière représente un élément primordial pour l'écosystème terrestre en étant combinée à de la matières organiques et minérales, abritant de nombreux être vivants (microorganismes, champignons, vers, etc.) en partie responsables de sa formation (UNEP, 2012). Ce dernier horizon est communément appelé « terre végétale ».

Cette terre est le matériau de base pour la reconstruction des sols. Il est constitué le plus souvent de l'horizon labouré (horizon L) et des horizons de surfaces (annexe 3), provenant des couches arables des terres agricoles (Baize, Girard, 2008). La terre est issue des grands terrassements de sites industriels, d'aménagements routiers et autoroutiers ou encore de constructions immobilières. Elle est prélevée par décapage sur une profondeur de 20 à 30 cm. Lors du décapage et du stockage, plusieurs horizons peuvent se mélanger entre eux provoquant ainsi des évolutions pédogénétiques (Baize, Girard, 2008). Le matériau en provenance de ces grands projets d'aménagement va par la suite être mélangé à des composts, ou autres amendements afin d'être réemployé dans des projets d'aménagements paysagers (UNEP, 2012). Cette composition permet d'assurer des fonctions classiques pour la végétation, à savoir, l'ancrage des arbres et leur enracinement, puis l'alimentation hydrique et minérale.

La terre végétale est donc une ressource indispensable aux paysagistes concepteurs puisqu'elle leur permet de réutiliser un sol viable pour le développement d'une quelconque végétation dans le cadre d'un projet d'aménagement urbain. En effet, la ville, par son anthropisation démesurée, ne possède actuellement que très peu de sols encore fertiles. Le décapage du sol en place et l'emploi d'une nouvelle terre rapportée est la pratique la plus courante sur les projets d'aménagements. Ce processus permet de remplacer un sol peu fertile par un sol ayant une composition idéale pour le développement de végétation. C'est pourquoi, l'emploi des terres végétales va permettre à la maîtrise d'œuvre de contrôler les facteurs pédologiques du sol et ainsi leur apporter une sérénité quant à la reprise des végétaux installés sur le site.

Cependant, la première étape est de se demander si les sols *in situ* peuvent être valorisés avant de rapporter des matériaux provenant de l'extérieur (Figure 9). En effet, le diagnostic des sols en place doit être réalisé dans le but de connaître les qualités fertiles du sol sous trois composantes : physique, chimique et biologique. Il définira par la suite l'organisation et la planification du projet, les éléments paysagers telles que les voies de circulation. Les plantations pourront être orientées en fonction du sol. Les analyses permettront de déterminer si les sols pourront être conservés ou non et quels types d'améliorations (structure, amendement, drainage, etc.) pourront être envisagées (UNEP, 2012).

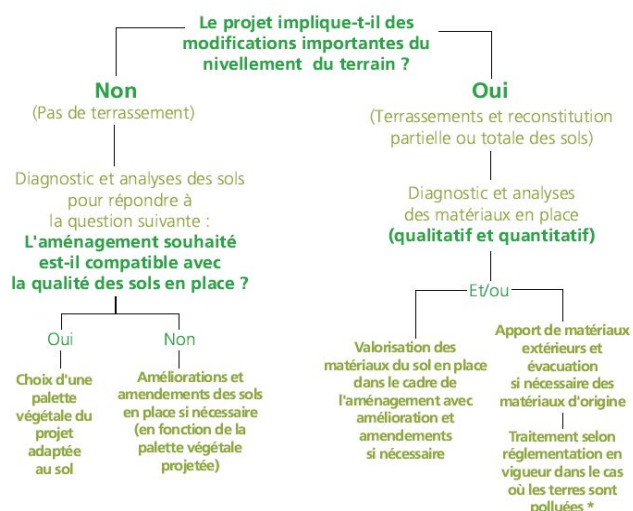


Figure 9 : Arbre de décision - Source : (UNEP, 2012)

Depuis son site d'extraction jusqu'à sa mise en place pour les plantations la terre subit de nombreuses sollicitations qui peuvent être à l'origine de dégradations de propriétés intrinsèques. Plusieurs opérations se déclinent les unes après les autres : décapage, mis en andain, stockage, transport et épandage. Le compactage et la prise de masse sont des exemples de détériorations pouvant être relevées lorsque les techniques professionnelles ne sont pas respectées méticuleusement (UNEP, 2012).

Une évaluation menée par Plante & Cité (Damas, Coulon, 2016) a permis de déterminer à partir de ratios un ordre de grandeur sur les quantités de terres végétales employées en France pour l'aménagement d'espaces verts publics. Le volume annuel estimé pour la France métropolitaine est évalué à 3 millions de mètres cubes (soit 4,5 millions de tonnes). Ils correspondent également à une surface de 1 000 hectares décapés tous les ans (Damas, Coulon, 2016).

### 1.3.3 Prise de conscience des enjeux des sols urbains dans la planification territoriale

Le sol est aujourd'hui un maillon indispensable au développement des civilisations. Il est au cœur des grands enjeux planétaires de notre époque tels que la sécurité alimentaire, le changement climatique et le maintien de la biodiversité (Gis Sol, 2011). Pourtant l'étalement urbain est l'élément qui, aujourd'hui menace les sols et constitue un sujet d'actualité tant sur le plan européen que français. Il se traduit par le « mitage » de l'urbain sur le territoire rural et donc par une artificialisation des sols qui est responsable de lourds impacts sur l'environnement, le paysage et l'organisation du territoire.

Ce processus émerge dans les années 70, par l'évolution de la société avec l'apparition de l'automobile et l'amélioration de la qualité de vie. Le courant hygiéniste est un levier qui permet de passer de politiques de rationalisation du territoire à des politiques de dé-densification (Laugier, 2012). Ce changement de stratégie a permis à la ville de s'affranchir des grands ensembles au profit de l'habitat individuel. Apparaît alors, une prolifération des maisons individuelles, la formation de grandes couronnes urbaines, puis périurbaines construites autour d'un cœur de ville qui se vide peu à peu. Le rythme de l'expansion des terres artificialisées est plus rapide que celui de la croissance démographique, la surface consommée par habitant s'accroît donc. L'engouement pour ce mode de développement de la ville se traduit par plusieurs facteurs qui nous sont présentés dans l'annexe 4.

Ce phénomène d'étalement urbain représente un problème majeur aujourd'hui puisqu'il est responsable d'une consommation d'espace au profit de l'espace urbain et au détriment des espaces naturels et agricoles. En France, la surface agricole utile s'est vue amputée d'environ 15% entre 1960 et 2009, passant de 34 à 29 millions d'hectares (Laugier, 2012). Selon les bases du ministère de l'Agriculture, l'artificialisation entre 2006 et 2009 représenterait la surface d'un département français tous les 7 ans (Laugier, 2012).

Par conséquent, on constate que l'étalement nuit à la dynamisation économique des centres-villes et à la préservation des espaces périphériques tout en fragilisant également l'économie agricole. Il génère des zones en sous-densité, qui produisent des coûts économiques et environnementaux.

Face aux expansions spatiales des aires urbaines, les politiques de l'aménagement du territoire recommandent de concentrer et de densifier le tissu. La finalité réside dans la protection des espaces naturels et agricoles menacés tout en optimisant et articulant l'habitat, les transports publics et les réseaux divers (électricité, gaz, assainissement) [8]. L'adoption de la loi Alur du 24 Mars 1994 permet aux documents de planification et d'urbanisme tels que le SCoT et le PLU d'atteindre cette finalité (Anne Blanchart, 2018). Ces deux documents ont un objectif commun mais ils agissent à une échelle différente. L'objectif tend à reconstruire la ville sur elle-même en la rendant plus dense et cela se traduit par :

- Une réflexion sur des formes architecturales du bâti et la morphologie du tissu urbain en permettant de maximiser la densité sur une emprise au sol la plus faible possible (annexe 5). Le travail peut se faire via différentes méthodes de renouvellement urbain : réhabilitation, restauration, restructuration et rénovation (Mercier, 2016).
- Un comblement des dents creuses, par un rehaussement des bâtiments déjà présents, ou encore en construisant sur une parcelle vierge entre deux immeubles (annexe 5) (Anne Blanchart, 2018).

Les pouvoirs publics appellent via la loi Alur de 2014, à la construction d'espaces plus densément peuplés et déjà urbanisés (Figure 10), au réaménagement des friches urbaines, à la dépollution de friches industrielles et par conséquent à la protection des espaces agricoles (Anne Blanchart, 2018). Certes, il peut encore arriver que l'urbanisation de sols ait lieu, cependant elle se fait de manière plus réfléchie et respecte un nombre de conditions liées à la protection de l'environnement.

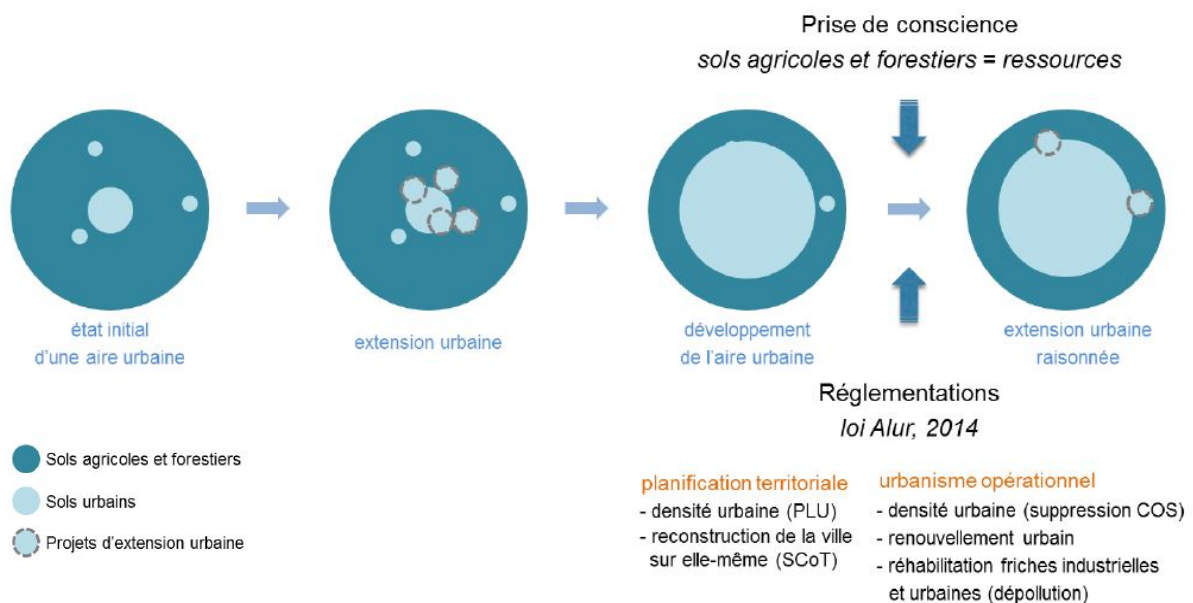


Figure 10 : Présentation des enjeux de la protection des sols naturels et leur traduction dans la planification territoriale - Source : (Blanchard, 2018)

### 1.3.4 La réglementation pour une protection des sols

Face à la menace pesante sur les sols naturels et agricoles, les pouvoirs publics ont mis en place diverses réglementations visant à leur protection. Au niveau mondial et européen, des actions apparaissent très tôt dans l'histoire. En 1972, une charte européenne des sols est établie et vise à protéger le sol contre l'érosion, la contamination et l'urbanisation. Elle définissait le sol comme « un bien précieux pour l'humanité et qui se détruit facilement » et le distinguait comme une ressource et comme un milieu vivant et dynamique. La charte encourageait les états membres à créer des politiques de conservation des sols (MEDDLE, MAAF, 2015). La charte mondiale est adoptée le 26 Novembre 1981 sous l'autorité de la FAO. Elle définit le sol comme une ressource limitée et finie qui est qualifié comme « l'un des bien les plus précieux de l'humanité » (MEDDLE, MAAF, 2015).

La majorité des écrits sont des textes d'intention appelés « soft law », qui ne présentent pas de caractère d'obligation juridique (Anne Blanchart, 2018). A titre de comparaison avec l'eau et l'air, le sol ne bénéficie pas d'un statut juridique conçu pour sa protection (Desrousseaux, 2015). « L'eau est une ressource qui coule et bouge et qui est directement consommée, à l'instar de l'air » (Anne Blanchart, 2018). L'eau et l'air ont un impact direct sur la santé humaine à contrario du sol qui procure un impact indirect, bien qu'il ait un rapport avec la qualité de l'eau et de la nourriture. Cet élément de différence justifie la différenciation juridique qui a été faite par les pouvoirs publics.

Cependant, depuis les années 2000, les politiques commencent à évoluer en Europe, mais de manière segmentée. En effet, on peut constater que des pays comme la Pologne, la Slovaquie, et l'Allemagne ont mis en place des politiques pour limiter et réduire la consommation des sols sur leur territoire (Anne Blanchart, 2018). Plusieurs outils peuvent être utilisés pour protéger les sols, certains pays passent par des instruments juridiques (Autriche), économiques (Belgique, Lettonie) et incitatifs (Finlande, Pays-Bas) et d'autres mettent en place une stratégie nationale sur les sols (Angleterre, Ecosse, Suisse) qui peut-être, dans certains cas, inscrit dans la Constitution (Anne Blanchart, 2018).

En 2002, une communication de la Commission européenne nommée « Vers une stratégie thématique pour la protection des sols » (COM, 2002) permet une reconnaissance politique de l'enjeu des sols. La consultation des intéressés a permis de produire des rapports sur l'état des sols en Europe et des recommandations pour prévenir et restaurer leurs dégradations (MEDDLE, MAAF, 2015). Ce travail a abouti le 22 Septembre 2006 à la publication d'une communication de la Commission européenne intitulée « Stratégie thématique en faveur de la protection des sols » (COM, 2006a) mais également à une proposition de Directive cadre sur les sols le 30 décembre 2006 (COM, 2006b). Selon les propos de la commissaire à l'environnement, il s'agissait de « placer désormais la protection des sols au même rang que la protection de l'eau et de l'air » (MEDDLE, MAAF, 2015). Grâce à cette directive, les États membres devaient sur la base de critères définis dans la proposition, définir des zones pour lesquelles il existait des enjeux liés aux sols (érosion, diminution des teneurs en matières organiques, tassement, et dégradation). Par la suite, ils devaient fixer des objectifs pour réduire les risques, et l'imperméabilisation du sol. Enfin un inventaire des sites pollués et des sites sur lesquels certaines activités avaient eu lieu dans le passé (décharges, aéroports, ports, sites militaires, etc.) devait être dressé dans un délai de 5 ans (MEDDLE, MAAF, 2015). « Adopté en première lecture par le Parlement européen en novembre 2007, le projet de directive-cadre a été bloqué par le Conseil environnement du 20 décembre 2007, avec un vote négatif de quatre pays (Allemagne, Autriche, Grande-Bretagne, Pays-Bas) et une abstention de la France. » (MEDDLE, MAAF, 2015).

Sur le plan national, malgré une prise de conscience de l'intérêt que l'on doit accorder au sol, les textes législatifs évoluent très peu comparés à certains pays européens. Le texte de la loi sur la



biodiversité de 2016 « mentionne les sols parmi les éléments de l'environnement constitutifs du patrimoine commun de la nation, dont la protection et la restauration sont reconnues d'intérêt général par l'article L. 110-1 du code de l'environnement » [3]. En France, trop peu de lois agissent directement sur la protection des sols. Cependant c'est via la densification du tissu urbain qu'elles contribuent à la protection des sols en périphérie des villes. Parmi ces lois nous retrouvons : Loi MOLLE ou loi Boutin du 25 Mars 2009, la loi Grenelle 2 du 12 Juillet 2010 et enfin la loi ALUR du 24 Mars 2014 (LEGIFRANCE, n.d).

### 1.3.5 Les freins à l'utilisation de la terre végétale dans les projets urbains

La terre végétale qui était perçue il y a quelques années comme une norme d'emploi dans les chantiers de plantation est désormais considérée comme une ressource dont il faut optimiser les utilisations, et limiter le gaspillage. Les acteurs des projets urbains sont confrontés à plusieurs enjeux limitant ainsi l'emploi de terres végétales dans leurs projets.

Durant un projet d'extension urbaine, un volume de terre végétale est généré pouvant être réutilisé pour d'autres aménagements. Ces stocks de terre sont dans la plupart des cas issus des nouveaux projets de construction d'habitations, de bâtiments ou encore de voies de communication (Anne Blanchard, 2018). Les acteurs de l'urbanisme développent des stratégies pour conserver et réemployer la ressource terre végétale dans d'autres projets d'aménagement urbain dans le but de répondre à des enjeux de développement de végétation en ville (Figure 11). Ainsi, ces terres sont réemployées pour la création d'espaces végétalisés, de jardins partagés, et d'autres espaces dont la nécessité est d'avoir un sol sain pour le bon développement du végétal. Dans le cadre de projets d'aménagement sur d'anciennes friches industrielles dont les sols sont pollués, ces stocks permettent de remplacer en partie les terres du site. Cette stratégie de réutilisation des terres végétales s'intègre dans les phases amont du projet et permet aux acteurs de l'urbanisme de s'intéresser aux caractères pédologiques du sol.



Figure 11 : Evolution de l'utilisation des sols naturels en réutilisant des sols urbains sur site de projet - Source : (Blanchard, 2018)

Malgré ces provisions, la terre végétale vient à manquer pour les futurs aménagements. Le changement de politique d'urbanisation a permis de passer de l'étalement urbain des années 70 à la réduction de l'extension urbaine en encourageant la reconstruction de la ville sur la ville tout en permettant la protection des sols naturels et agricoles. L'ancienne politique d'urbanisation, a conduit à une raréfaction de la disponibilité en terre végétale utile aux projets urbains. En effet, l'offre de cette ressource a considérablement diminuée tandis que la demande ne cesse d'augmenter. Le marché des projets d'aménagement sont désormais tournés vers la rénovation urbaine, ce qui n'inverse pas la courbe de la demande en terre végétale (Anne Blanchard, 2018).

Le respect du développement durable est également un autre facteur sensiblement responsable de la réduction de l'emploi de terre végétale dans les projets urbains. C'est un élément qui est désormais pris en compte par les acteurs politiques de planification et d'urbanisation. L'emploi

des terres dans un aménagement doit donc être limité et optimisé et les externalités qui gravitent autour de lui doivent être considérées. En effet, lorsque la terre végétale n'est pas disponible au sein du noyau urbain, son acheminement va tout d'abord entraîner des impacts économiques sur les projets mais également des impacts environnementaux à travers le transport (Anne Blanchart, 2018).

Ces éléments imposent aujourd'hui à l'ensemble des acteurs de la filière de l'aménagement de prendre en compte que la terre végétale est désormais une ressource qu'il faut rationaliser et dont il faut raisonner l'emploi. L'élaboration de stratégies qui permettent la réutilisation des terres végétales issues d'urbanisation contrôlée est un premier pas vers la réduction de son utilisation. Par ailleurs, des entretiens avec des acteurs de l'urbanisme ont permis de mettre en lumière qu'une grande partie des sols urbains est réutilisée comme du volume de terre pour du remblai et non pas comme un matériau pour le développement de végétation (Anne Blanchart, 2018). Il est possible d'imaginer que la terre végétale viendra à manquer sérieusement dans un futur proche. La question du support avec lequel, le paysagiste pourra implanter les végétaux de demain, en ville, se pose.

## BILAN

Tandis que la ville doit se végétaliser, pour faire face aux enjeux climatiques et assurer un cadre de vie optimal pour ses habitants, la terre végétale nécessaire aux plantations se raréfie. Le milieu urbain fait donc face à deux problèmes majeurs : une augmentation nécessaire des espaces végétalisés de qualité en ville, puis, une raréfaction de l'outil primaire pour assurer un socle fertile aux plantations dans les aménagements. Ce dernier entraînant des coûts économiques importants dans les projets.

## 2 SOLS URBAINS : DE LA TERRE VEGETALE A LA CONSTRUCTION DE SOL

### 2.1 Création de sols issus de produits du recyclage

#### 2.1.1 Sols urbains et sols anthropisés : éléments de définition

La description et la détermination des sols peut varier selon le point de vue des acteurs de la ville et celui des pédologues (Anne Blanchart, 2018). En effet, les premiers vont orienter leur définition en intégrant une dimension de spatialisation au sol. Ainsi, pour lui l'ensemble des sols situés dans une aire urbaine (Figure 12) sont des sols urbains, ils sont caractérisés par de sévères modifications anthropiques et dont l'appartenance géographique, est celle des villes. Les sols urbains se distinguent par une couverture de sol pouvant être physiques ou biologiques sur la surface des terres émergées (Anne Blanchart, 2018).

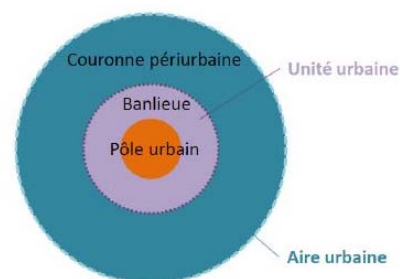


Figure 12 : Les trois espaces à dominante urbaine – Source : (Blanchard, 2018)

Le pédologue propose une autre approche qui vise à déterminer un sol par son origine et sa genèse. Le degré d'anthropisation, caractérisé par la modification et la fabrication du sol par l'Homme, est un facteur déterminant dans la caractérisation des sols (Baize, Girard, 2008). Le

système international de la classification des sols (WRB – World Reference Base for soil resources) définit deux catégories de sols faisant référence à des sols modifiés par les civilisations humaines : les technosols et les anthroposols. Selon la classification internationale, les technosols sont des sols contenant une quantité importante d'artéfacts (c'est-à-dire, un matériau fabriqué, modifié ou amené à la surface par les activités humaines). Leur proportion est supérieure ou égale à 20% dans les 100 premiers centimètres du profil, et sont comblés par un matériau dur (ayant des propriétés différentes d'une roche mère). Ils font référence à une couche imperméable continue en surface (IUSS Working Group WRB, 2015). Les anthroposols sont décrits comme des sols formés et modifiés par les activités humaines telles que l'apport de matériaux, l'irrigation ou encore des pratiques culturelles (IUSS Working Group WRB, 2015). En revanche, la classification française définie par le Référentiel Pédologique Français (RPF) réunit les sols modifiés par les sociétés humaines sous la même dénomination : les anthroposols. Certes les pédologues n'utilisent pas la position géographique pour définir et caractériser les sols. Cependant l'historique d'usage des sols de milieux urbains renseigne sur la couverture pédologique de ces espaces, qui peuvent être considérés comme des technosols ou des anthroposols. Comme dans le RPF l'emploi du terme anthroposol sera préférentiel dans ce manuscrit.

Ensuite, le référentiel pédologique, décline les anthroposols sous plusieurs genres, cela permet ainsi de préciser leurs fonctions et leurs compositions (annexe 6) :

- Les **anthroposols transformés** « sont issus de modifications anthropiques des sols réalisées en zones rurales pour améliorer la fertilité des sols et permettre une production d'aliments suffisante pour nourrir la population et/ou protéger la ressource en sol » (Baize, Girard, 2008).
- Les **anthroposols artificiels** « résultent entièrement d'apports par l'homme de matériaux variés. Ils concernent plus les lieux où se sont développées les activités humaines tels qu'urbanisation, industries, mines, artisanat, voirie. » (Baize, Girard, 2008).
- Les **anthroposols archéologiques** « ont subi des modifications anthropiques anciennes [...]. Des couches contenant plus de 20 % (en volume) de débris d'activités humaines (matériau Zar) peuvent y être observées. » (Baize, Girard, 2008).
- Les **anthroposols reconstitués** et les **anthroposols construits** « sont issus des opérations de « génie pédologique » : actes volontaires de fabrication d'un « sol » avec des objectifs précis, en particulier pour obtenir un milieu aussi fertile que possible dans le cadre d'opérations de végétalisation. » (Baize, Girard, 2008).

Les anthroposols reconstitués et construits présentent les caractéristiques de sols pouvant être employés sur des projets d'aménagement urbain dans l'objectif d'implanter un couvert végétal. Même si les sols reconstitués et les sols construits sont tous deux issus du génie biologique, leur fabrication présente des variations tant bien sur la méthode que sur les matériaux employés. Ils ont un objectif commun qui est l'installation de végétation. Les anthroposols reconstitués, comme définis ultérieurement, sont basés sur des matériaux pédologiques (et aussi géologiques) transportés et remaniés pour être mis en place dans des espaces verts pour des travaux de plantation (Baize, Girard, 2008). Il s'agit du sol communément appelé « terre végétale ». Ils proviennent en grande partie de décapages des couches arables de terrains agricoles accomplis lors d'une extension urbaine. Les anthroposols construits ou sols construits résultent, quant à eux, d'un processus de construction en employant des matériaux technologiques, souvent considérés comme des déchets (brique, boues, béton...) dans le but d'implanter un couvert végétal. Le procédé se base sur un mélange adéquat et contrôlé des matériaux afin d'obtenir des conditions physiques, chimiques, et biologiques optimales pour le développement de la végétation.

### 2.1.2 Une démarche s'inscrivant dans le recyclage et le réemploi

Le recyclage est un procédé industriel simple permettant de transformer des déchets en matière première. Le matériau de base est détruit, la matière ainsi obtenue est utilisée pour produire un nouveau matériau, souvent différent du matériau de départ (Paduart et al., 2015). Par exemple, la déconstruction de bâtiment va générer des gravas concassés. Ce système va seulement s'appliquer à des matériaux qui sont en passe de devenir des déchets pour être finalement réinsérés dans un cycle nouveau (Figure 13). Dans de nombreux cas, des matériaux possédant des qualités structurales ou de revêtement peuvent devenir après le recyclage (concassage, criblage, broyage, ...) un matériau de remplissage pour des travaux de remblais ou de sous-couches de fondation (Rotor et al., 2018). Contrairement au recyclage, le réemploi favorise une réutilisation des matériaux pour un usage identique à celui pour lequel ils ont été conçus. A titre d'exemple, des pavés peuvent être déchaussés de leur structure, nettoyés puis réutilisés dans un autre projet.

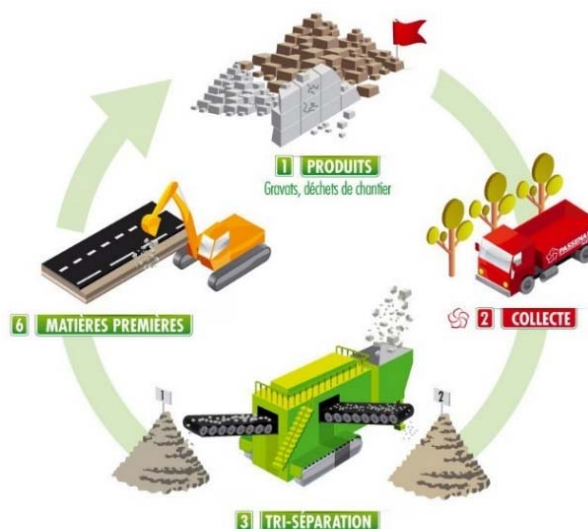


Figure 13 : Schéma du cycle circulaire du recyclage des matériaux de construction – Source : (Monacoparc, n.d)

Parallèlement aux recours en terre végétale pour alimenter les projets urbains, des exports de matériaux issus de l'activité de la ville ou de sa déconstruction sortent de la ville. Une majorité de ces exports n'est actuellement pas valorisée et est envoyée vers des centres de stockage de déchets (Damas, Coulon, 2016). Un contresens surgit lorsque l'on pointe du doigt la mobilité des matériaux. Le recyclage et le réemploi s'imbriquent dans une démarche durable globale de valorisation des déchets. Ils doivent également permettre de réaliser des économies de ressources et de limiter les impacts environnementaux transversaux (Damas, Coulon, 2016).

Le processus de construction d'un sol repose sur l'utilisation de nombreux sous-produits mélangés, afin de créer un ensemble comportant des performances et un niveau de fonctionnalités aussi élevé qu'un sol originel. Les matériaux sont d'origines organiques (déchets verts, composts, boues, ...) et minérales (matériaux de déconstruction, ballast, ...) (Damas, Coulon, 2016). Utiliser les processus de recyclage et de réemploi est une manière pour la construction de sol de créer de la matière première. Le Catalogue européen des déchets (CED) est une nomenclature exhaustive qui intègre tous les matériaux existants, délaissés par un quelconque usage et par conséquent classés comme déchets. Cette base, régulièrement mise à jour, représente une mine d'or de matières premières pour construire des sols (Damas, Coulon, 2016).

De nombreux domaines d'activité valorisent désormais des matériaux catalogués comme déchets. C'est notamment le cas pour les infrastructures routières qui essaient de valoriser par exemple les terres excavées sous forme de remblais, d'assises de chaussées et de couche de forme (Blanc et al., 2012). Les matériaux de démolition dans le domaine du bâtiment sont également réemployés pour former des gravas utiles à la formation de couches de forme. Les sédiments de dragage ont fait l'objet d'étude de valorisation pour notamment la création de ciments (Bataillard et al., 2017).

### 2.1.3 Les services écosystémiques rendus par ces sols

Bien que les sols en milieu urbain soient fortement impactés par les activités des populations humaines, ils sont capables d'apporter des services écosystémiques essentiels pour le développement des sociétés humaines. « Les services écosystémiques sont définis comme étant les biens et services que les hommes peuvent tirer des écosystèmes, directement ou indirectement, pour assurer leur bien-être (nourriture, qualité de l'eau, paysages). » [11]. Par leurs interactions entre les éléments biotiques et abiotiques, les sols ont la capacité d'assurer ces services. Les mélanges innovants de la construction de sol remplissent de nombreuses fonctions liées à leur rôle. La question se pose s'ils sont capables, tout comme les sols naturels et urbains de produire des services favorables au fonctionnement de l'écosystème (Damas, Coulon, 2016).

De ce fait, le programme ADEME-SITERRE a présenté une évaluation semi-quantitative afin d'évaluer les services potentiels rendus par les sols construits. Elle s'appuie sur une comparaison entre des sols issus de techniques traditionnelles de mise en place et ceux issus des techniques alternatives basées sur l'emploi de mélanges de sous-produits (Damas, Coulon, 2016). Le tableau en annexe 7 illustre les résultats basés sur la liste des 24 services écosystémiques recommandés par the Economics of Ecosystems & Biodiversity. Les résultats ne montrent pas de différences significatives entre les deux techniques. « Les sols construits peuvent remplir les mêmes fonctions que la terre végétale et le mélange terre-pierre initial. Les sols construits semblent offrir de meilleures performances pour certains services comme la régulation du climat global. » (Damas, Coulon, 2016). Toutefois des lacunes persistent dans la purification de l'eau, la constitution d'un réservoir de biodiversité et enfin, dans l'évaluation complète du support de voirie. Le manque de recul sur le long terme et le manque d'études approfondies se font sentir pour évaluer correctement chacun des critères. Il est évident que l'emploi de déchets pour la construction de ces sols est une force majeure pour le recyclage et le traitement des déchets.

### 2.1.4 Capacité des sols à assurer leurs rôles

Les sols naturels remplissent des fonctionnalités essentielles à leur vie mais sont également indispensables pour la survie de nombreux milieux associés. Ces rôles doivent également être remplis par les sols construits. Le choix des matériaux est une étape cruciale qui va directement influencer sur la capacité des sols à assurer certaines fonctions. Selon leur caractéristique propre, ils auront un usage différent dans les trois types d'horizon détaillés dans la Figure 14 (Damas, Coulon, 2016) :



Figure 14 : Schéma synthétique des caractéristiques de chaque horizon – Source : (Leroy, 2019) d'après (Damas et Coulon, 2016)

- Horizon de croissance : doit fournir des conditions de croissance favorables
- Horizon technique : joue un rôle de rétention d'eau, d'ancrage et de drainage
- Horizon squelette : joue un rôle de résistance face aux contraintes mécaniques

Des propriétés physico-chimiques idéales sont définies en fonction de la fertilité et de la portance recherchées (Damas, Coulon, 2016). Par exemple, les briques tuiles et céramiques possèdent de fortes qualités physiques et mécaniques (portance et densité apparente). Cependant le matériau ne possède aucune qualité agronomique (azote, CEC, ...) (Damas, Coulon, 2016). Ainsi, chaque matériau va apporter une caractéristique particulière au mélange final (annexe 8).

L'expérimentation du programme ADEME-SITERRE (Damas, Coulon, 2016) a permis de tester plusieurs sols construits, composés de mélanges de matériaux différents. Les qualités des sols et leurs capacités à jouer leurs rôles ont été évaluées. Il en ressort que les sols jouent le rôle de filtre et participent au réapprovisionnement des nappes souterraines. Les détails des résultats des expériences sont disponibles en annexe 9.

## 2.2 Une perspective encourageante pour ces anthroposols

Cette partie va permettre de donner une vision de mise en place mais aussi de développement des sols construits. Elle se base en partie sur l'étude menée par ADEME-SITERRE (Damas, Coulon, 2016) qui introduit les premiers éléments de réponse sur l'aspect opérationnel, économique et réglementaire qui gravite autour d'une filière naissante. Elle apporte des détails extérieurs et intrinsèques aux sols mais aussi élémentaires pour répondre aux enjeux et pour démocratiser son utilisation.

### 2.2.1 L'aspect opérationnel : une organisation de proximité

La manière dont les sols construits sont mis en place est un aspect important pour faciliter une démocratisation de son utilisation. La réussite environnementale et économique de la construction de sol réside dans l'identification et la mise en œuvre de matériaux disponibles à proximité (Damas, Coulon, 2016). Elle se décline en plusieurs phases plus ou moins complexes, illustrées par la Figure 15 (Damas, Coulon, 2016).

L'étape d'approvisionnement et de recherche de matériaux pour constituer les mélanges est primordiale, sans laquelle la construction de sol n'existe pas. Elle commence par une identification du contexte pour définir les matériaux habituellement utilisés localement et les gisements prédominants dans la région. Cette étape permet de déterminer l'opportunité d'usage de chaque matériau pouvant être potentiellement utilisé. Ils peuvent être acquis par plusieurs moyens. En effet, des bourses aux déchets nationales ont été mises en place via des sites internet (« Bourse aux terres » développé par TERRASS-BRGM) qui mettent en relation l'offre et la demande pour la réutilisation des matériaux. Localement, il est possible d'agir en identifiant les activités, les gisements, et les acteurs afin de collecter directement les matériaux nécessaires « à la source ». Leurs destinations habituelles (décharges, centres de stockage, ...) peuvent être déviées et réorientées, puis valorisées au profit de la construction de sol. La proximité des matériaux avec le site du projet facilitera par la suite les opérations de logistique et de mise en place. L'approvisionnement doit être suivi d'un contrôle de la qualité des matériaux et d'une procédure de traçabilité des matériaux à la demande de la maîtrise d'œuvre (Damas, Coulon, 2016).

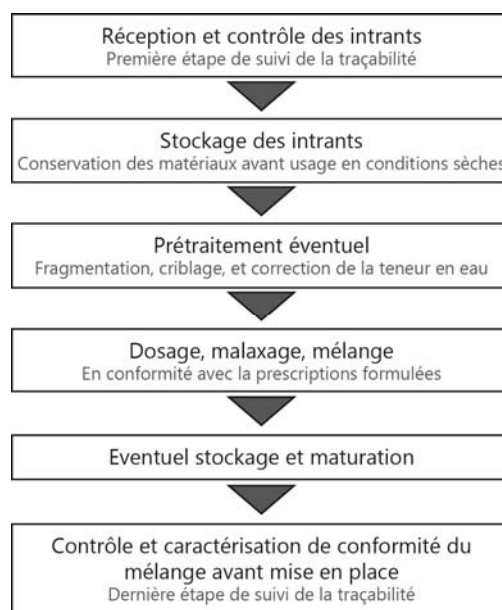


Figure 15 : Etape de réalisation d'un mélange – Source : (Leroy, 2019) d'après (Damas et Coulon, 2016)

Ensuite, l'étape de préparation des mélanges nécessite une logistique de qualité et un site de stockage et de traitement des matériaux. Les mélanges sont conçus sur cette plateforme. Le site du projet doit se trouver de préférence à proximité du lieu de mise en œuvre des mélanges pour des soucis de bilan économique et de conservation de l'homogénéisation des mélanges (Damas, Coulon, 2016). L'élaboration des compositions nécessite six étapes : réception et contrôle des intrants, stockage, prétraitement, dosage et création des mélanges, stockage et maturation, puis contrôle de conformité (Damas, Coulon, 2016).

Certaines étapes ne sont pas obligatoires : le prétraitement et le stockage de maturation. Le prétraitement va dépendre de la nature des matériaux, de l'hétérogénéité des lots et de la présence de macrodéchets. Le stockage de maturation quant à lui va dépendre de la volonté d'activer la pédogenèse avant la mise en place sur le lieu de l'aménagement (Damas, Coulon, 2016).

L'étape de mise en place des sols construits se réfère aux procédures appliquées pour les sols reconstitués formulées par les règles professionnelles (UNEP, 2012). Elles préviennent du compactage des matériaux. Le programme ADEME-SITERRE (Damas, Coulon, 2016) pointe le doigt sur quelques précautions à entreprendre :

- Respecter les typologies des sols construits et de leurs différents horizons, ceux-ci ayant des caractéristiques propres.
- Séparation des mélanges lors du transport
- Assurer la mémoire de l'opération et la position des sols construits

L'utilisation des sols construits demande une précision des prescriptions de mises en œuvre et d'un contrôle avisé lors de l'exécution des travaux.

### 2.2.2 Une économie viable et circulaire

Afin de déterminer la viabilité et la compétitivité de la filière de la construction de sol, une comparaison doit être établie avec les filières existantes de reconstitution de sol. La filière de construction de sol s'organise dans un système de circuit court et circulaire. La disponibilité accrue des matériaux employés et le facteur spatial sont capitaux à l'assise du système. Les matériaux dédiés à la décharge viennent en effet d'un lieu (en théorie) exclusivement proche de leur futur lieu de réutilisation. Les coûts vont être répertoriés sous trois entités : l'approvisionnement, la logistique et le fonctionnement (Figure 16).

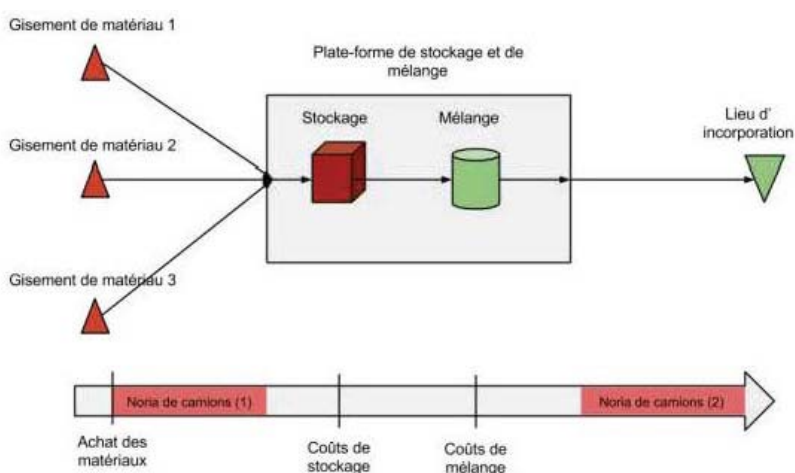


Figure 16 : Modélisation et chronologie des coûts – Source : (Damas et Coulon, 2016)

La filière de construction de sol s'organise dans un système de circuit court et circulaire. La disponibilité accrue des matériaux employés et le facteur spatial sont capitaux à l'assise du système. Les matériaux dédiés à la décharge viennent en effet d'un lieu (en théorie) exclusivement proche de leur futur lieu de réutilisation. Les coûts vont être répertoriés sous trois entités : l'approvisionnement, la logistique et le fonctionnement (Figure 16). L'étude ADEME-SITERRE présente une comparaison des coûts à la tonne entre les deux filières (Damas, Coulon, 2016).

L'approvisionnement, et donc le coût d'achat du matériau est caractérisé par la fourniture du matériau, et de son coût d'analyse. Il représente un premier avantage pour la fabrication de sols construits puisqu'il s'avère inférieur au coût élevé de la terre végétale, le Tableau 1 illustre les coûts pour l'horizon de croissance, voir annexe 10 pour les différents horizons. Le coût des

matériaux peut être nuls voir négatifs, en raison d'une mise à disposition gratuite ou d'une « prestation au titre de la prise en charge pour recyclage des matériaux qui vient en substitution de ce qui aurait été une prestation de traitement ou d'élimination par stockage de déchets » (Damas, Coulon, 2016).

Les coûts logistiques vont comprendre les prix alloués aux transports. Les rotations de camions vont s'opérer entre le lieu d'approvisionnement et le lieu de transformation, puis entre le lieu de transformation et le site du projet final. Malgré un coût à la tonne équivalent entre la filière classique et la filière de construction de sol annexe 10, cette dernière doit tirer son avantage en favorisant le circuit court

Tableau 1 : Résultats des estimations des coûts (en €/tonne) pour l'horizon de croissance - Source : (Damas et Coulon, 2016)

	TRANSPORT (€/TONNE)	ACHAT MATERIAU (€/TONNE)	COUT DE MELANGE ET DE STOCKAGE (€/TONNE)
<b>ANGERS</b>			
<b>SITERRE</b>	2.26	-3.875	6.5
<b>TRADITIONNELLE</b>	7.48	9	6.5
<b>NANCY</b>			
<b>SITERRE</b>	7.51	-3.875	6.5
<b>TRADITIONNELLE</b>	8.69	9	6.5
<b>ILE DE FRANCE</b>			
<b>SITERRE</b>	6.05	-7.95	6.5
<b>TRADITIONNELLE</b>	8.60	15.25	6.5

réduisant ainsi son impact logistique sur le bilan économique (Damas, Coulon, 2016). La filière traditionnelle peut procéder à une noria plus importante pour l'achat de terres végétales, avec des distances toujours plus élevées entre le lieu de prélèvement et le lieu d'utilisation.

La charge liée au fonctionnement concerne les coûts provenant des lieux de stockage et de la préparation des mélanges. Pour un prix à la tonne les tarifs sont similaires pour les deux filières (Damas, Coulon, 2016). On peut supposer que pour la création d'une fosse de plantation, les quantités sont les mêmes pour la préparation d'un sol reconstitué et pour un sol construit.

Cette simulation illustre une compétitivité intéressante pour la filière de la construction de sol au détriment des sols reconstitués. L'avantage est tiré de la proximité des matériaux utilisés (Damas, Coulon, 2016).

### 2.2.3 Naissance d'une filière

L'ensemble des activités complémentaires qui concourt à la réalisation de la construction de sol établit l'émergence d'une nouvelle filière présentant de nombreuses qualités et faiblesses.

L'atout majoritaire de la construction de sol réside dans l'emploi de matériaux délaissés et de sous-produits. Ils se trouvent par conséquent en disponibilité conséquente à l'échelle locale et nationale. « On note une potentielle adéquation entre la demande de substrat de végétalisation et la disponibilité en matériaux de formulation. » (Damas, Coulon, 2016). Elle offre une opportunité de recyclage et de réemploi en circuit court. La filière propose des sols de qualité, répondant ainsi à une réduction de l'offre des ressources naturelles (terre végétale, granulats de carrière) et à une augmentation de la biodiversité urbaine. Enfin, une palette très large de composition s'offre aux maîtres d'œuvre en fonction des multiples usages d'espaces verts urbains (Damas, Coulon, 2016).

La filière présente une faiblesse principale d'ordre opérationnelle. Le site dédié au traitement, au stockage et à la préparation des mélanges, nécessite une surface foncière importante. La disponibilité d'une telle surface en ville est rare et peut nuire au principe du circuit court exigé par la filière, dans le cas d'un site positionné à l'extérieur de l'aire urbaine (Damas, Coulon, 2016). Le manque de recul sur l'évolution de ces nouveaux sols dans le temps ne permet pas de tirer des conclusions et représente un inconvénient pour la filière malgré l'émergence de sites pilotes (Damas, Coulon, 2016). Enfin l'absence de cadre réglementaire peut faire obstacle au bon développement de cette filière.



#### 2.2.4 Vers une évolution de la réglementation

Actuellement, le cadre réglementaire ne permet pas l'utilisation de matériaux catégorisés comme « déchets » dans les aménagements pour constituer des sols et des substrats de culture. En effet, de nombreuses réglementations nationales et européennes codifient et réglementent cet usage (Damas, Coulon, 2016) : le Code Rural, l'Autorisation de Mise sur le Marché (AMM), la norme NF U 44-551, la disposition réglementaire européenne et enfin le cahier des charge des supports de culture. Tous ces exemples participent à leur échelle, à une pression et un contrôle vis-à-vis de l'utilisation des matériaux sur le marché. A titre d'exemple, la norme NF U 44-551 décrit environ 35 produits préparés ou fabriqués, liste les composants autorisés et présente les qualités sanitaires et environnementales des produits (Damas, Coulon, 2016). Les commandes publiques en matière de terres de plantation sont aussi formalisées par des prescriptions techniques dans le cadre des marchés publics (CCTG et CCTP) et des référentiels de bonnes pratiques (règles professionnelles de l'UNEP) (Damas, Coulon, 2016).

La filière de construction de sol est actuellement mise à l'arrêt par une réglementation trop stricte vis-à-vis des matériaux utilisés pour la composition de sols et de substrats. Effectivement, les sols construits ne peuvent pas, pour le moment pas être employés dans le cadre des marchés publics. Des hypothèses et des pistes d'action ont fait l'objet d'échanges avec des représentants de l'Etat et sont mis en lumière dans l'étude ADEME-SITERRE (Damas, Coulon, 2016). Il en ressort un positionnement encourageant et une volonté de faire bouger les lignes.

La modification de certaines normes telles que l'AMM et la NF U 44-551 est le premier levier d'action visé. Malgré la présence acquise de certains matériaux utiles à la construction de sols (terre excavée, déchets vert, ...), il est proposé de réaliser une révision de la norme. Une norme parallèle « dédiée à l'usage des matériaux recyclés [...] préciserait les typologies de matériaux alternatifs et les méthodes de caractérisation ainsi que les critères de qualité à respecter pour garantir l'efficacité et l'innocuité » (Damas, Coulon, 2016). Le deuxième levier consiste à l'élaboration d'un guide technique dédié à la construction de sol, qui fournit tous les éléments pour caractériser puis valoriser certains déchets dans des conditions d'utilisation optimales et spécifiques. Il assurerait une spécification technique et la traçabilité des opérations (Damas, Coulon, 2016). C'est déjà le cas pour valoriser les terres excavées dans le domaine des infrastructures routières, « Guide de réutilisation hors site des terres excavées en technique routière et dans des projets d'aménagement » (Blanc et al., 2012).

Il est important de comprendre que l'expérimentation et l'application de la mise en œuvre de sols construits permet d'accélérer la prise décision. Elle apporte et constitue une palette d'exemples avec une prise de recul sur le moyen terme des échantillons, qui alimenteront le guide technique. Ces applications doivent se faire dans les règles de l'art, après soumission et validation auprès de la Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement (DREAL) (Damas, Coulon, 2016).

### 2.3 Implantation du végétal sur des sols construits : de l'expérimentation à la pratique

#### 2.3.1 Constitution d'un socle fertile pour le développement de végétation

La construction de sols à partir de matériaux issus du recyclage doit certes permettre au sol de remplir son rôle tel un sol naturel mais elle doit également permettre de constituer un support fertile pour la végétation. Pour cela, l'horizon de croissance et l'horizon technique doivent être pourvus d'une part importante en matière organique. Elle se caractérise par des terres fines

(<1mm). Des matériaux vont permettent de faire soit un apport en matière organique au sein du mélange tels que les déchets verts broyés ou les composts. D'autres vont apporter la structure et les éléments fins pour constituer une future terre riche, malgré leur fertilité très faible à la base : boues papetières, boues de station d'épuration, déchets issus du balayage des rues, terres excavées, ...

Le développement optimal de la végétation s'accorde avec des conditions favorables de reprise des végétaux. Les règles ne changent pas vis-à-vis d'une plantation sur des sols reconstitués. Les périodes optimales sont l'automne et le printemps, cette dernière voit tout de même ses fréquences de pluie décroître. Les règles techniques professionnelles de plantation sont également à suivre. Concernant la strate arborée, il est recommandé de planter de jeunes sujets qui auront de meilleurs résultats de reprise.

### 2.3.2 Expérimentation sur sites lysimétriques

Le programme ADEME-SITERRE a permis d'analyser le développement des strates herbacées et ligneuses sur une gamme de sols construits sur des sites lysimétriques. Les tests se sont focalisés sur le développement racinaire et le développement de la biomasse aérienne des végétaux, après deux ans d'installation. Concernant la strate herbacée (*Lolium perenne* L.var Tove), le développement racinaire s'établit entre 0 et 145 cm selon les mélanges. La biomasse aérienne (en matière sèche) représente entre 1.4 et 4.2 tonnes par hectares selon les mélanges et après 4 mois de culture, soit entre 2 et 4.5 tonnes pour des prairies extensives classiques. La production de biomasse végétale est donc possible avec des sols construits (Damas, Coulon, 2016). La végétation ligneuse (*Acer platanoïdes*) quant à elle, a été analysée en comparant les deux premières années. Les racines ont colonisé près de 80% de l'horizon de croissance la première année et la biomasse aérienne s'est également développée entre les deux années (annexe 11). Ces analyses montrent que les sols construits, en fonction du mélange de matériaux, sont capables de constituer un support pour les végétations (Damas, Coulon, 2016).

### 2.3.3 Mise en application sur le terrain

Pour compléter les expérimentations sur les sites lysimétriques menées par le programme ADEME-SITERRE (Damas, Coulon, 2016), des mises en œuvre grandeur nature de sols construits, issus d'initiatives de collectivités, d'expérimentations de recherche et d'applications industrielles illustrent le développement de la strate arborée.

A titre d'exemple, un projet de construction de sol pour un alignement d'arbre a été mis en place en 2003 dans la ville de Luisant (Damas, Coulon, 2016). Le mélange terre-pierre est constitué de granulats de béton recyclés issus de chantiers de démolition avec de la terre présente sur site, enrichie de compost. L'essence végétale sélectionnée pour la composition est *Sophora japonica*. Le calibre des végétaux est petit à la plantation (tige d'une circonférence de 18-20cm) afin d'assurer une meilleure reprise. Le bilan en 2013 affiche des arbres vigoureux et en parfaite santé. Un contrôle de la circonférence des troncs permet de constater l'évolution des arbres qui faisaient 33 cm en 2008 (Damas, Coulon, 2016). Plus de détails sur l'itinéraire technique et sur l'évolution pédologique des sols mises en œuvre sont disponibles en annexe 12 (Damas, Coulon, 2016).

D'autres projets ont permis de construire des sols fertiles avec des matériaux recyclés très variés. Une végétation soit arborée ou herbacée a été mise en place dessus. Seulement, très peu de détails sur l'évolution des strates sont disponibles. En revanche des détails sur la mise en œuvre et sur les choix des végétaux et des matériaux sont disponibles en annexe 13 et 14.

## BILAN

La construction de sol permet de briser le système traditionnel, consommateur de terres végétales et apparaît comme une solution potentielle à l'utilisation de celles-ci. Ils sont capables de remplir des fonctions presque similaires aux sols naturels et urbains et permettent le développement d'un couvert végétal. Ces innovations pédologiques sont sources d'économies de matières premières non renouvelables, en favorisant le recyclage et le réemploi de sous-produits et de « déchets » dont le stockage et la mise en décharge posent problème. Malgré une filière qui se met doucement en place et qui présente des résultats économiques convaincants, le paysagiste-concepteur est toutefois immobilisé par une réglementation frileuse pour préconiser ces sols dans les aménagements urbains. Ce cadre réglementaire nécessite d'être rapidement revu, compte tenu des enjeux soulevés et des initiatives en matière d'aménagement.

### 3 MISE EN PLACE D'UNE PALETTE VEGETALE TEST DANS LE CADRE DU PROJET AGREGÉ SUR LE SITE PILOTE DE NOVACIÉRIES A SAINT-CHAMOND

#### 3.1 Le projet dans son contexte

##### 3.1.1 Le contexte du site pilote Novaciéries

Le site Novaciéries est un ancien site industriel né au XIXe siècle à Saint-Chamond, dans l'actuelle communauté d'agglomération de Saint-Etienne Métropole. De nombreuses industries métallurgiques se sont succédées sur ce site (Compagnie des Hauts-Fourneaux, Forges et Aciéries de la Marine et des Chemins de Fer, Compagnie des Ateliers et Forges de la Loire, Creusot-Loire, Arcelor et GIAT...). La spécialisation dans l'acier lui offre une renommée internationale. Après sa fermeture et quelques années d'abandon, ce site de 45 ha fait l'objet d'une requalification urbaine en 2012 (Figure 17). Elle vise à développer les activités économiques, pour créer de l'emploi dans le bassin de Saint-Chamond, tout en reconstruisant « la ville sur la ville ». Plusieurs objectifs sont visés à travers ce projet. Le premier est de maintenir et de pérenniser les activités existantes et de favoriser l'essor de nouvelles. Le second est de créer un axe de liaison entre le centre-ville de Saint-Chamond et les quartiers Sud. Enfin, la maîtrise d'ouvrage affiche une volonté de mettre en place un programme d'aménagement et de développement durable dans le cadre de cette revalorisation urbaine [1]. Novaciéries est un projet audacieux qui prend le pari de la mixité fonctionnelle en intégrant des logements, des commerces, des services et des aménagements d'espaces publics à proximité directe des industries. Le tout en recréant un tissu économique et social en plein cœur de la ville.



Figure 17 : Plan de localisation de la revalorisation urbaine de St-Chamond : Source : (Leroy, 2019)

L'atelier VILLES & PAYSAGES est intervenu sur de nombreuses missions de maîtrise d'œuvre et de programmation sur le site de Novaciéries (Figure 18):

- Le parc Novaciéries qui est la pièce principale du projet urbain (6 ha)
- Les abords du pôle de loisirs et de commerces Hall in One (4 ha)
- La rue Bonneviale, les accès et desserte du pôle industriel
- La reconversion de la totalité du secteur Est (5 ha)

Les deux siècles d'exploitation du site Novaciéries par les activités industrielles ont contaminé près de 1.6 millions de m<sup>3</sup> de terres (ADEME, n.d). Au regard des caractéristiques industrielles et patrimoniales du site, la maîtrise d'œuvre a été confrontée à la problématique de la gestion des terres polluées et du recyclage de celles-ci. Elles ont été gérées au sein même de la composition de l'espace public faisant de Novaciéries un projet dont la démarche est innovante et exemplaire sur ces thématiques.



Figure 18 : Plan de masse de la reconversion urbaine de Novaciéries - Source : (atelier VILLES & PAYSAGES, 2016)

### 3.1.2 Le travail de dépollution des terres *in situ*

Le travail de dépollution des sols a nettement évolué dans le temps. La démarche employée lors de la réalisation du projet à Novaciéries est pionnière et inédite en France, elle a donc été labellisée. Auparavant, la dépollution consistait à seulement confiner les sols. Une partie de la terre polluée est laissée sur place en prenant le soin de l'isoler sur site. Une autre partie est destinée à la décharge et aux centres de stockage. Aujourd'hui, bien que le confinement soit encore employé, la méthodologie expérimentée, tend à devenir une norme qui risque encore d'évoluer.

Cette nouvelle démarche se compose de deux volets d'action : le tri et le traitement des terres, puis sa revalorisation sur place (annexe 15).

En effet, une approche rigoureuse et innovante a été mise en place afin de gérer les terres *in situ* plutôt que d'envoyer les terres sur des sites de traitement annexes (Figure 19). Une plateforme temporaire pour le tri, le traitement, le recyclage, et le contrôle des matériaux terreux a directement été installée sur la ZAC permettant de centraliser la gestion de ceux-ci. « Cette plateforme permet de trier les terres selon leurs qualités chimiques et



Figure 19 : Andain de terre, suite au tri et au traitement - Source : (Leroy, 2019)

granulométriques (diamètre des particules) et de traiter les contaminations organiques (COHV et HAP) par différentes techniques de traitement sur site (traitement biologique, lavage) » [1]. Ce premier volet d'action a pour avantage majeur de réduire le coût de gestion de ces matériaux. Le « traitement des terres du site directement sur place a représenté un coût global de 2,8 M€ HT. Ce montant est à comparer au coût de traitement « classique » des terres polluées (transport en carrière classée, apport de nouveaux matériaux de carrière), estimé à 10 M€ HT » (Saint-Etienne Métropole, 2015). Il permet ensuite d'inscrire la démarche dans le développement durable puisqu'elle a limité les émissions de gaz à effet de serre, soit « 7 kg de CO2 évités par tonne de terre transportée, ce qui représente environ 1 000 tonnes de CO2. » (Saint-Etienne Métropole, 2015).

Le second volet d'action se base sur la réutilisation des matériaux traités. Sur les 1.6 millions de m<sup>3</sup> de terres polluées, seul les matériaux pollués d'hydrocarbure peuvent être traités correctement par des biotertres et d'autres actions spécifiques (bio-remédiation, traitement par bactéries). Les pollutions aux métaux lourds ne peuvent pas être éliminées ce qui condamne les matériaux au confinement à l'intérieur de merlons végétalisés (annexe 16). L'ensemble des matériaux dépollués est ainsi réutilisé sur site pour permettre le réaménagement des espaces. La caractéristique propre de ceux-ci va déterminer leur réemploi à l'échelle du site (structure de cheminements piétons et de voiries, puis aménagements paysagers) (Saint-Etienne Métropole et al., n.d).

Au total près 150 000 tonnes de terres ont été triées, traitées, puis réutilisées, soit 100 000 m<sup>3</sup>. Ce « sont plus de 98% des terres impactées excavées qui ont été réutilisées sur site » [1](ADEME, n.d)(ADEME, n.d)(ADEME, n.d)(ADEME, n.d)(ADEME, n.d).

### 3.1.3 Inscription du projet AGREGE dans le concept de ville durable

Le programme AGREGE (AGREGation technique, Economique, environnementale et sociétale) est un projet sélectionné par le Font Unique Interministériel (FUI) et labellisé par Axelera. Le budget s'élève à 3.2 millions d'euros [6] et s'étale sur une durée de 4 ans. Ce projet coordonné par le groupe SUEZ (Remediation et Minerals) associé au Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM), implique de nombreux acteurs tels que des PME (Valterra DR et C3Europe) mais également des maîtres d'ouvrage (La région Auvergne-Rhône-Alpes, la métropole du Grand Lyon, et Cap métropole) [6].

Le projet AGREGE s'inscrit dans le concept de « ville durable » issu du grenelle de l'environnement qui s'impose progressivement aux grandes agglomérations et dans le programme national de prévention des déchets 2014-2020 visant à réduire la production de ces derniers et à faciliter le recyclage (AGREGE, 2019). L'objectif principal de ce programme est de créer une filière pérenne de construction de sols fertiles en France. Effectivement, il vise premièrement, à répondre à un besoin croissant en matériaux terreux (terre végétale) pour les aménagements paysagers urbains et le développement du végétal en ville. Deuxièmement, il cherche à rendre effective la valorisation de matériaux jusque-là éliminés en installations de stockage et de traitement des déchets. Enfin, il a pour but de favoriser les mutations urbaines en limitant l'impact environnemental de l'utilisation de terres végétales (traitement des friches, impacts sur le milieu, transports, ...) (AGREGE, 2019). Les objectifs techniques et scientifiques vont permettre de lever et de mettre en lumière les potentiels éléments qui pourraient bloquer le développement de la filière (AGREGE, 2019):

- Identifier les besoins propres au(x) territoire(s)
- Définir et caractériser les gisements de matériaux disponibles et formuler les substrats
- Démontrer à échelle réelle la fonctionnalité des sols construits

- Optimiser le procédé de construction d'agrégats de sol pérennes
- Lever les derniers verrous réglementaires
- Réaliser le bilan financier et environnemental de la filière

Le programme va s'intéresser aux tonnages de terres fines (résidus de criblage) qui nécessitent une amélioration de la fertilité pour une valorisation agronomique. En effet, beaucoup de ces terres sont minérales (très peu ou non organiques), non structurées et biologiquement pauvres et donc loin des propriétés des terres végétales selon la norme NF U 44-551. Le processus consiste à les intégrer à d'autres matériaux issus du recyclage dans un processus de fabrication de sol afin de formuler une couche et sous-couche (horizon de croissance et horizon technique) utile au développement des plantes. Le produit de ce processus vise à combler le besoin croissant en terre végétale des aménageurs (AGREGE, 2019).

Afin d'atteindre ses objectifs, le projet doit travailler dans des conditions réelles. Pour cela, trois sites démonstrateurs sont utilisés comme référence : le site ISD SUEZ de Drambon (21), le site du Grand Lyon à Pierre-Bénite (69), et enfin le site Novaciéries de Saint-Chamond (42). Une végétation variée qui est vouée à des usages différents sera testée sur chacun des sites :

- Une végétation d'ornement (gazon, massifs, arbres) pour une valorisation sur projet d'aménagement sur le site de Novaciéries
- Une végétation de prairie pour une valorisation de site industriel sur le site d'ISD SUEZ
- Une végétation arborée, dans une production de biomasse pour une valorisation de friche urbaine sur le site du Grand Lyon

Le choix de Novaciéries dans le cadre du programme AGREGE n'est pas anodin. La démarche a fait de ce site un exemple en matière de dépollution et de recyclage des terres directement sur le site. Elle s'inscrit pleinement dans la perspective qu'offre ce nouveau programme. De plus, le projet de dépollution des matériaux terreux a laissé peu de résidus de traitement, environ 2% n'ont pas été réemployés sur site. Ils correspondent à des terres fines que la plateforme met à disposition du projet pour construire des sols. Le programme dispose de 900 tonnes destinées à des fosses de plantation d'arbres et met à disposition une surface de 5 000 m<sup>2</sup> sur le site pour l'ensemble des plantations. Une plateforme située sur site et un premier matériau sont à disposition du projet. A ce stade, peu d'éléments quant à la formulation des mélanges ont été transmis par les coordinateurs du programme, mais les matériaux annexes doivent être locaux. Les caractéristiques physico-chimiques restent donc inconnues.

### 3.2 Quelle méthodologie élaborer pour le choix des végétaux dans le cadre du projet ?

De manière générale, le choix des végétaux intervient tard dans le processus de conception d'aménagements paysagers. Dans un premier temps, suite à la compréhension du site dans son aspect historique, social et économique, le paysagiste concepteur s'applique à organiser l'espace qui lui est confié, définir la fonction de chaque zone et de créer un tissu de liaisons pour les connecter. Il est possible de constater que la végétation apparaît alors durant les premières phases d'esquisse et d'Avant-Projet (AVP), telle une forme et une répartition spatiale en plan, et comme un volume en élévation. Pour les arbres, les dimensions, la forme du houppier, le port, et son architecture (tige, demi-tige, cépée) sont évoqués afin de donner une vision et l'ambiance générale de l'espace au client. Ce n'est qu'à la fin de la phase AVP et durant la phase Projet (PRO) que le paysagiste concepteur va définir les essences des végétaux. Pour donner suite au choix de l'architecture, le critère esthétique va rentrer en compte. Il va permettre d'asseoir l'ambiance du projet avec les teintes des floraisons et feuillages, et les textures. En somme une

abondance de critères existe pour classer et catégoriser les végétaux ce qui facilite grandement le travail de choix pour les paysagistes-concepteurs.

Alors que les conditions urbaines et l'émergence de sols construits ne sont que très peu prises en considération lors de la conception d'espaces, le choix pour le bon développement du végétal pose question. Quelle méthodologie peut-on employer pour prendre en compte les exigences de la ville à travers son climat et ses sols ? Quels sont les critères de choix à prioriser ?

Des pistes de réflexion vont être proposées afin de répondre aux attentes de palette végétale pour le cas d'étude à Novaciéries tout en intégrant une optique d'adaptation aux conditions urbaines.

### 3.2.1 Une multitude de critères de sélection

Chaque végétal possède des caractéristiques qui lui sont propres et qui lui permettent d'évoluer dans un milieu particulier. Elles rendent les essences plus ou moins aptes à se développer sur un site donné.

Faire un choix de végétal pour le paysagiste-concepteur peut devenir un véritable challenge au vu du nombre d'espèces et de variétés végétales qui existent sur le marché de la production. Et pourtant cette diversité ne limite pas les effets de monoculture en ville. Effectivement, la « forêt urbaine » se trouvait alors en monoculture il y a quelques années, avec entre 60 et 80% des arbres du même genre ou de la même espèce » (Bourgerie, Mailliet, 1993) même si cela tend à évoluer aujourd'hui.

Les producteurs de végétaux, renseignent les végétaux produits et les répertorient dans un catalogue. L'ouvrage est un premier lien entre le paysagiste et le producteur, il permet à ce dernier de retranscrire et de partager une partie de ses connaissances sur un support abordable par les professionnels. Les végétaux sont ainsi répertoriés par une quantité exhaustive de critères tels que la hauteur, la couleur de floraison, le port ou encore la couleur du feuillage (Figure 20). Cet outil peut s'avérer indispensable pour aiguiller les paysagistes-concepteurs dans leurs prises de décision, au vu de la diversité et de la richesse des variétés végétales.

Désignation	Hauteur	Largeur	Croissance	Port	Système racinaire	Feuillage	Couleur floraison	Époque de FLORAISON / Époque de TAILLE															
					Persistant / Semi-persistant			Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre	Couleur des fruits	Espèce décorative	Sol	Exposition
ACER																							
buergianum	12	8		couronne étalée	étalé	vert foncé	jaune													x	neutre	▶	
campestre	15	6		couronne arrondie	en cœur	vert foncé	jaune															○	
campestre 'Elsrijk'	12	6	Lente	couronne ovoïde	en cœur	vert foncé	jaune															○	
campestre 'Queen Elizabeth'	15	10	Rapide	couronne ovoïde	en cœur	vert foncé	jaune															○	
capillipes	10	6	Lente	couronne arrondie	étalé	vert foncé	jaune													x	neutre	▶	
cappadocicum				couronne arrondie	étalé	vert moyen																▶	
cappadocicum 'Aureum'	12	5		couronne arrondie	étalé	jaune doré																▶	
cappadocicum 'Rubrum'	17	7		couronne arrondie	étalé	vert moyen																▶	

Figure 20 : Répertoire de catalogue de végétaux – Source : (Plant d'Anjou, 2015)

Cependant la multiplicité des facteurs, souvent imbriqués, nécessite parfois une analyse au cas par cas. Le constat illustre que d'une source d'information à une autre, les renseignements sur les végétaux fournis ne sont pas précisément les mêmes, l'exactitude des données n'est pas infaillible. Les catalogues renseignent dans une majorité de cas les critères classiques sous forme de grandes familles : architecture, conditions du sol, esthétique, exposition, gestion.

La difficulté réside dans la détermination des critères de choix et dans la prise de décision qui va orienter la sélection. Quels sont les éléments les plus importants à prendre en considération pour un développement idéal du végétal ? Une hiérarchisation va donc permettre de faire un choix d'essence en ayant une réflexion en entonnoir.

### 3.2.2 Définir la typologie des espaces urbains en fonction de l'usage

La ville possède une palette importante d'espaces végétalisés hétérogènes et pour chacun de ces espaces, un usage y est attribué. En 1995, le groupe de travail national « Espaces verts, nature et paysage » de l'association des ingénieurs territoriaux de France (AITF) a établi une typologie des espaces verts. Treize typologies d'espaces verts ont été définies (Tableau 2 : Type d'usage en fonction des typologies des espaces selon l'AITF - Source : (Damas et Coulon, 2016)) dont l'objectif était d'optimiser les modalités de gestion et d'entretien, notamment dans le cadre de la gestion différenciée (Damas, Coulon, 2016).

Tableau 2 : Type d'usage en fonction des typologies des espaces selon l'AITF - Source : (Damas et Coulon, 2016)

N°	Type d'usage	Description
1	Squares et parcs	Lieu de séjour à caractère horticole de type square
		Lieu de séjour à caractère horticole de type parc
2	Accompagnement voies circulation	Train, tram, métro, voies d'eau (en centre ville)
		Train, tram, métro, voies d'eau (en périphérie)
3	Accompagnement de bâtiments publics	espace ayant pour fonction majoritaire l'accompagnement du bâtiment
4	Accompagnement habitations	HLM municipaux, lotissements, ZAC
5	Accompagnement locaux industriels et commerciaux	Abord centre commercial, zones artisanales, zones industrielles
6	Accompagnement locaux sociaux éducatifs	Enseignement, maisons de quartier, résidences pour personnes âgées, maisons de jeunes, crèches
7	Terrains de sport	Surfaces à destination des clubs sportifs et leurs espaces verts d'accompagnement
8	Cimetières	Toutes les surfaces, réellement gérées par le Service Espaces Verts ou non, sont prises en compte
9	Campings	Espaces comprenant des structures d'hébergement à caractère temporaire
10	Jardins familiaux, partagés	
11	Établissements horticoles	Etablissements de production végétale à vocation publique
12	Espaces naturels aménagés	Grands parcs urbains ou coulée vertes à entretien plus ou moins sommaire
13	Arbres d'alignements	Sur sol minéral de voirie publique, seul, groupés alignés ou non, sur sol végétalisé, tous les arbres accompagnant la voie publique

Au regard des usages différents pour l'ensemble de ces typologies, les fonctions attendues en termes de construction de sol vont également être sources de variations. Ainsi, l'usage qui va être associé à un espace va directement influencer le choix des sols mis en place et donc des matériaux employés pour le construire. Pour mener son expérience, le programme ADEME-SITERRE (Damas, Coulon, 2016) a défini pour cinq types d'usages des profils de sols idéaux (annexe 17). A titre d'exemple, l'usage « arbres d'alignement », se positionne en bordure de voirie, sur le trottoir. Le sol requiert dans ce cas une portance élevée au vu des charges auxquelles il est contraint considérant les stationnements de véhicules, ainsi que les voiries piétonnes et cyclables. Ce sol doit aussi être capable d'accueillir des arbres nécessitant un volume conséquent, pour le développement racinaire et son ancrage, pour la réserve utile en eau et pour de l'oxygène (Damas, Coulon, 2016).

L'usage va interagir en premier lieu avec le sol mais il représente également un facteur variable pour le choix des végétaux. En effet, l'architecture des arbres et la résistance à la compaction des sols sont les deux éléments qui vont évoluer en fonction des usages. En comparaison avec le même exemple que précédemment et un usage de « parcs et squares », le résultat ne sera pas le même. Effectivement, les arbres d'alignement doivent avoir un port

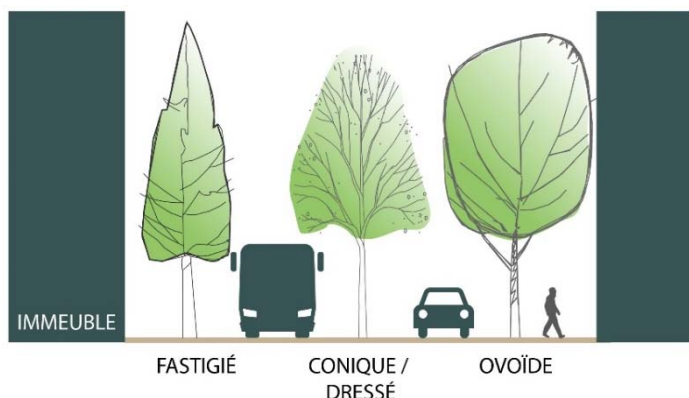


Figure 21: Schéma illustrant les architectures des arbres en condition d'alignement dans une rue - Source : (Leroy, 2019)



élançé, et peu large pour faciliter le passage des véhicules (Figure 21). La tolérance à des sols compactés devra être nécessaire. Au contraire, dans un parc, la palette peut être constituée d'arbres de ports variés et la pression de tassement n'est pas aussi forte. Certaines essences au port large sont parfois employées pour des alignements d'arbres et subissent des tailles drastiques qui les déséquilibrent.

Certes l'usage agit sur le choix des sols construits et des végétaux de manière indépendante, cependant on peut se demander si ces deux derniers peuvent interagir ensemble. De manière générale, le sol a toujours influencé le choix des végétaux. C'est encore le cas avec la construction de sol, le mélange des matériaux va présenter des qualités physico-chimiques particulières. Cependant, elle favorise le réemploi et le recyclage des matériaux et elle est dépendante de ce qui est disponible à proximité du projet (cf 2.2.1). Ainsi, il n'est pas impossible de pouvoir formuler des mélanges avec une caractéristique physico-chimique particulière lorsqu'une diversité de matériaux est disponible. Grâce à la construction de sol, le support de végétation peut dans certain cas, devenir un élément interchangeable. Par conséquent, la définition des usages va constituer le premier composant (Figure 22) qui va poser le cadre pour affiner la suite de la recherche.

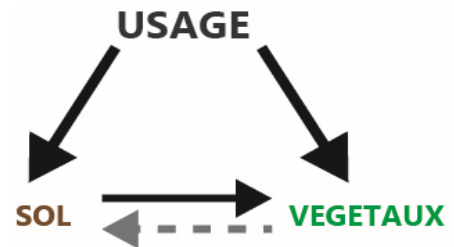


Figure 22 : Schéma de la relation entre l'usage, le sol et les végétaux – Source : Leroy, 2019)

### 3.2.3 Identifier les conditions de développement en milieu urbain

Le milieu urbain offre des conditions de vie contraintes pour les végétaux (cf 1.1.3). L'identification de celles-ci en amont, peut permettre d'orienter et de favoriser l'adaptation du végétal en ville. Elle va accroître la réussite du développement des strates végétales.

Les situations édaphiques sont variables. Comme cela a été présenté plus amont du mémoire, la construction de sol offre la possibilité d'élargir la gamme de sol que l'on peut mettre en place. Elle est dépendante des matériaux et des gisements situés à proximité du site de projet. Les caractéristiques physico-chimiques peuvent donc varier d'un lieu à un autre. Dans le cas d'étude à Novaciéries, les matériaux employés pour la construction de sol ne sont pas encore définis, ainsi le critère de choix « sol » n'est pas prioritaire à ce stade du projet. Il faut donc anticiper en sélectionnant des conditions édaphiques standards. D'un point de vue opérationnel de plantation, le volume des fosses de plantations allouées aux arbres sont faibles. De manière générale, le CCTG Fascicule 35 prescrit un volume de 12m<sup>3</sup> pour des arbres tiges de grand à moyen développement (cf Figure 1). Le positionnement des plantations en bordure de voirie est contraignant pour augmenter ces volumes, avec la présence des réseaux et des voiries. Ainsi, le système racinaire de l'arbre est un élément qui doit être pris en compte dès la conception pour ce genre de situation. Ensuite, le degré de compaction du sol qui est un facteur inhibant la croissance racinaire, les échanges gazeux et l'infiltration de l'eau est très courant en milieu urbain. L'usage détermine le degré de compaction des sols. Enfin, les conditions hydriques complexes doivent être considérées. Premièrement, la progression racinaire est compliquée pour atteindre les nappes phréatiques, dans un sol compacté. Deuxièmement, les fosses de plantation ne disposent que d'une faible réserve utile en eau. La disponibilité et le mouvement de l'eau sont des paramètres qui peuvent être améliorés par la structure du sol et par la résistance à la sécheresse des végétaux. Par conséquent, le degré de tolérance à la sécheresse doit donc être un critère pour le choix des essences d'arbre.

Un climat particulier subsiste au sein de la ville : la pollution est concentrée, les températures ambiantes augmentent, les vents assèchent l'air et forment des turbulences. Tous les arbres ne sont pas égaux pour s'adapter à ces conditions. C'est pourquoi, il faut suggérer des végétaux,

peu sensibles aux pollutions atmosphériques, puis tolérants aux épisodes de sécheresse et de fortes températures. La surchauffe des revêtements et des façades de bâtiment peut être limitée en favorisant l'emploi d'arbres créant un ombrage conséquent. Les problèmes d'échaudures qui apparaissent le plus souvent en été (Figure 23) sont à prendre en considération. Il faut écarter les essences sensibles.

La santé des citoyens n'est pas à négliger et le phénomène d'allergie qui touche une partie de la population doit faire office d'une réflexion raisonnée sur le choix des essences dans les espaces verts urbains. Le caractère allergène des végétaux doit également constituer un facteur de choix.

Malheureusement, les sources d'agression des végétaux (tailles drastiques, vandalisme, travaux souterrains, ...) sont indépendantes du choix des essences. Ces contraintes doivent être pensées dès la conception des espaces. En résumé voici les critères de sélection dus aux conditions urbaines :

- Système racinaire
- Tolérance à la sécheresse
- Résistance aux pollutions atmosphériques
- Résistance aux climats urbains
- Caractère allergène
- Type d'ombre

#### 3.2.4 Les autres critères

De nombreuses familles de critères n'interviennent qu'en troisième lieu de la hiérarchisation. Ils sont tout à fait légitimes et sont également importants pour le résultat du projet. Ils ne répondent pas directement à l'objectif de réussite de développement dans des conditions urbaines, avec des sols issus de matériaux recyclés. Ils doivent être employés de manière contextuelle au site et au projet. Voici les familles de facteurs dont le choix peut se faire en dernier lieu, à cette phase d'étude, dans le cas d'étude de Novaciéries : esthétique, exposition, gestion, risques phytosanitaires.

Ici le choix a été de mettre en avant le développement des végétaux au sein des trames urbaines. La réussite en termes de reprise et de croissance est l'objectif principal. Ainsi, le caractère esthétique ne représente plus le principal choix pour planter des végétaux en ville, il est donc relayé au second rang. Néanmoins, il n'est pas à négliger parce qu'il permet de générer une ambiance végétale qui s'associe à la composition générale d'un lieu. Il est l'un des facteurs déterminant pour la réussite d'un projet aux yeux du maître d'ouvrage et de l'utilisateur.

Ensuite, les caractéristiques phytosanitaires des végétaux pris en considération en dernier lieu dans la méthodologie, représentent une autre limite à cette méthodologie. Effectivement, ce facteur constitue un réel problème pour les maîtrises d'ouvrage. L'anticipation des sujets susceptibles d'être malades dès la plantation permet d'éviter la mortalité de compositions entières (alignements d'arbres). La connaissance des risques phytosanitaires est dépendante du facteur contextuel et temporel. Elle est amenée à changer de jour en jour, et cela nécessite de se renseigner à chaque plantation pour constater l'évolution de ces risques. Dans notre cas d'étude, malgré l'anticipation de la menace d'une contamination à travers les conseils de professionnels et des ouvrages techniques, les risques phytosanitaires ne feront pas l'objet d'une recherche plus approfondie.



Figure 23 : Résultat d'une échaudure sur un tronc - Source : (Ameglio at al., nd)

### 3.3 Exemple de l'arbre sur le site pilote de Novaciéries

Dans le cas du site pilote de Novaciéries, le maître d'ouvrage affilié au projet met à disposition du programme AGREGE, des parcelles en cours d'étude pour un futur aménagement et une parcelle en friche dont la localisation est précisée en annexe 18. La plantation s'organisera sous forme de parcelle d'expérimentation rectangulaire, dont l'emplacement est détaillé en annexe 19. Seules 5 zones sont destinées à la plantation d'une strate arborée.

Dans un premier temps, un usage a été attribué à chacune de ces parcelles expérimentales plus ou moins grandes. Elles permettent de présenter et de tester des sols différents et de planter des végétations variées. Pour chacun de ces usages, le sol présentera des caractéristiques différentes. Pour le cas de l'arbre, les usages choisis sont les plus communs du milieu urbain : les alignements d'arbres, et les parcs et squares. Bien que les mélanges et que leurs propriétés physico-chimiques ne soient pas totalement définies par le programme AGREGE, certains atouts peuvent dès à présent être fixés. La formulation des différents sols, va en partie, dépendre des matériaux disponibles à proximité du site de projet. Ils seront assemblés avec les résidus du traitement des terres polluées.

#### - Usage « alignement d'arbre »

Il est certain que pour obtenir une portance suffisante, les arbres utilisés pour cette catégorie seront plantés dans des fosses type terre-pierre (un volume de terre pour deux volumes de pierre), composée d'un horizon de croissance et d'un horizon squelette (Figure 24). Les arbres plantés devront résister à la compaction et devront présenter une architecture adéquate pour le passage de véhicules. Le houppier devra donc être de forme ovoïde, dressée, fastigiée, ou pyramidale. La silhouette de l'arbre peut apporter plus ou moins d'ombre. D'un point de vue développement racinaire, il est important de favoriser un développement « en cœur » ou bien « pivotant ». Le premier permettra de « conditionner » l'arbre dans un périmètre restreint autour de la fosse de plantation, permettant ainsi de limiter les conflits avec les réseaux. Le second présente l'avantage d'éviter le déchaussement des revêtements de sol et de s'ancrer en profondeur. Ensuite, il s'agit de choisir des critères de sélection qui vont permettre de favoriser son développement en milieu urbain. La sélection d'arbre doit présenter des essences tolérantes à la sécheresse, résistantes aux climats urbains et à la pollution atmosphérique. Les essences allergènes doivent être évitées pour limiter les risques sanitaires pour les citoyens. Le guide du Réseau National de Surveillance Aérobiologique (RNSA) (RNSA, n.d), présente les essences au potentiel allergisant. Les risques faibles et moyens peuvent être employés.

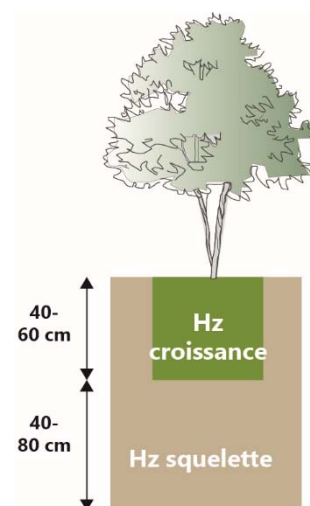


Figure 24 : Profil de sol pour la catégorie « Alignement d'arbre » - Source : (Leroy, 2019) d'après (Damas et Coulon, 2016)

Deux zones de 576 et de 210 m<sup>2</sup> sont allouées pour la plantation d'arbres d'alignement. Au total 20 arbres seront plantés. Plusieurs partis ont été pris quant à la plantation. Premièrement, une plantation rapprochée a été souhaitée afin d'optimiser le rapport quantité / surface. Deuxièmement, une variété d'essence a été choisie afin de ne pas contraindre l'expérimentation

à seulement quelques-unes. La sélection des essences est disponible en annexe 20 et le plan de plantation en annexe 22.

- Usage « Parcs et squares »

Cette catégorie ne doit pas présenter de qualité particulière à la portance. Le profil de sol sera composé d'un horizon de croissance et d'un horizon technique (Figure 25). Pour le choix des essences, les conditions sont moins contraignantes que pour la catégorie des « arbres d'alignement ». La totalité des systèmes racinaires peut être employée. La tolérance à la compaction peut être un atout mais n'est pas nécessairement obligatoire, seul le piétinement sera source de tassement. L'architecture des sujets peut être totalement libre, ils devront cependant apporter une ombre importante. En revanche, la capacité de tolérance à la sécheresse, la pollution atmosphérique, les climats urbains, puis son faible caractère allergène, ne changent pas par rapport à la catégorie précédente.

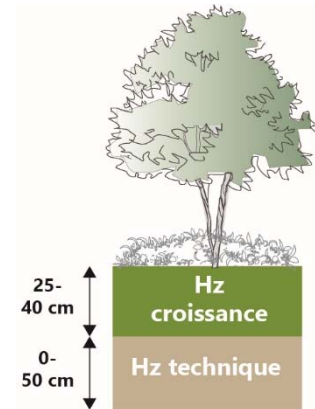


Figure 25 : Profil de sol pour la catégorie "Parcs et squares" - Source : (Leroy, 2019) d'après (Damas et Coulon, 2016)

Trois zones de plantations ont été destinées à cet usage. Une première zone qui présente 15 arbres en isolés au milieu de la parcelle, la deuxième, mixe les arbres isolés avec de la prairie haute sur une surface de 285 m<sup>2</sup>. Enfin la troisième, mélange les arbres au sein de massifs de vivaces et d'arbustes sur une surface de 997 m<sup>2</sup>. Elles vont permettre d'installer un total de 27 arbres. La sélection des essences est disponible en annexe 21 et le plan de plantation en annexe 23.

On peut constater qu'il est difficile d'obtenir un résultat parfait en cumulant tous les critères de choix. Certains critères de sélection ne présentent pas d'informations. C'est le cas pour les échaudures, la résistance à la compaction par exemple. Le développement de certaines essences d'arbre va pouvoir être comparé à ce qui a été planté dans le passé pour le projet Novaciéries (Parc du Gier).

Cette sélection d'arbre représente une première approche pour la composition de la palette végétale dans le cadre du programme AGREGE à Novaciéries. Elle permet de réfléchir sur une méthode de sélection des végétaux adéquate sur des sols construits et en milieu urbain. Elle risque d'évoluer au cours du projet, en fonction des analyses physico-chimiques des mélanges conçus par l'opérateur SUEZ. Ce travail n'est qu'un test mais il permet de mettre le doigt sur des difficultés et sur des limites rencontrées.

### 3.4 Les limites et les pistes de réflexion à la proposition d'une gamme végétale adaptée

#### 3.4.1 Un manque de retour temporel sur l'évolution des végétaux

Ce travail a permis de détecter une connaissance déficiente pour l'implantation de végétaux sur des sols construits, dans un premier temps, puis dans un second temps, dans des milieux urbains contraignants

Les premières expérimentations concernant l'implantation de végétaux sur des sols construits sont très récentes, et datent de moins d'une dizaine d'années. Ce délai est dans un premier temps trop court pour analyser et évaluer le développement d'une strate arborée. Pourtant, ces tests permettent déjà de dégager une légère tendance sur la croissance. Deuxièmement, les mélanges constitués dans le cadre de la construction de sol nécessitent davantage de temps pour continuer à évoluer. Les réelles conclusions de ces deux facteurs pourront être tirées que

dans une quinzaine ou une vingtaine d'années. Aujourd'hui, il est nécessaire de continuer les expérimentations sous toutes leurs formes en élaborant une variété de sols construits importante afin d'en constituer une large palette. Une diversité de végétaux doit également être soumise à des expérimentations. Les constats et les analyses permettront de formuler une future base de données pour mieux connaître les alliances et relations optimales entre le sol construit et le végétal.

Enfin, la connaissance du développement végétal en milieu urbain est en carence. Ceci peut paraître insensé au regard du contexte actuel, où la ville doit faire face à de nombreux enjeux avant tout climatiques. Peu d'informations et de retours quant au développement des arbres en milieu urbain, sont à la disposition des paysagistes pour placer les végétaux dans des conditions optimales de développement. A savoir que ces modifications climatiques risquent encore d'évoluer dans les années à venir. Il est donc important de garder à l'esprit que le climat évolue plus vite que l'arbre ne se développe. Ainsi, il est primordial d'anticiper les conditions climatiques de demain pour planter les bons arbres dès à présent. Comme le soulignait Francis Hallé : « le bon arbre au bon endroit ».

### 3.4.2 Des outils d'aide à la décision (OAD) à la disposition des paysagistes concepteurs à encourager

Des outils sont à la disposition du paysagiste pour l'aider dans sa sélection d'essence pour un projet d'aménagement. Ils se présentent sous plusieurs formes : papier ou numérique. Les catalogues des pépinières de production sont les tout premiers outils d'aide à la décision. Ils ont par la suite, été exportés sous forme de base de données publiques telle que « Floriscope », en partie développée par Plante & Cité, ou bien privée telle que « VégéCad », développée par les pépinières Minier et Lepage. Ces dernières recensent un grand nombre d'espèces végétales dont les caractéristiques propres y sont décrites. Les développeurs doivent veiller à ne pas fournir une disparité dans les informations, comme cela peut-être le cas dans certains catalogues. Intégrer les contraintes de développement en milieu urbain et sur des sols construits doivent devenir les deux leviers de développement de ces OAD pour le choix de végétaux. En effet, aujourd'hui, peu d'informations existent sur l'implantation et le comportement des essences végétales en ville. Les éléments tels que la tolérance à la sécheresse, la résistance à la pollution atmosphérique et aux climats urbains, ainsi que les risques d'échaudure doivent être détaillés et amendés. Les résultats des premières expérimentations de l'implantation de végétaux sur des sols construits devront constituer une nouvelle donnée de la base, qui sera enrichie au fur et à mesure. L'amendement des bases de données est permis par une communication des expériences et des résultats obtenus par les acteurs de la filière (paysagiste concepteur, paysagiste et pépiniériste producteur) et les acteurs de la recherche.

Ensuite, il est également important d'encourager le développement d'outils facilitant l'usage et la formulation des mélanges pour la construction de sol. Ils permettent de connaître les caractéristiques physico-chimiques, utiles pour l'implantation des végétaux dans ces conditions édaphiques particulières. Le programme ADEME-SITERRE a permis de développer un prototype d'OAD pour construire un sol en fonction des contraintes techniques, économiques et sociétales (Damas, Coulon, 2016) :

- Le traitement technique aide dans le choix des matériaux pour constituer les mélanges en détaillant les caractéristiques propres puis globales.
- Le traitement économique permet d'estimer les coûts en tenant compte du transport et des émissions de CO<sub>2</sub>.
- Le traitement sociétal décrit une note d'acceptabilité du document.

Cet outil mérite d'être perfectionné puisqu'il ne recense qu'à présent, les matériaux candidats, caractérisés et utilisés dans le cadre du programme ADEME-SITERRE. Ainsi, il doit être enrichi afin de mettre à disposition de l'utilisateur une gamme de matériaux plus importante. Une donnée géographique du gisement pour certains matériaux permettrait de les localiser et de faciliter la recherche de l'utilisateur.

Ces outils permettent avant tout de venir en aide au paysagiste concepteur dans la sélection des essences végétales mais ils constituent également le premier lien entre la conception d'espaces et la production de végétaux.

### 3.4.3 Fortifier le lien entre la production et la conception

Être paysagiste concepteur est une profession qui nécessite des connaissances sur un grand nombre de domaines (réseau, voirie et revêtement, environnement, sol, ...) dont le végétal fait partie. Evidemment, il est complexe d'être un spécialiste dans l'ensemble des domaines de connaissances bien que le paysagiste se dresse comme un « sachant » sur un projet d'aménagement. Pour le choix d'une gamme végétale, il doit bien évidemment consulter les OAD qui permettent de lui fournir des informations complémentaires à ses connaissances et ses expériences. Mais il doit avant tout conforter le lien avec les acteurs de la production végétale. Effectivement, la large connaissance des pépiniéristes permet d'adapter au mieux la sélection végétale aux enjeux du projet. Dans une majorité de cas, le lien s'établit lors du marquage des arbres en pépinière qui a lieu à l'approche des saisons de plantation. Le paysagiste en charge des plantations invite la maîtrise d'ouvrage et la maîtrise d'œuvre directement sur le lieu de production, afin de convenir du choix des sujets emblématiques de l'aménagement. Durant ce moment, le pépiniériste peut devenir précieux et apporter des modifications sur la sélection des espèces choisies par le maître d'œuvre. Lorsque les marquages ont lieu, ce type de changement se fait tard dans le processus de conception. Ce moment représente presque l'unique point de contact entre les deux acteurs et ce manque n'est pas à l'avantage des paysagistes concepteurs et pénalise les projets d'aménagement.

Les connaissances des pépiniéristes sont précieuses pour comprendre comment le végétal se développe et s'installe. Leurs observations forgent leurs connaissances. Pourtant, leurs productions situées en dehors des villes, ne sont pas directement touchées par les conditions urbaines et se développent sur des sols agricoles ou en conteneurs. Ainsi, on peut se demander comment les pépiniéristes constituent leurs connaissances du développement végétal en cœur de ville ? Ont-ils des retours sur des recherches et des analyses menées par des instituts de recherche ? Le paysagiste est-il un passeur d'information lorsqu'il suit ses aménagements dans le temps ?

Aujourd'hui, la filière de production végétale est régie par la demande (maîtrise d'œuvre) et par l'offre (pépiniériste producteur). Pour résumer de manière concise, c'est le paysagiste qui oriente la production végétale des pépiniéristes. Ainsi, la sélection de végétaux pour un projet à un instant « t », va définir l'offre du marché à « t+n » (n=nombre d'année), avec « n » variable en fonction des essences et du temps de culture. Par conséquent, le producteur n'est pas maître de sa mise en culture et dépend donc des tendances. Dans le cas d'une mauvaise tendance, c'est toute la production qui risque de souffrir.

Le manque de contact entre les deux acteurs est préjudiciable pour la mise en culture. En effet, dans le cas où le paysagiste ne possède que très peu de renseignements sur les essences tolérantes aux climats urbains et aux sols construits, il ne fera pas forcément le bon choix de sélection. Ainsi, la mise en culture ne favorisera pas obligatoirement le développement d'une gamme de végétaux urbain. C'est à se demander si l'inversion de la filière ne serait pas possible.

Est-ce que le pépiniériste ne pourrait pas directement proposer une palette de végétaux réellement adaptés aux conditions urbaines et aux sols construits au sein de sa gamme générale ?

De nombreuses questions ont été levées afin de permettre d'améliorer le choix des végétaux qui arrive en fin de projet, dans l'objectif d'intégrer ses nouveaux enjeux de la sélection végétale. Le lien entre le pépiniériste producteur et le paysagiste concepteur est l'une des clés de la réussite d'un projet d'aménagement.

### 3.5 Vers une utilisation démocratisée des sols construits dans le paysage urbain

#### 3.5.1 Développement d'outils annexes permettant de promouvoir les sols construits

La filière de la construction de sol va être en concurrence avec la filière traditionnelle. Certes les coûts d'utilisation de cette première sont moindres, comparé à ce qui est pratiqué aujourd'hui avec les problématiques de raréfaction de la terre végétale. Cependant, cette nouvelle filière a besoin de visibilité et d'encadrement pour exister. Une certaine flexibilité doit être initiée dans la commande publique pour pouvoir laisser place aux initiatives de construction de sol. Comme on a pu le voir dans la partie 2.2.4, la mise en place d'un guide technique dédié aux sols construits permettrait d'encadrer sa mise en place tel un cahier des charges. La nouveauté de la filière ne permet pas aujourd'hui de présenter une mise en œuvre idéale et rodée. Les acteurs de l'aménagement (MOA, MOE, entreprises de paysage et de travaux publics) n'ont que très peu de connaissances sur le sujet, ce qui les rend « frileux » quant à l'utilisation de sols construits. Des adaptations aux marchés doivent les accompagner, notamment en amendant le CCTG Fascicule 35. Les prescriptions techniques doivent être détaillées et elles doivent constituer une trame de base pour la rédaction des CCTP par les bureaux d'études dans les DCE.

La labellisation peut également constituer un levier d'action. Elle permet de rassurer le consommateur, ici le concepteur et la maîtrise d'ouvrage, et de lui garantir les qualités des matériaux employés. Elle peut être, dans un premier temps, prise en compte en amont sur l'emploi de matériaux certifiés et labellisés en provenance du réemploi ou du recyclage. Ensuite, elle peut très bien s'effectuer sur l'ensemble de la filière permettant de garantir une qualité mais également un respect environnemental sur l'ensemble de la chaîne de préparation : la recherche des matériaux, le stockage, le traitement, le mélange, puis la mise en œuvre sur site.

#### 3.5.2 La construction de sols, une technique à encourager

Cette démarche de construire des sols avec des sous-produits et des déchets est novatrice et reste encore expérimentale, mais elle commence à faire ses preuves. Pour la faire évoluer, lui donner une tout autre échelle, et voir la construction de sol comme une réponse évidente aux problématiques de sols fertiles en ville, il faut prendre du recul sur la conduite de projet. La façon de concevoir et les rapports entre les acteurs du projet sont sans doute à modifier.

La maîtrise d'ouvrage est la racine du projet, c'est elle qui confectionne le programme et établie la commande du futur projet. Elle peut être motrice pour employer des nouvelles méthodes de travail et les initier, comme cela a pu être le cas pour le traitement et le réemploi des terres du projet à Novaciéries. Pour elle, ce changement implique des modifications de procédures, des nouvelles prescriptions au cahier des charges, et de nouveaux outils de contrôle (Rotor et al., 2018). Il faut encourager les maîtrises d'ouvrage à sortir des « sentiers battus » afin d'initier un nouveau mouvement.

Le paysagiste concepteur quant à lui, doit exercer un rôle majeur sur la caractérisation des sols en place. Avant même de commencer sa réflexion sur la conception, il doit s'intéresser à la qualité des sols en place afin d'en réaliser un diagnostic approfondi. Par la suite, il saura les apports nécessaires à faire en fonction de la conception. En cas de besoin, il doit se faire une idée des potentiels approvisionnements locaux pour formuler de nouveaux sols, et de la nécessité d'installer une plateforme de traitement. Cette démarche attribue davantage d'attention à porter sur le sol durant la phase diagnostic et complexifie la gestion et la logistique des matériaux *in situ*.

Cette nouvelle approche fait bouger l'organisation traditionnelle à laquelle le maître d'œuvre reste le ciment qui uni les briques. Elle intègre un nouvel acteur au sein de la boucle, le producteur de sol qui sera amené à gérer l'ensemble des étapes de construction de sol. Il devra servir de lien entre l'approvisionnement des matériaux nécessaires et la maîtrise d'œuvre. La démarche oblige les concepteurs à avoir une réflexion plus globale sur le site du projet avant même de concevoir. La clé de la réussite est d'intervenir dès la racine du projet. Actuellement, il n'est possible que d'imaginer les effets de l'intégration de cette nouvelle filière, sans fournir une réponse précise. Les premières réelles mises en œuvre de sols construits dans un projet de marché public planteront le décor pour la suite.

## BILAN

Le programme AGREGE qui s'établit sur le site de Novaciéries, s'inscrit dans une campagne expérimentale dont l'objectif est d'établir la filière de construction de sol, puis de lever les derniers verrous réglementaires. Sur le site pilote de Novaciéries, il permet de tester l'implantation d'une végétation ornementale. Ce projet confronte dès à présent le paysagiste aux choix des essences pour que les végétaux se développent sur ces sols construits. Ici, des pistes de réflexion pour améliorer la sélection des végétaux ne se concentrent pas seulement à la construction de sol mais prennent en compte l'ensemble du milieu urbain. Pour obtenir des résultats de développement convaincant, le paysagiste doit indéniablement se rapprocher dans un premier temps des OAD, mais également des professionnels de la production végétale en possession de précieuses connaissances sur la croissance des végétaux. La construction de sol qui semble s'imposer comme réponse à l'utilisation de terres végétales doit encore être encouragée par les pouvoirs publics et les acteurs de l'aménagement.



## CONCLUSION

Au cours du dernier siècle, l'aménagement était très florissant et aucun problème d'approvisionnement de matériaux ne transparaissait. Désormais, la tendance a changé et la prise de conscience de la consommation effrénée de la terre végétale dans le domaine de l'aménagement, et son manque à venir n'est désormais plus à prouver. Le coût économique croissant de celle-ci en est une illustration. Les villes font face à une problématique d'approvisionnement en terre pour les aménagements urbains végétalisés, tandis que ces espaces sont nécessaires, pour mener la ville vers sa résilience. Ainsi, pour répondre à la consommation de la ressource « terre végétale », la construction de sol se présente comme un nouveau procédé qui permet de constituer un socle fertile et viable au développement de végétation. Il se constitue à partir de sous-produits ou de matériaux considérés comme déchets. Le végétal se trouve au cœur de ces enjeux de contexte climatique et de l'emploi de nouveaux sols fertiles. Afin de permettre d'intégrer davantage de végétal en ville en utilisant ces sols, le paysagiste doit développer une véritable stratégie de sélection végétale.

Ainsi, la construction de sol est par conséquent une variable qui s'additionne à des conditions urbaines de développement qui ne sont pas toujours idéales pour la végétation et les arbres. L'ensemble va conditionner le choix des essences végétales auxquelles le paysagiste est confronté. Face à une multitude de critères de sélection de végétaux, le paysagiste doit être méthodique. En conséquence, pour répondre à la problématique, il doit comprendre que l'aspect esthétique des arbres, bien qu'il participe à la réussite d'un projet, n'est plus le critère primordial de sélection. Favoriser le développement de l'arbre est plus que nécessaire. Pour cela, le paysagiste doit réorganiser et hiérarchiser ses critères de choix. Le premier point, consiste à déterminer l'usage qui sera fait du lieu. Il va permettre de définir le type de sol et ses caractéristiques à construire, mais il donne également une première idée du végétal à mettre en place. Ensuite, la compréhension du milieu urbain et des conditions de développement des arbres en ville, va justifier leur choix. Pour finir, le paysagiste doit incontestablement intégrer sa sélection d'essence dans un cadre contextuel au projet et aux attentes du client. Pour mener à bien ses choix, il doit se rapprocher des OAD développés pour les végétaux et pour les sols construits. Les professionnels de la production horticole doivent être mis à profit pour nourrir le projet de leurs connaissances végétales. Ce sont des acteurs indispensables pour la réussite d'un aménagement. Ce qui a été proposé ici, ne représente que des pistes d'action en vue d'améliorer les futures sélections de végétaux dans des projets urbains. La vocation expérimentale du programme AGREGE, a pour objectif de tester et d'étudier le développement des strates végétales sur des sols construits. Ce n'est pas quelque chose de figé, mais qui doit évoluer et être amendé en fonction des résultats.

Les expérimentations relativement récentes aux sols construits, ne permettent pas d'obtenir une réelle vision du développement végétal sur ce type de sol à long terme. Sera-t-il plus efficace que sur des sols traditionnels ? Il est clair que la construction de sol semble être une réponse aux enjeux concernant la ressource « terre végétale ». Néanmoins, des progrès doivent être faits pour l'acceptation des pouvoirs publics, pour l'alternative qu'elle offre. L'encadrement technique et réglementaire doit évoluer rapidement pour permettre d'accélérer l'emploi de cette méthode dans les projets. Elle devra être suivie par une application quotidienne de la démarche d'un projet d'aménagement responsable et portée par les acteurs de l'aménagement. Le caractère expérimental actuel nous permet seulement d'imaginer l'implantation de cette nouvelle filière. Comment va-t-elle réellement s'installer dans le schéma traditionnel ? Quel sera le rôle du maître d'œuvre vis-à-vis de ce nouvel acteur ? La mise en place de sols construits rallongera-t-elle le temps de travaux pour les aménagements ? Le recyclage et le réemploi vont se démocratiser dans le domaine de la construction et de l'aménagement. Dans le domaine du paysage, peut-on employer le recyclage et le réemploi pour d'autres éléments que le sol ?

## BIBLIOGRAPHIE

ADEME, 2017. *Aménager avec la nature en ville -Des idées préconçues à la caractérisation des effets environnementaux sanitaires et économiques* [en ligne]. [Consulté le 3 juillet 2019]. Disponible à l'adresse : <https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/amenager-avec-la-nature-en-ville-8873.pdf>, 101p.

AGREGE, 2019. *AGREGE - Sols fertiles urbains* [en ligne]. 2019. [Consulté le 22 juillet 2019]. Document interne à VILLES & PAYSAGES, 2 p.

BLANCHART A., 2018. *Vers une prise en compte des potentialités des sols dans la planification territoriale et l'urbanisme opérationnel*. Thèse de doctorat. Université de Lorraine, 360 p.

APUR, 2012. *Les Îlots de Chaleur Urbains à Paris - Cahier #1* [en ligne]. Rapport #1. [Consulté le 2 juillet 2019]. Disponible à l'adresse : [https://www.apur.org/sites/default/files/documents/ilot\\_chaleur\\_urbains\\_paris\\_cahier1.pdf](https://www.apur.org/sites/default/files/documents/ilot_chaleur_urbains_paris_cahier1.pdf), 40 p.

BAIZE D. et GIRARD M-C., 2008. *Référentiel pédologique 2008*. Editions Quae. ISBN 978-2-7592-0186-0, 405 p.

BATAILLARD, P., CHEVRIER B. et HOANG V., 2017. *Valorisation à terre des sédiments de dragage : retour d'expérience en France et à l'international - BRGM/RP-67329-FR*. Guide. 113 p.

BESNARD C., CHARVET R., BANCHU P. et DOUAY F., 2017. *Qualité et usages des sols urbains - Points de vigilance*. 18 p.

BLANC C., LEFEVRE F., BOISSARD G., SCAMPS M. et HAZEBROUCK B., 2012. *Guide de réutilisation hors site des terres excavées en technique routière et dans des projets d'aménagement - BRGM/RP-60013-FR*. 53 p.

BOURDEAU-LEPAGE L. et VIDAL R., 2012. *Nature urbaine en débat : à quelle demande sociale répond la nature en ville ?* [en ligne]. Rapport. [Consulté le 9 juillet 2019]. Disponible à l'adresse : [http://s360241366.onlinehome.fr/agriurbanisme/Bourdeau-Lepage\\_Vidal.pdf](http://s360241366.onlinehome.fr/agriurbanisme/Bourdeau-Lepage_Vidal.pdf), 16 p.

BOURGERY C., AMANN N. et GILLIG C-M., 2008. *L'arbre en milieu urbain - Conception et réalisation de plantations*. Infolio éditions. ISBN 978-2-88474-036-4, 216 p.

BOURGERY C. et MAILLIET L., 1993. *L'arboriculture urbaine*. Editions Institut pour le développement forestier. ISBN 2-904740-37-6, 318 p.

BOUTEFEU E., 2002. *Les citoyens, un désir de nature « sous contrôle », « fleurie et propre »*. [Consulté le 10 juillet 2019]. Disponible à l'adresse : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01799599>.

COM, 2002. *Communication de la commission au conseil, au parlement européen au comité économique et social et au comité des régions - Vers une stratégie thématique pour la protection des sols*. 16 avril 2002.

COM, 2006a. *Communication de la commission au conseil, au parlement européen au comité économique et social et au comité des régions - Stratégie thématique en faveur de la protection des sols*. 22 septembre 2006.

COM, 2006b. *Directive du parlement européen et du conseil définissant un cadre pour la protection des sols et modifiant la directive 2004/35/CE*. 22 septembre 2006.

CORNELIS, J. et HERMIT M., 2004. Biodiversity relationships in urban and suburban parks in Flanders. *Landscape and Urban Planning*. n° 69, p. 285-401.

CROMPTON, J. L., 2001. The impact of parks on property values: a review of the empirical evidence. *Journal of Leisure Research*. n° 33, p. 1-31.

DAMAS O. et COULON A., 2016. *Créer des sols fertiles - Du déchet à la végétalisation urbaine*. Le Moniteur. Editions Le Moniteur. ISBN 978-2-281-14096-5, 335 p.

DNPB, Direction de la nature des Paysages et de la Biodiversité, CG SEINE-SAINT-DENIS et BUREAU DES ÉTUDES GÉNÉRALES, 2014. *Projet de reconstruction de sols fertiles à partir de matériaux recyclés*. Rapport. 12 p.

DUCHAUFFOUR, Philippe, 1983. *Pédogenèse et classification*. Editions Elsevier Masson. ISBN 2-225-79673-4.

EL KHALIL H., SCHWARTZ, C., MOREL J-L. et KUBINIOK J., 2012. *Distribution of major elements and trace metals as indicators of technosolisation of urban and suburban soils*. *Journal of Soils and Sediments*. p 519-530.

GIS SOL, 2011. *L'état des sols en France*. Chromatiques Editions. ISBN 978-2-7380-1296-8, 188 p.

IUSS WORKING GROUP WRB, 2015. *Base de référence mondiale pour les ressources en sols 2015 - Système international de classification des sols pour nommer les sols et élaborer des légendes de cartes pédologiques*. Rapport. 216 p.

KACZYNSKI A. T. et HENDERSON, K.A., 2007. Environmental Correlates of Physical Activity: A Review of Evidence about Parks and Recreation. *Leisure Sciences*. n° 29, p. 315-354.

LAILLE P., COLSON F. et PROVENDIER D., 2013. *Les bienfaits du végétal en ville - Synthèse des travaux scientifiques et méthodes d'analyse*. Synthèse. [Consulté le 11 juillet 2019]. Disponible à l'adresse :[https://www.valhor.fr/fileadmin/A-Valhor/Valhor\\_PDF/CiteVerte\\_BienfaitsVegetalVille2014.pdf](https://www.valhor.fr/fileadmin/A-Valhor/Valhor_PDF/CiteVerte_BienfaitsVegetalVille2014.pdf), 32 p.

LAUGIER R., 2012. *L'étalement urbain en France - Synthèse documentaire* [en ligne]. Synthèse documentaire. [Consulté le 25 juin 2019]. Disponible à l'adresse : [http://www.cdu.urbanisme.equipement.gouv.fr/IMG/pdf/Synthese\\_Etalement\\_Urbain2012.pdf](http://www.cdu.urbanisme.equipement.gouv.fr/IMG/pdf/Synthese_Etalement_Urbain2012.pdf), 21 p.

LEGIFRANCE, n.d. Textes de lois. In : [en ligne]. [Consulté le 20 juin 2019]. Disponible à l'adresse : <https://www.legifrance.gouv.fr/>.

LUTTIK, Joke, 2000. The Value of Trees, Water and Open Space as Reflected by House Prices in the Netherlands. *Landscape and Urban Planning*. Vol. 48, p. 161-167.

MEDDLE et MAAF, 2015. *Propositions pour un cadre national de gestion durable des sols*. septembre 2015.

MERCIER M., 2016. *Densification et renouvellement des communes périurbaines et rurales* [en ligne]. Mémoire de Master. Angers. [Consulté le 25 juin 2019]. Disponible à l'adresse : <http://dune.univ-angers.fr/fichiers/15005863/20162MGEO6093/fichier/6093F.pdf>, 62 p.

PADUART A., GLORIEUX J-F. et GROSJEAN F., 2015. *Stratégie réemploi des matériaux de construction*. [Consulté le 12 juillet 2019]. Disponible à l'adresse : [http://www.confederationconstruction.be/Portals/19/Plateforme%20R%C3%A9emploi/20150506\\_strategie\\_reemploi\\_MCD\\_version\\_print.pdf](http://www.confederationconstruction.be/Portals/19/Plateforme%20R%C3%A9emploi/20150506_strategie_reemploi_MCD_version_print.pdf), 12 p.

PLANTE & CITÉ, 2016. *Des solutions végétales pour la ville : bien les choisir et concevoir*. 67 p.

POMMIER G., PROVENDIER D., GUTLEBEN C. et MUSY M., 2014. *Impacts du végétal en ville*. 61 p.

PROVENDIER D., 2017. *URBIO - Diversité des aires urbaines - Fiche de synthèse des travaux de recherche* [en ligne]. [Consulté le 11 juillet 2019]. Disponible à l'adresse : [https://www.nature-en-ville.com/sites/nature-en-ville/files/2018-05/urbio\\_vf%5B1%5D.pdf](https://www.nature-en-ville.com/sites/nature-en-ville/files/2018-05/urbio_vf%5B1%5D.pdf).

PROVENDIER D. et LAÏLLE P., 2013. *Les bienfaits du végétal en ville – Synthèse des travaux scientifiques et méthode d'analyse* [en ligne]. juillet 2013. [Consulté le 1 juillet 2019]. Disponible à l'adresse : [https://www.valhor.fr/fileadmin/A-Valhor/Valhor\\_PDF/Plante\\_Cite\\_bienfaitsduvegetal\\_Juillet2013.pdf](https://www.valhor.fr/fileadmin/A-Valhor/Valhor_PDF/Plante_Cite_bienfaitsduvegetal_Juillet2013.pdf), 32 p.

RNSA, n.d. *Guide d'information : Végétation en ville* [en ligne]. Guide. [Consulté le 30 juillet 2019]. Disponible à l'adresse : <https://www.vegetation-en-ville.org/wp-content/themes/vegetationenville/PDF/Guide-Vegetation.pdf?v=2018.06.18-11.56.35>, 36 p.

ROBERT A. et YENGUÉ J-L., 2018. *Les citadins, un désir de nature « sous contrôle », « fleurie et propre »*, [Consulté le 9 juillet 2019]. Disponible à l'adresse : <https://journals.openedition.org/metropoles/5619>.

ROSSIGNOL J-P., 2015. *Présentation générale des sols en milieu urbain*. Fiche de synthèse.

ROTOR, GHYOOT M., DEVLIEGER L., BILLIET L. et WARNIER A., 2018. *Déconstruction et réemploi - Comment faire circuler les éléments de construction*. Editions Presses polytechniques et universitaires romandes. ISBN 978-2-88915-239-1.

SAINT-ETIENNE MÉTROPOLE, 2015. *Novaciéries : une démarche exemplaire de gestion des terres polluées mise en oeuvre par Saint-Etienne Métropole*. In : *Le hub des solutions climat* [en ligne]. 3 novembre 2015. [Consulté le 24 juillet 2019]. Disponible à l'adresse : <https://www.plateformesolutionsclimat.org/solution/saint-etienne-metropole-des-reseaux-de-chaaleur-innovants-2/>.

SAINT-ETIENNE MÉTROPOLE, CAP MÉTROPOLE, VILLE DE SAINT-CHAMOND et CERPI, n.d. *Novaciéries - Une ambition de Saint-Etienne Métropole*.

SEGUR F., BENASSI A., NOYEL A., NEYRET J. et DURPREY F., 2011. *La Charte de l'Arbre* [en ligne]. novembre 2011. [Consulté le 7 juillet 2019]. Disponible à l'adresse : [https://www.grandlyon.com/fileadmin/user\\_upload/media/pdf/environnement/arbres/20111214\\_gl\\_chartearbre.pdf](https://www.grandlyon.com/fileadmin/user_upload/media/pdf/environnement/arbres/20111214_gl_chartearbre.pdf), 43 p.

UNEP, 2012. *Travaux des sols, supports de paysage - Caractérisation, amélioration, valorisation et reconstitution* [en ligne]. décembre 2012. [Consulté le 28 mai 2019]. Disponible à l'adresse : <http://www.lesentreprisesdupaysage.fr/tout-savoir/r%C3%A8gles-professionnelles/les-r%C3%A8gles-parues/travaux-des-sols-supports-de-paysage-caract%C3%A9risation-am%C3%A9lioration-valorisation-et-reconstitution>, 57 p.

VÉRON, Jacques, 2007. *La moitié de la population mondiale vit en ville* [en ligne]. juin 2007. [Consulté le 1 juillet 2019]. Disponible à l'adresse : [https://www.ined.fr/fichier/s\\_rubrique/19103/435.fr.pdf](https://www.ined.fr/fichier/s_rubrique/19103/435.fr.pdf), 4 p.

## SITOGRAPHIE

[1] ADEME, n.d. *Novaciéries - Zac des aciéries*. In : [en ligne]. n.d. [Consulté le 24 juillet 2019]. Disponible à l'adresse :

[https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/eas\\_reconversion\\_metallurgie\\_activ\\_eco\\_logements\\_st\\_chamond.pdf](https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/eas_reconversion_metallurgie_activ_eco_logements_st_chamond.pdf).

[2] BANQUE MONDIALE, 2019. Population urbaine. In : [en ligne]. 2019. [Consulté le 31 juillet 2019]. Disponible à l'adresse : <https://donnees.banquemondiale.org/indicateur/SP.URB.TOTL.IN.ZS?end=2018&locations=FR&start=1992>.

[3] BOUGHRIET R., 2015. La loi biodiversité reconnaît les sols comme patrimoine commun de la nation. In : *Actu-Environnement* [en ligne]. 22 juin 2015. [Consulté le 12 juillet 2019]. Disponible à l'adresse : <https://www.actu-environnement.com/ae/news/loi-biodiversite-sols-reconnaissance-patrimoine-commun-nation-code-environnement-27058.php4>.

[4] BOUTEFEU E., 2007a. La nature en ville : des enjeux paysagers et sociétaux — Géoconfluences. In : [en ligne]. 2007. [Consulté le 1 août 2019]. Disponible à l'adresse : <http://geoconfluences.ens-lyon.fr/doc/transv/paysage/PaysageViv.htm>.

[5] BOUTEFEU E., 2007b. Paysages urbains et demande sociale de nature en ville : une méthodologie d'enquête — Géoconfluences. In : [en ligne]. 2007. [Consulté le 9 juillet 2019]. Disponible à l'adresse : <http://geoconfluences.ens-lyon.fr/doc/transv/paysage/PaysageFaire.htm>.

[6] IDFRICHES, 2018. AGREGE 2 : des démonstrateurs en cours de préparation. In : *IDfriches* [en ligne]. 16 avril 2018. [Consulté le 22 juillet 2019]. Disponible à l'adresse : <https://www.idfriches-auvergnhonealpes.fr/actualite/agrege-2-des-demonstrateurs-en-cours-de-preparation>.

[7] LAROUSSE Éditions, n.d. Encyclopédie Larousse en ligne - santé publique. In : [en ligne]. n.d. [Consulté le 22 juillet 2019]. Disponible à l'adresse : [http://www.larousse.fr/encyclopedie/divers/santé\\_publicue/90008](http://www.larousse.fr/encyclopedie/divers/santé_publicue/90008).

[8] MARTIN, D., 2013. Densification urbaine, vraie fausse solution au futur antérieur? In : *ECONOMIE DURABLE* [en ligne]. 2013. [Consulté le 11 juillet 2019]. Disponible à l'adresse : <http://economiedurable.over-blog.com/article-densification-urbaine-vraie-fausse-solution-au-futur-anterieur-119717420.html>.

[9] OMS, 2019. OMS | Constitution de l'OMS: ses principes. In : *WHO* [en ligne]. 2019. [Consulté le 1 juillet 2019]. Disponible à l'adresse : <http://www.who.int/about/mission/fr/>.

[10] PERSPECTIVE MONDE, 2017. France - Population urbaine (% de la population totale) | Statistiques. In : [en ligne]. 2017. [Consulté le 1 juillet 2019]. Disponible à l'adresse : <http://perspective.usherbrooke.ca/bilan/tend/FRA/fr/SP.URB.TOTL.IN.ZS.html>.

[11] SIRAMI C., THEAU J-P. et RYSCHAWY J., 2013. Services écosystémiques dans les agroécosystèmes – Dictionnaire d'agroécologie. In : [en ligne]. 15 août 2013. [Consulté le 15 juillet 2019]. Disponible à l'adresse : <https://dicoagroecologie.fr/encyclopedie/services-ecosystemiques-dans-les-agroecosystemes/>.

[12] UNEP, n.d. Le Palmarès des villes les plus vertes de France. In : *Unep* [en ligne]. n.d. [Consulté le 6 août 2019]. Disponible à l'adresse : <http://www.lesentreprisesdupaysage.fr/tout-savoir/etudes-chiffres-clés/le-palmarès>.

[13] VIBERT E., 2018. Envie de vert en ville ? Demandez votre permis de végétaliser ! In : *We Demain, une revue pour changer d'époque* [en ligne]. 12 novembre 2018. [Consulté le 10 juillet 2019]. Disponible à l'adresse : [https://www.wedemain.fr/Envie-de-vert-en-ville-Demandez-votre-permis-de-vegetaliser-\\_a3719.html](https://www.wedemain.fr/Envie-de-vert-en-ville-Demandez-votre-permis-de-vegetaliser-_a3719.html).

Année universitaire : **2018/2019**

Spécialité/Mention : **Paysage**

Spécialisation/Parcours :

**Paysage : opérationnalité et projet**

### 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)

## Palette végétale : intégrer les sols construits et le milieu urbain

Dans le contexte d'un projet expérimental mené par AGREGE

Par : Louison LEROY

## ANNEXES

*Soutenu à Angers le 5 Septembre 2019*

**Devant le jury composé de :**

Président : Pierre-Emmanuel Bournet

Autres membres du jury (Nom, Qualité)

Maître de stage : Laurent Beyron

Enseignant référent : Laure Beaudet

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

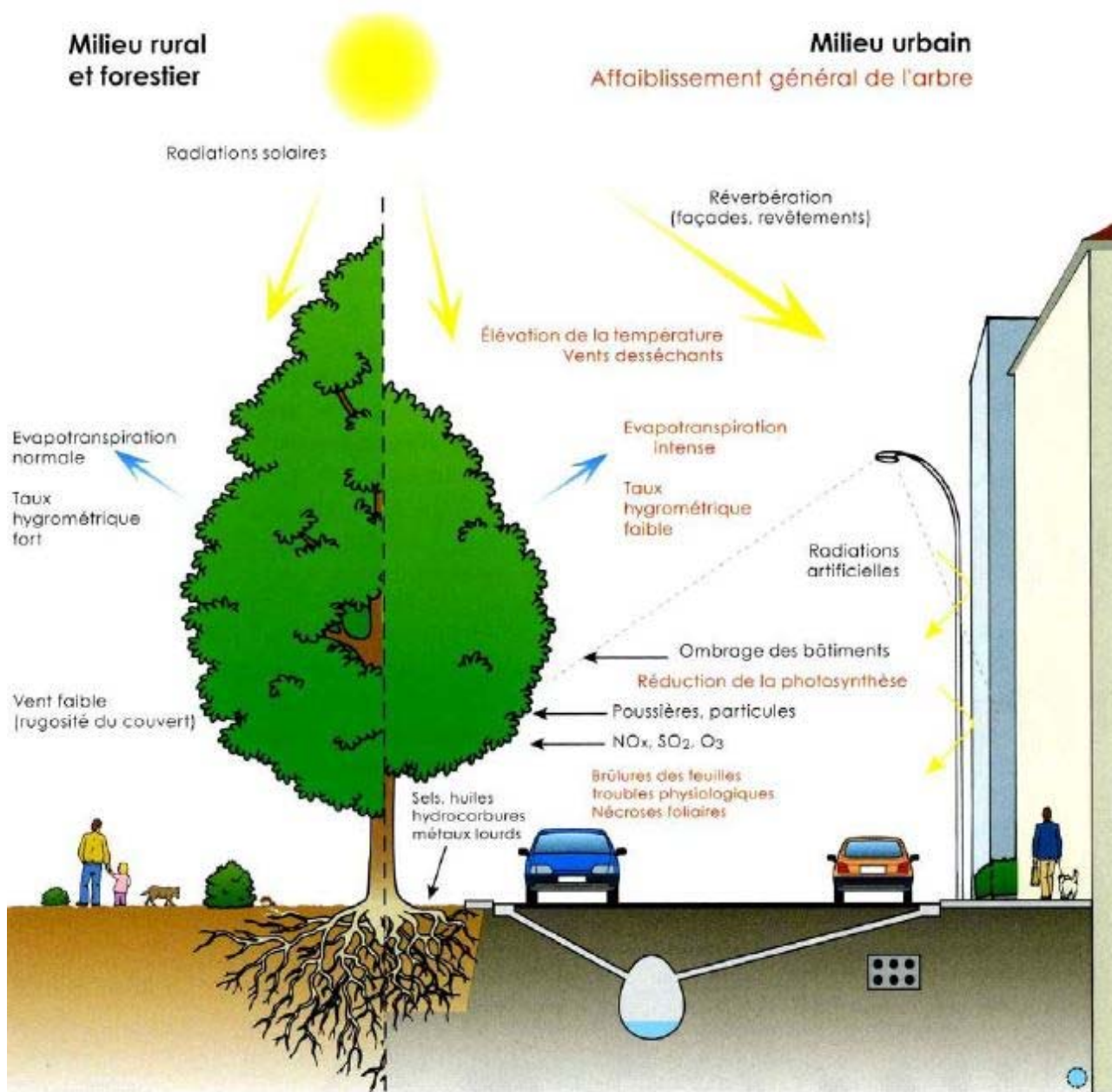
Ce document est soumis aux conditions d'utilisation

«Paternité-Pas d'Utilisation Commerciale-Pas de Modification 4.0 France»

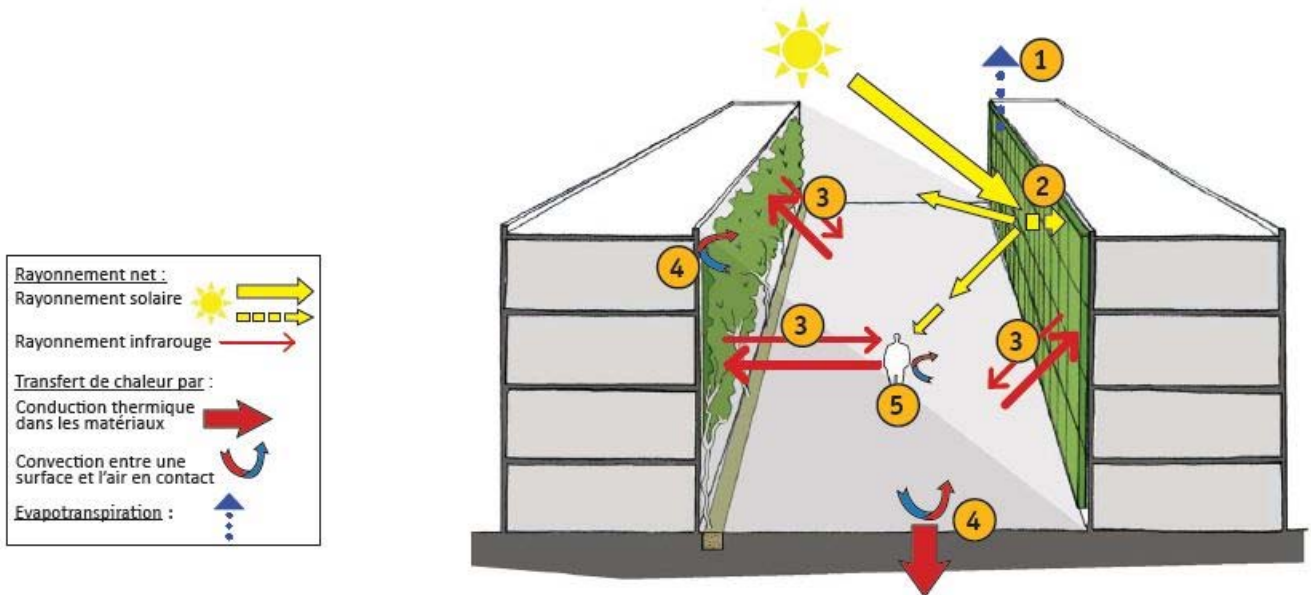
disponible en ligne <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.fr>



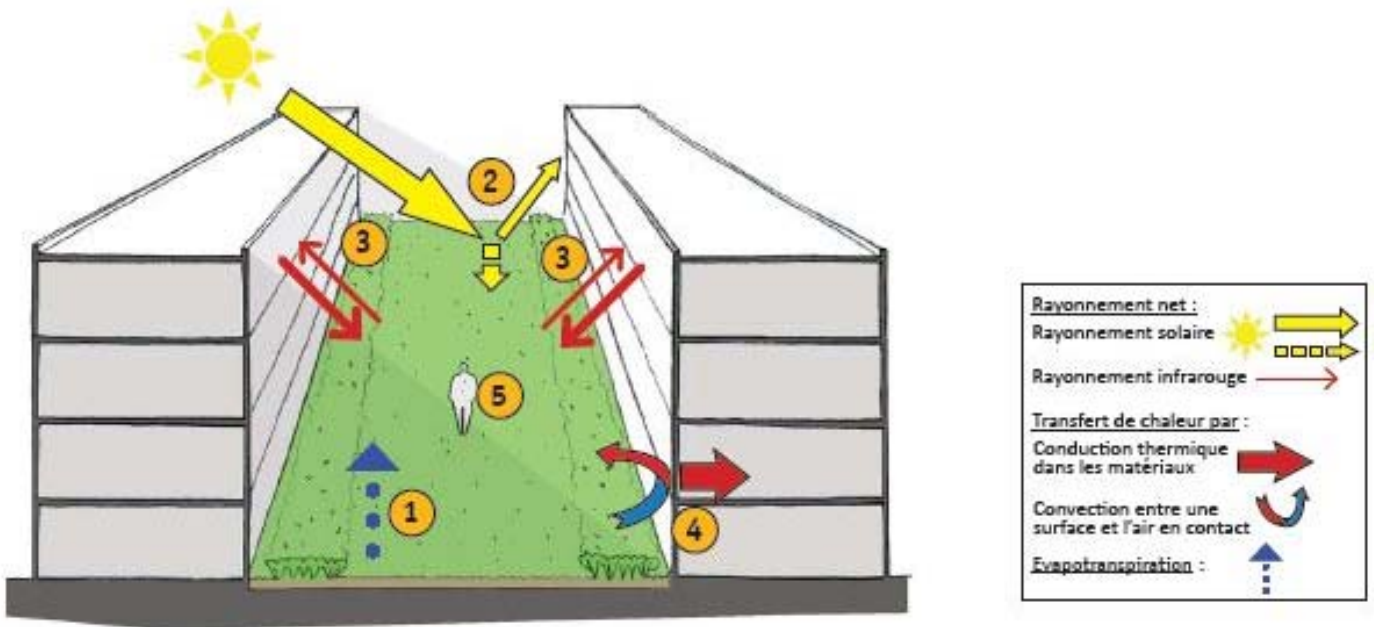
ANNEXE I : Impact du milieu urbain sur les arbres – Source : (Bourgerly et al., 2008)



ANNEXE II : Influence des façades végétalisées et d'une surface enherbée dans la "rue canyon" – Source : (Pommier et al.,2014)



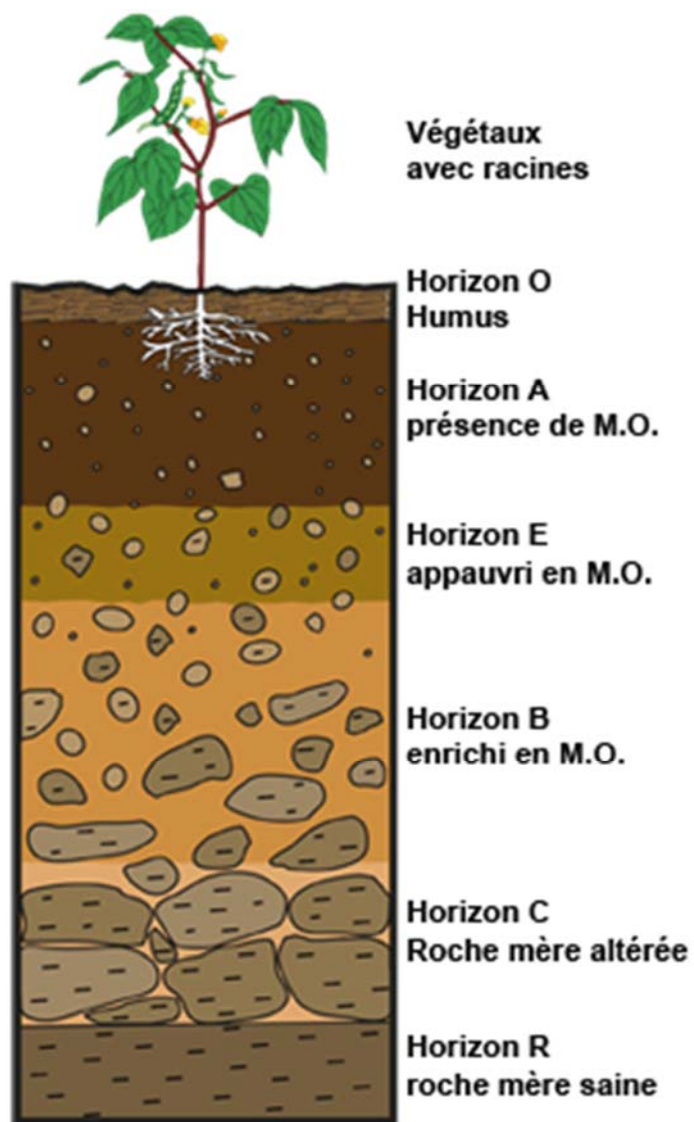
Influence des façades végétalisées dans la « rue canyon »



Influence des surfaces enherbées dans la « rue canyon »



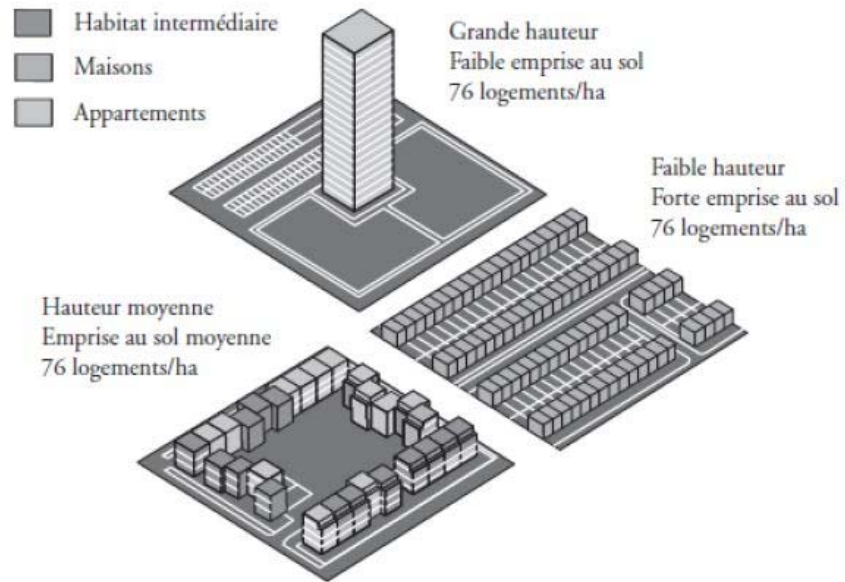
ANNEXE III : Profil de sol – Source : (Descroix.,2016)



ANNEXE IV : Moteurs de l'étalement urbain – Source : (Laugier, 2012)

<b>Moteurs de l'étalement urbain [20]</b>		
<p><b>Facteurs macro économiques</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Croissance économique</li> <li>• Mondialisation</li> <li>• Intégration européenne</li> </ul> <p><b>Facteurs micro-économiques</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Augmentation du niveau de vie</li> <li>• Coût du foncier</li> <li>• Disponibilité de terres agricoles bon marché</li> <li>• Compétition entre municipalités</li> </ul>	<p><b>Facteurs démographiques</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Croissance démographique</li> <li>• Augmentation de la taille du ménage</li> </ul> <p><b>Préférences résidentielles</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Plus d'espace par personne</li> <li>• Préférences de logement</li> </ul> <p><b>Transports</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Possession d'une automobile</li> <li>• Disponibilité des routes</li> <li>• Coût faible du carburant</li> <li>• Mauvaise qualité des transports</li> </ul>	<p><b>Problèmes urbains</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Mauvaise qualité de l'air</li> <li>• Bruit</li> <li>• Appartements petits</li> <li>• Insécurité</li> <li>• Problèmes sociaux</li> <li>• Manque d'espaces verts</li> <li>• Mauvaise qualité des établissements scolaires</li> </ul> <p><b>Cadre réglementaire</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Faible planification d'utilisation du sol</li> <li>• Faible mise en œuvre des plans</li> <li>• Manque de coordination verticale et horizontale</li> </ul>

ANNEXE V : Modulation morphologique de la densité et densification en dents creuses – Source : (Ile de France, 2015) et (Urbanews, 2011)



Modulation morphologique de la densité



Densification en dents creuses

ANNEXE VI : Modes de formation des différentes références d'anthrosols – Source : (Baize, Girard, 2008)

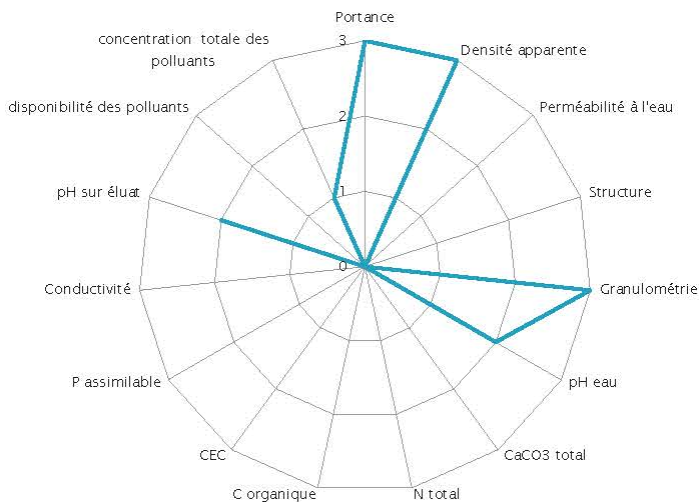
Anthrosols transformés	Anthrosols archéologiques	Anthrosols artificiels	Anthrosols reconstitués	Anthrosols construits	
<p>Profondes transformations (dont apports) liées à activités agricoles</p> <p>&gt; 50 cm</p>	<p>Profondes transformations (dont apports) liées à activités humaines</p> <p>&gt; 50 cm</p>	<p>Matériaux anthropiques divers</p> <p>Z</p> <p>&gt; 50 cm</p>	<p>Matériaux pédologiques apportés</p> <p>-tp</p> <p>&gt; 50 cm</p>	<p>Matériaux technologiques apportés (déchets)</p> <p>Ztc</p> <p>&gt; 50 cm</p>	
Partie inférieure du solum naturel initial	Partie inférieure du solum naturel initial	Solum naturel initial enfoui et éventuellement tronqué	?	?	
Actions volontaires répétées, transformations lentes	Actions involontaires répétées et anciennes, transformations lentes	Accumulation lente ou apports de décombres ou de déchets en zones urbaines, industrielles ou minières	Action volontaire instantanée de « génie pédologique »	Action volontaire instantanée de « génie pédologique »	

ANNEXE VII : Evaluation semi-quantitative des services écosystémiques rendus par les sols construits, en comparaison des pratiques habituelles basées sur l'utilisation de ressources naturelles – Sources : (Damas et Coulon, 2016)

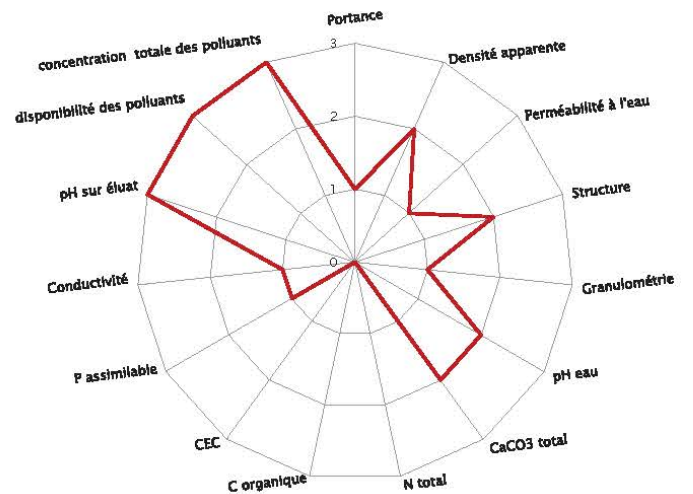
Classes	Services	Sous-services		Usage "square & parc"		Usage "arbre de plantation"	
		Consommation CO <sub>2</sub>	Production O <sub>3</sub>	Terre végétale	Sol construit	Mélange terre-pierre	Sol construit
Régulation	Régulation de la qualité de l'air	Consommation CO <sub>2</sub>	Production O <sub>3</sub>	++	++	++	++
		Particules fines (poussières)		+	+	++	++
	Régulation du climat	Climat local	+++		+++	+++	+++
		Climat global	++		+++	+	+++
	Traitement des déchets	Recyclage	0		+++	0	+++
		Transfert de polluants	++		+	++	+
	Régulation des nuisances sonores	Ecran anti-bruit	0		0	+	+
	Régulation des aléas naturels	Inondations	+++		+++	+++	+++
		Erosion	++		++	+	++
	Support	Réservoir pour la biodiversité	Habitat pour la faune du sol		+++	++	++
Voirie lourde				0	+	0	
Support physique		Voirie légère		0	0	++	
		Circulation piétons		+	+	++	
		Réseaux VRD		++	++	++	
Approvisionnement	Aliments	Céréales et légumes		0	0	0	
		Fruits		0	+	+	
	Matériaux	Remblais		+	0	0	
		Géothermie de surface		++	++	+	
	Ressources ornementales	Pelouses		+++	+++	++	
		Arbres		+	+	++	
		Fleurs		++	++	+	
Culturel	Agrément de l'environnement	Activités sportives et de loisirs		+	+	0	
		Paysage / esthétique		+++	+++	+++	

projection ou mesure indirecte

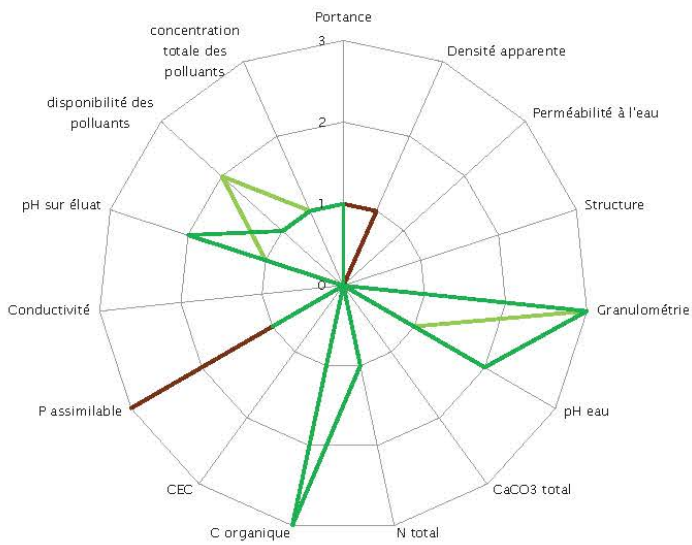
# ANNEXE VIII : Exemples de matériaux pour les quatre typologies identifiées dans le programme ADEME-SITERRE – Sources : (Damas et Coulon, 2016)



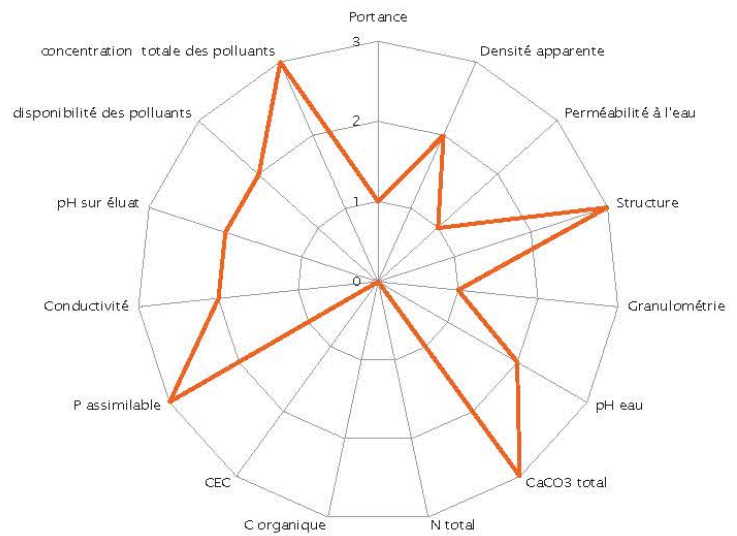
Group 1 : briques, tuiles et céramiques



Group 2 : terres d'excavation

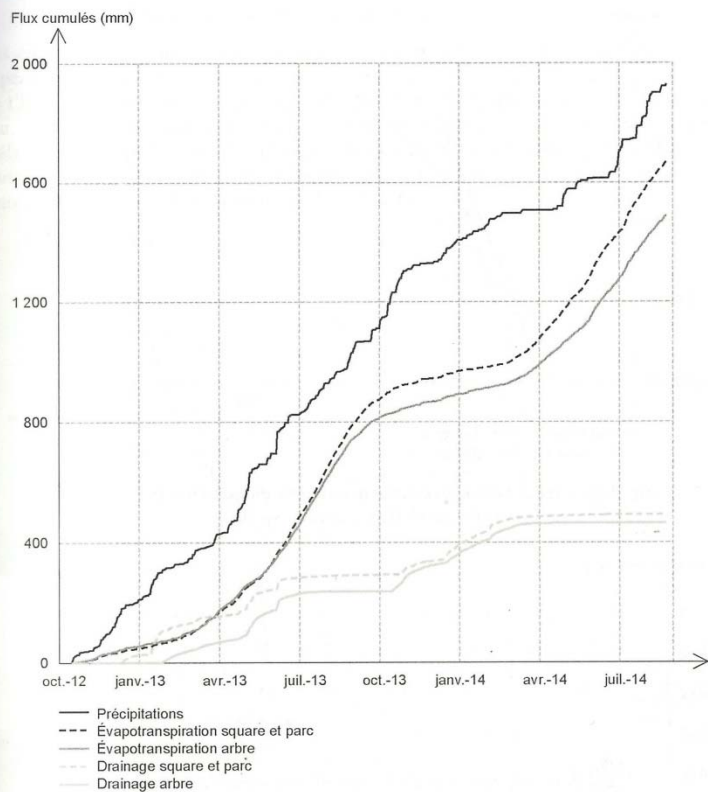


Group 3 : Déchets de sylviculture, jardins municipaux, tissus végétaux

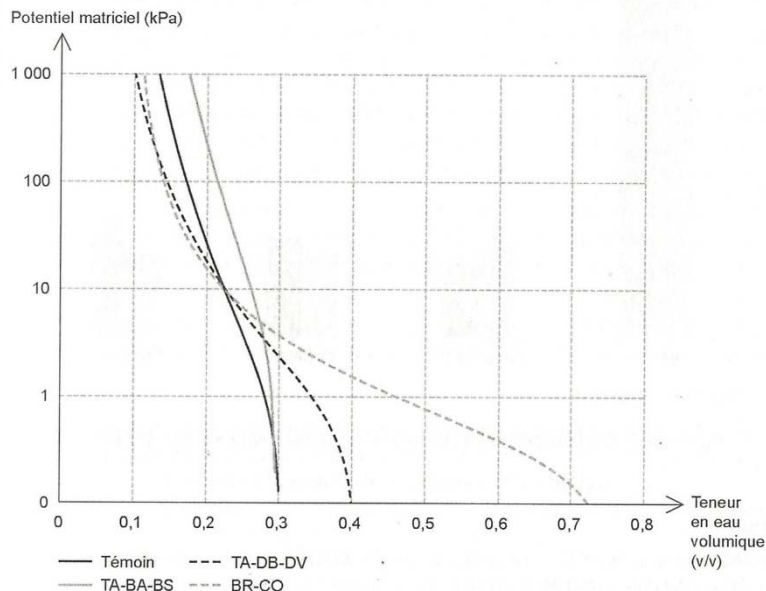


Group 4 : Boue de dragage

# ANNEXE IX : Résultats des expériences pour évaluer les fonctions des sols construits – Sources : (Damas et Coulon, 2016)

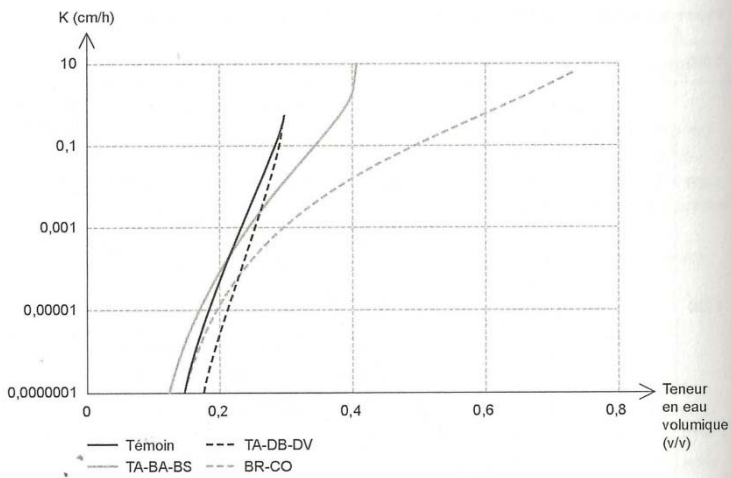


Courbes cumulées des précipitations, de l'évapotranspiration et du drainage exprimés en mm pour les deux modalités de sols

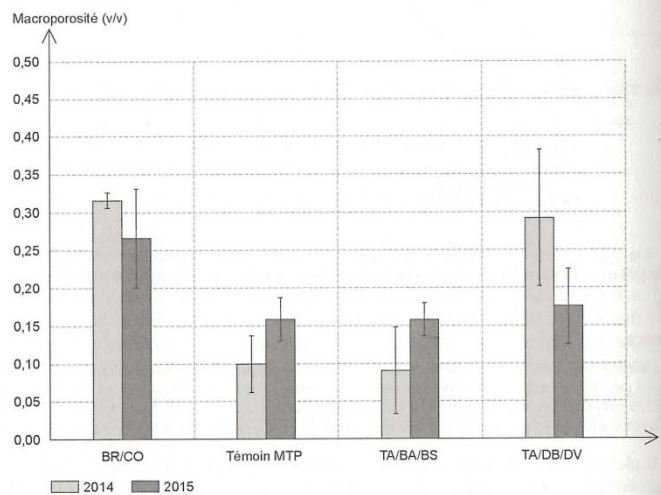


Courbes de rétention en eau des mélanges en 2014

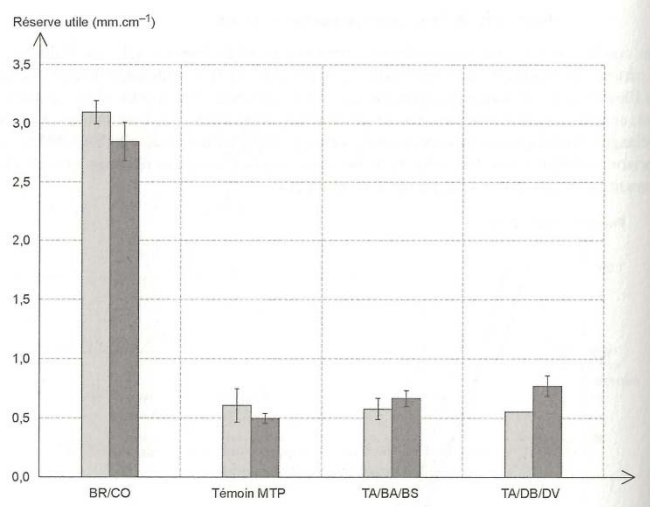
- TA** = terre excavée acide
- DB** = Déchets de déconstruction de bâtiment
- DV** = Déchets verts broyés
- BA** = Ballast
- BS** = Boues de STEP
- BR** = Briques
- CO** = Compost
- Témoin MTP** : témoin Mélange terre-pierre



Conductivité hydraulique non saturée du matériau de croissance et des matériaux-squelettes en 2014



Evolution de la macroporosité des matériaux en 2014 et 2015



Evolution de la réserve utile en eau des matériaux en 2014 et 2015

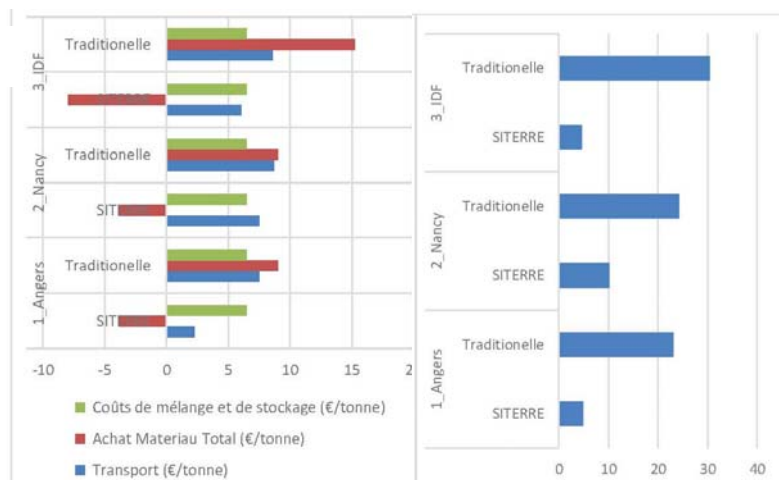
# ANNEXE X : Résultat des expérimentations des coûts pour les différents horizons dans le cadre du programme ADEME-SITERRE –

Source : (Damas et Coulon, 2016)

	Angers		Nancy		Paris	
	Croissance	Squelette	Croissance	Squelette	Croissance	Squelette
<b>Filière traditionnelle</b>	Terre végétale : 100%	Terre végétale : 32%, Calcédoine : 68%	Terre végétale : 100%	Terre végétale : 45%, Pouzzolane : 55%	Terre végétale : 100%	Terre végétale : 45%, Pouzzolane : 55%
<b>Filière SITERRE</b>	Terre excavée : 83%, Compost : 17%	Terre excavée : 34%, Béton concassé : 63%, Déchets verts broyés : 3%	Terre excavée : 83%, Compost : 17%	Terre excavée : 34%, Béton concassé : 63%, Déchets verts broyés : 3%	Terre excavée : 83%, Compost : 17%	Terre excavée : 34%, Béton concassé : 63%, Déchets verts broyés : 3%

Détail des proportions de mélanges retenus pour les estimations

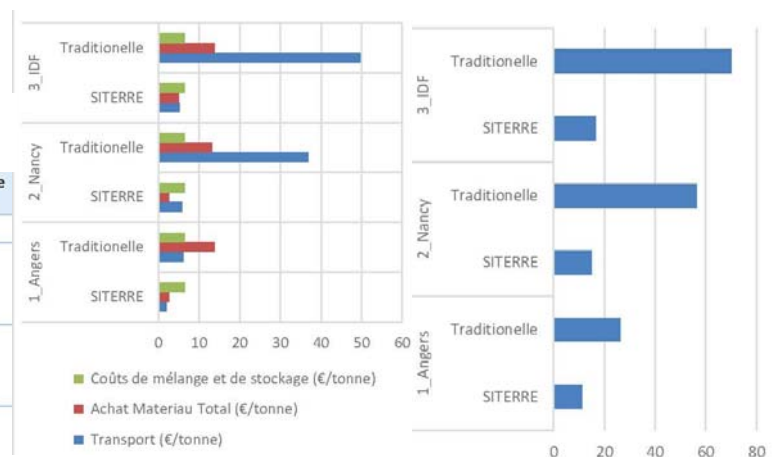
## Horizon de croissance



Structure des coûts (en €/tonne) par filière et par coût total des mélanges

## Horizon squelette

	Transport (€/tonne)	Achat Matériau Total (€/tonne)	Coûts de mélange et de stockage (€/tonne)
<b>1_Angers</b>			
SITERRE	1,98 €	2,56 €	6,5 €
Traditionnelle	6,04 €	13,72 €	6,5 €
<b>2_Nancy</b>			
SITERRE	5,83 €	2,56 €	6,5 €
Traditionnelle	36,84 €	13,16 €	6,5 €
<b>3_IDF</b>			
SITERRE	5,17 €	5,01 €	6,5 €
Traditionnelle	49,75 €	13,79 €	6,5 €



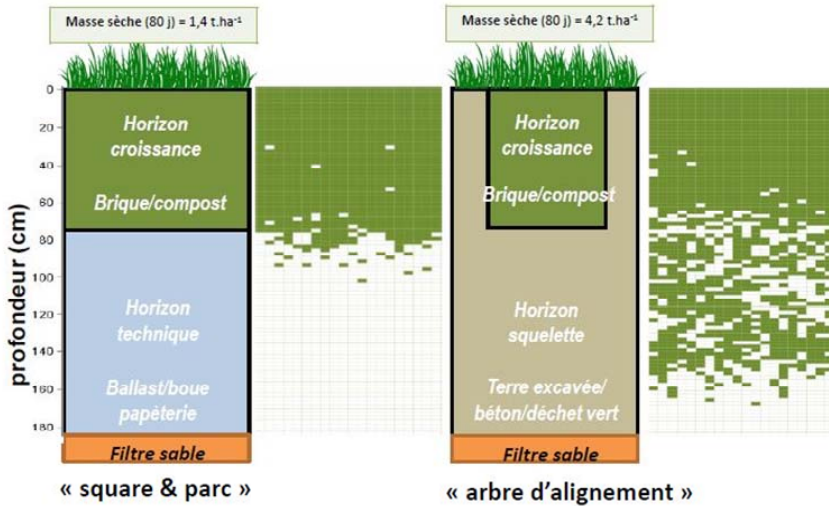
Structure des coûts (en €/tonne) par filière et par coût total des mélanges

Résultat des estimations des coûts (en €/tonne)

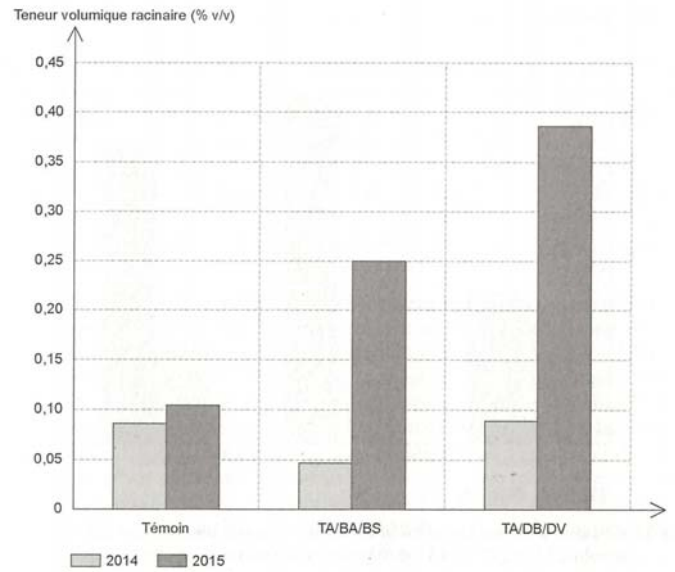


# ANNEXE XI : Résultats des expériences menées sur l'implantation de végétation sur des sols construits dans le cadre du programme ADEME-SITERRE – Source : (Damas et Coulon, 2016)

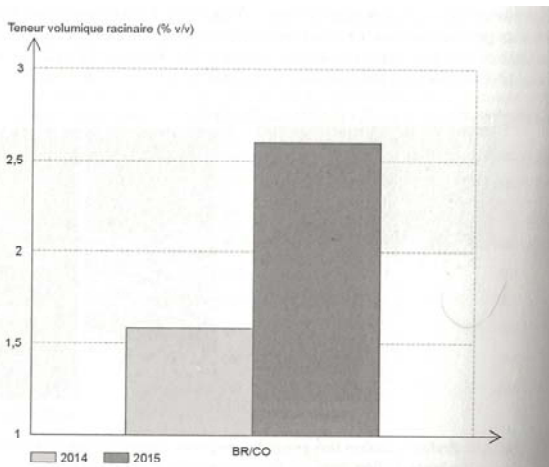
ANNEXE XI : Résultats des expériences menées sur l'implantation de végétation sur des sols construits dans le cadre du programme ADEME-SITERRE – Source : (Damas et Coulon, 2016)



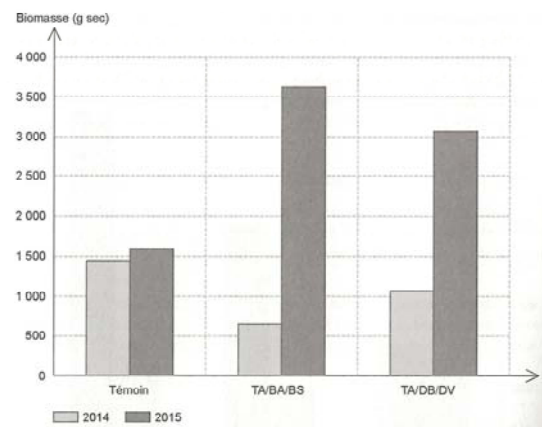
« square & parc »  
« arbre d'alignement » (site expérimental d'Homécourt)



Distribution de la biomasse racinaire des Acer platanoides dans l'horizon squelette en fonction du temps (site expérimental d'Angers)



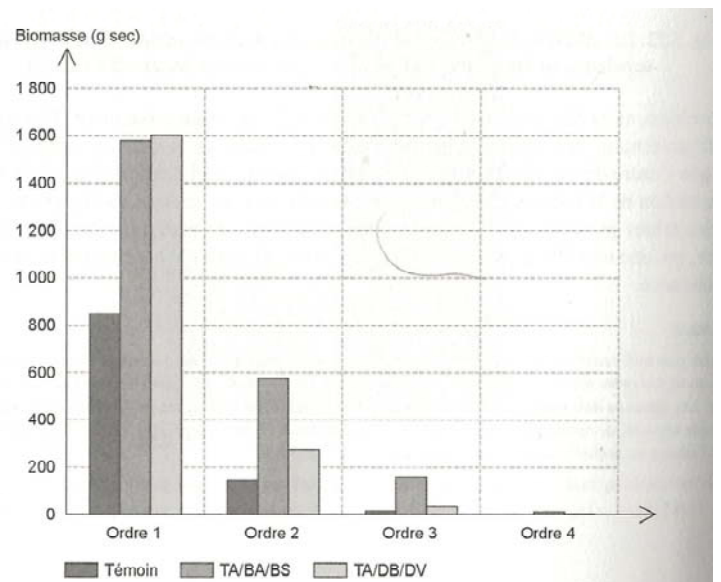
Distribution de la biomasse racinaire (teneur volumique) des Acer platanoides dans l'horizon de croissance en fonction du temps (site expérimental d'Angers)



Biomasse aérienne totale des arbres se développant dans les matériaux-squelettes-témoins, TA/BA/BS et TA/DB/DV (site expérimental d'Angers)

- TA = terre excavée acide
- DB= Déchets de déconstruction de bâtiment
- DV= Déchets verts broyés
- BA= Ballast
- BS= Boues de STEP
- BR= Briques
- CO= Compost
- Témoin MTP : témoin Mélange terre-pierre

Ordre de ramification des arbres en fonction du matériau-squelette en 2015 (site expérimental d'Angers)



FICHE  
**4.02**

**Plantation d'un alignement avec un mélange terre-pierres constitué de matériaux recyclés : terre en place et granulats de béton concassé**

**Structure à l'origine de la réalisation, partenaires impliqués**

Ville de Luisant (maîtrise d'ouvrage)  
Agence Roumet-Guitel (maîtrise d'œuvre)

**Lieu de la réalisation**

Luisant, agglomération de Chartres (Eure-et-Loir)

**Date de la réalisation**

2003

**Le projet en quelques lignes**

L'alignement se situe sur la nationale N10, axe Paris-Tours, empruntée aujourd'hui par 10 000 à 12 000 véhicules par jour dont une ligne de bus régulière et des poids lourds. L'alignement d'origine est constitué d'environ 150 marronniers plantés au début du 20<sup>e</sup> siècle. À partir de 1960, l'urbanisation progressive de Luisant, commune rurale jusqu'alors, modifie les conditions de vie des arbres au niveau du sol : imperméabilisation, interventions successives pour installation et entretien des réseaux, trafic routier et stationnement croissants. En 1996, presque 90 % des marronniers sont sénescents ; devenus dangereux, ils sont abattus, ne laissant plus qu'une vingtaine de sujets. Cet abattage massif décide la mairie à réaménager les abords de son axe routier principal et à remplacer intégralement cet alignement.

**Originalité du projet**

Cette réalisation est originale à deux titres :

- pour les tranchées en mélange terre-pierres, de la terre présente sur site a été réemployée (limons de Beauce, sol à horizons peu remaniés sauf les vingt premiers cm en surface) ;
- des granulats de béton recyclés, issus de chantier de démolition, ont été utilisés.

**Plantation**

Le choix de l'essence à planter s'est porté sur *Sophora japonica*, principalement en raison de son originalité d'usage dans ce territoire, ses besoins en eau modérés et son adaptation aux pH élevés (crainte vis-à-vis de l'usage de concassé de béton). Le cahier des charges a imposé un approvisionnement en végétaux auprès d'une pépinière avec des sols et un climat analogues au site de plantation final (pépinières à Chambéry). Le calibre des arbres était le plus petit possible dans un souci d'optimisation de la reprise (18/20 cm).

## Plantation d'un alignement avec un mélange terre-pierres constitué de matériaux recyclés : terre en place et granulats de béton concassé

### Itinéraire technique

Le mélange terre-pierres est constitué de deux volumes de granulats de béton recyclé de calibre 40/80 à 40/100 et d'un volume de terre en place, prélevée dans les tranchées réalisées sur le chantier. À ce mélange est rajouté environ 10 % en volume de compost de déchets verts. Des analyses chimiques sont réalisées pour le compost et la terre utilisés. Les arbres sont plantés directement dans le mélange terre-pierres.

Le cadre de plantation final (zone non minéralisée) est large (5 m × 2,5 m). En surface du mélange sont positionnés 10 cm de limons seuls issus du site. La couverture végétale de cet espace est initialement plantée. La végétalisation en pied d'arbre est constituée de *Berberis* entourée d'une surface semi-extensive composée de graminées à gazon (*ray-grass*, fétuque élevée, fétuque ovine), d'une graminée haute (*Calamagrostis argentea*), de coquelicots et de bulbes (jonquille). Le mode de gestion mis en œuvre après livraison de l'ouvrage n'a pas permis de pérenniser toutes les essences de départ. Le couvert est aujourd'hui composé de *Berberis* et de graminées tondues.

Les zones de stationnement (70 % du linéaire) sont revêtues d'une couche bitumineuse non perméable, l'entreprise mandatée pour la réalisation du revêtement n'utilisant pas d'enrobés perméables.

### Bilan

En 2013, les *Sophora* sont en parfaite santé. Aucun signe de chlorose n'a été constaté. Les arbres sont poussants avec des longueurs annuelles de rameaux caractéristiques d'une bonne croissance. Les arbres plantés en 18/20 en 2003 possédaient, en juillet 2008, un calibre de 33 cm (une seule observation réalisée). Ils ont malheureusement subi une forte taille inadaptée.

Une observation de la couche superficielle du mélange terre-pierres (limite inférieure entre le mélange terre-pierres et la couche superficielle de 10 cm de limons) a permis d'observer les concassés de béton. Un échantillon de terre au contact de concassés a été prélevé dans les dix premiers centimètres du mélange. La réaction à l'acide chlorhydrique indique un sol calcaire (estimation d'un  $\text{pH}_{\text{eau}}$  compris entre 8 et 8,5). Il est à noter que le prélèvement de l'échantillon a provoqué le fractionnement partiel de quelques granulats de béton et, par conséquent, l'incorporation de particules. Une observation à la loupe binoculaire révèle que pour la fraction supérieure à 2 mm (non transmise pour analyses de sol), le béton représente 10 % du volume. Pour la fraction inférieure à 2 mm (envoyée en laboratoire), on observe environ 1 à 2 % maximum en volume de particules de béton (dans la classe des sables grossiers uniquement).

Les résultats d'analyse de sol pour l'échantillon prélevé indiquent des valeurs de pH identiques entre 2003 et 2008, ce qui signifie que le béton n'a pas induit de hausse de pH sur 5 ans. Pour 2008, les teneurs en calcaire total correspondent à une classe de « sols faiblement calcaires ». Les sols naturels et cultivés autour de Luisant peuvent très bien révéler des valeurs analogues, voire supérieures sans qu'aucun béton n'y soit présent (région géologique du Bassin parisien).

## ANNEXE XII

### FICHE 4.02

#### **Plantation d'un alignement avec un mélange terre-pierres constitué de matériaux recyclés : terre en place et granulats de béton concassé**

Pour le calcaire actif, on considère communément qu'une teneur de 100 g/kg est la limite moyenne au-delà de laquelle un risque de chlorose ferrique est induit pour les végétaux peu adaptés aux terrains calcaires. Avec 16 g/kg, la teneur mesurée pour la terre du mélange est bien en deçà.

Compte tenu de ces résultats, il est possible de considérer que la présence de béton n'a pas d'impact sur le pH du sol, d'autant plus que de fins débris de béton étaient présents en faible quantité dans l'échantillon de terre envoyé pour analyse.

#### **Remerciements**

François Roumet, agence Roumet-Guitel et services techniques de la ville de Luisant



**Photo 27. Profil de sol avant travaux**

Ce profil de sol figure bien la terre en place réemployable.



**Photo 28. Alignement de *Sophora* une fois planté**

ANNEXE XIII : Mise en œuvre de sols construits et une strate arborée en grandeur nature menée par le programme ADEME-SITERRE – Source : (Damas et Coulon, 2016)

FICHE  
**4.06**

**Reconstitution de sols fertiles à partir de matériaux recyclés**

**Structure à l'origine de la réalisation, partenaires impliqués**

Conseil Départemental de Seine-Saint-Denis (maîtrise d'ouvrage)

Groupe ECT (Enviro Conseil et Travaux)

IEES-Paris (Institut d'écologie et des sciences de l'environnement de Paris)

**Lieu de la réalisation**

Villeneuve-sous-Dammartin (Seine-et-Marne)

**Date de la réalisation**

2013

**Le projet en quelques lignes**

Le projet est une expérimentation dont le but est de valoriser les déchets de démolition et les déchets verts produits localement pour reconstituer des sols fertiles pour les plantations urbaines et l'agriculture. Il s'agit de reconstituer des sols dont les propriétés agronomiques et écologiques permettront le développement de végétaux dans des conditions satisfaisantes sans impacter l'environnement. Pour ce faire, trois modalités sont actuellement testées : prairies de parcs et jardins, arbres d'alignement et cultures.

**Originalité**

Les matériaux utilisés pour les reconstitutions de sol sont :

- la terre provenant de chantiers de démolition et correspondant à des remblais, alluvions, limons, formations ante-quaternaires et dépourvues de matière organique. Ces matériaux proviennent majoritairement des horizons profonds de la région parisienne ;
- le béton recyclé, provenant également de chantiers de démolition et choisis avec une granulométrie de 40 à 80 mm. Il est utilisé uniquement sur les arbres d'alignement, pour garantir une bonne portance et éviter la compaction de ces sols parfois soumis à de fortes contraintes urbaines (stationnement automobile, encombrants, etc.) ;
- le compost de déchets verts issu de produits de tonte et de taille d'arbres et d'arbustes de particuliers et professionnels (Biodèpe). Il doit garantir l'héritage biologique qui caractérise les sols naturels, en apportant des nutriments et en assurant une stabilité de leur disponibilité.

Au cours du projet, sont testés des sols composés de terre avec et sans compost (10 % du volume total) pour les trois types de végétation (prairies de parcs et jardins, arbres d'alignement et cultures). Pour les arbres d'alignement sont également testés des mélanges avec ou sans granulats de béton concassé. Pour chaque modalité décrite ci-dessus, trois réplicats ont été mis en place.

## Reconstitution de sols fertiles à partir de matériaux recyclés

### Plantation

(1) Arbres d'alignement : *Carpinus betulus* (charme), *Acer campestre* (érable champêtre), *Acer platanoides* (érable plane), *Acer pseudoplatanus* (érable sycomore), *Prunus avium* (merisier), *Tilia cordata* (tilleul à petites feuilles). Ces espèces sont celles typiquement utilisées pour les arbres d'alignement.

(2) Cultures : rotation blé, féverole, qui se rapproche de la rotation représentative d'Île-de-France : blé-colza-protéagineux.

(3) Prairies : *Achillea millefolium* (achillée millefeuille), *Agrostis capillaris* (agrostis commun), *Prunella vulgaris* (brunelle commune), *Galium mollugo* (caille-lait blanc), *Daucus carotta* (carotte sauvage), *Dactylis glomerata* (dactyle aggloméré), *Festuca rubra* (fétuque rouge), *Arrhenatherum eliatum* (fromental élevé), *Knautia arvensis* (knautie des champs), *Lotus corniculatus* (lotier corniculé), *Leucanthemum vulgare* (marguerite commune), *Poa pratensis* (pâturin des prés), *Plantago lanceolata* (plantain lancéolé), *Tragopogon pratensis* (salsifis des prés) et *Senecio jacobaea* (sénéçon jacobée). Ces espèces endémiques ont été recommandées par le Conservatoire botanique national du Bassin parisien, car elles étaient caractéristiques des prairies de la région.

### Itinéraire technique

Le site d'expérimentation se situe sur une ancienne carrière de sable ; il est réservé pour une durée minimale de trois ans. Vingt-six placettes expérimentales ont été mises en place pour tester les trois usages (arbres d'alignement, cultures et prairies). Pour chaque usage, différentes modalités ont été testées (avec ou sans compost/béton/les deux) et chaque modalité bénéficie de trois répétitions, de manière à obtenir des résultats robustes et exploitables.

### Suivi

Le suivi est continu sur les trois premières années faisant suite à la mise en place du substrat (de 2013 à 2016). Des analyses de sol (texture, pouvoir tampon, acidité, fertilité et présence d'éléments-traces métalliques) sont effectuées tous les trois ans. La première fut réalisée en 2013 (à t<sub>0</sub>) et la seconde le sera en 2016. Par ailleurs, d'autres études sont également conduites : relevés floristiques, macrofaune du sol, analyses de porosité, d'agrégation et de capacité d'infiltration, biomasse des prairies, rendement des cultures, croissance racinaire et suivi tensiométrique des arbres. Le site expérimental sera suivi jusqu'en 2018 dans le cadre d'une Thèse Cifre financée par le groupe ECT et encadrée par le laboratoire iEES Paris.

### Bilan

À t<sub>0</sub> : état initial identique des placettes excepté pour les nutriments (plus élevés dans les placettes avec compost). De plus, aucune macrofaune n'avait été trouvée.

La mise en œuvre requiert une logistique importante (divers engins, grand gabarit représentant une charge lourde au sol, etc.). Pour un aménagement en site urbain, se pose la question de l'organisation du chantier et du recours fréquent, voire indispensable, à un site intermédiaire de préparation des mélanges avant livraison.

### FICHE 4.06

#### Reconstitution de sols fertiles à partir de matériaux recyclés

À t + 1 an : le compost semble avoir un effet bénéfique sur la diversité et l'abondance des espèces floristiques, sur la diversité des ordres de macrofaune, ainsi que sur la croissance racinaire (racines plus longues et plus abondantes avec du compost).

À t + 2 ans : les résultats sont en cours d'analyse. Des mortalités d'arbres sont constatées sans que l'on puisse encore expliquer aujourd'hui le ou les facteurs.

#### Remerciements

Laura Albaric et Florian Duffroy, Conseil départemental de Seine-Saint-Denis



Photo 38. Vue d'ensemble du site expérimental (1)



Photo 39. Vue d'ensemble du site expérimental (2)

**Reconstitution de sols fertiles à partir de matériaux recyclés**



**Photo 40. Exemple d'expérimentation**



FICHE  
**4.07**

**Expérimentation du recyclage  
des sédiments de curage de fossés  
et noues comme substrat de plantation**

**Structure à l'origine de la réalisation, partenaires impliqués**

Bordeaux Métropole (maîtrise d'ouvrage)

La ville du Taillan-Médoc

Bureau d'études Pousse Conseil

Plante & Cité

**Lieu de la réalisation**

Taillan-Médoc (Gironde)

**Date de la réalisation**

2015

**Le projet en quelques lignes**

Les terres fournies communément en région bordelaise proviennent majoritairement de sols forestiers et agricoles locaux à la texture très fortement sableuse. Leur capacité de rétention en eau est limitée. L'objectif de cette expérimentation est triple :

- offrir, avec l'usage de ces sédiments, des propriétés agronomiques plus satisfaisantes (texture plus fine, et équilibrée) ;
- assurer une meilleure reprise et pérennité des plantations en espace paysager ;
- recycler les sédiments issus du curage des fossés, noues ou *esteys* (terme local désignant les cours d'eau de la Garonne soumis au régime des marées) réalisés sur le territoire de Bordeaux Métropole, pour limiter le prélèvement de terre arable dans les territoires environnants.

**Originalité du projet**

Deux modalités de substrat sont utilisées :

- substrat 1, terre végétale locale la plus communément trouvée en fourniture. Elle provient des territoires de la rive gauche de la Garonne, sols forestiers à la texture majoritairement sableuse ;
- substrat 2, 50 % en volume de sédiments de curage, 50 % en volume de compost de déchets verts mûr (compost normalisé).

Les sédiments de curage sont extraits dans le cadre de l'entretien hydraulique des fossés et noues, esteys en affluents de la Garonne, puis laissés à ressuyage un mois minimum sur place.

## Expérimentation du recyclage des sédiments de curage de fossés et noues comme substrat de plantation

### Plantation

*Quercus robur*, espèce locale, en baliveau, avec discussion sur le volet expérimental avec le bureau d'études en charge de l'expertise de reprise et de description de l'architecture des arbres (développement aérien, racinaire).

### Itinéraire technique

Les plants expérimentés, les quatre témoins et les quatre testés, seront plantés parmi les végétaux prévus dans l'aménagement paysager réalisé dans le cadre des travaux de voirie de l'avenue La Boétie.

Fosses de plantation de 5,2 m<sup>3</sup> chacune.

Les plantations sont réalisées dans le respect des règles professionnelles du paysage.

L'arrosage est piloté par suivi tensiométrique, c'est-à-dire avec un déclenchement de l'arrosage à partir d'une valeur-seuil identique pour toutes les modalités. Les différences de consommation d'eau permettront ainsi d'apprécier les différences de performances agronomiques des substrats.

### Suivi

Notations avant plantation : description et photographies du système racinaire et de la partie aérienne. L'expertise est réalisée par un bureau d'études spécialisé.

Pendant les trois ans d'expérimentation : une fois par an, mesure de la circonférence du tronc à 1 m du sol, taille de l'arbre, croissance de l'arbre entre deux repères sur le tronc ; suivi de l'état hydrique des substrats par tensiométrie les deux premières années ; relevé différencié des consommations d'eau par modalité de substrat ; relevés météorologiques. Ces relevés sont réalisés par la ville du Taillan-Médoc et Bordeaux Métropole.

Notations après arrachage en fin d'expérimentation : description et photographies du système racinaire et de la partie aérienne ; analyse du développement des arbres. L'expertise est réalisée par un bureau d'études spécialisé.

Analyses pour les matériaux individuels (terre, sédiment, compost) : granulométrie, phosphore (Olsen), potassium, oxyde de magnésium, azote total, matière organique, rapport C/N, pH<sub>eau</sub>, pH<sub>KCl</sub>, calcaire total et organique, capacité d'échange cationique, conductivité électrique (contrôle de la salinité), métaux (arsenic, cadmium, chrome, cuivre, mercure, nickel, plomb, sélénium, zinc), indice phénol, hydrocarbures totaux, hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), polychlorobiphényles (PCB), composés organiques halogènes volatils (COHV) et les BTEX (benzène, toluène, éthylbenzène et xylènes).

### Bilan

La mise en place des sols dans les fosses a eu lieu en 2015. L'expérimentation est réalisée au printemps 2016. Il n'y a pas encore de résultats sur les reprises de végétaux.

L'observation d'un profil de sols sur 50 cm à l'hiver 2015-2016 montre une bonne et profonde colonisation racinaire du couvert herbacé. Si les proportions entre terre et compost sont homogènes sur le profil, des mottes de sédiments d'un diamètre de 3 cm en moyenne demeurent. L'obtention d'un mélange homogène, même en granulométrie fine, est une des

### FICHE 4.07

#### **Expérimentation du recyclage des sédiments de curage de fossés et noues comme substrat de plantation**

limites de mise en œuvre de ce chantier, sans que l'on puisse apprécier si cela a ou non un impact négatif sur l'installation et la reprise des arbres.

Une autre difficulté relevée repose sur la durée nécessaire de ressuyage des sédiments (un mois minimum) et sur le temps d'obtention de conditions sèches avant tout transport et mise en œuvre. L'organisation et la planification de chantier doivent être fines, anticipées et, tout à la fois, adaptables.

#### **Remerciements**

Anne Desurmont, Bordeaux Métropole et Olivier Damas, Plante & Cité



Photo 41. Vue d'ensemble de l'alignement après plantation



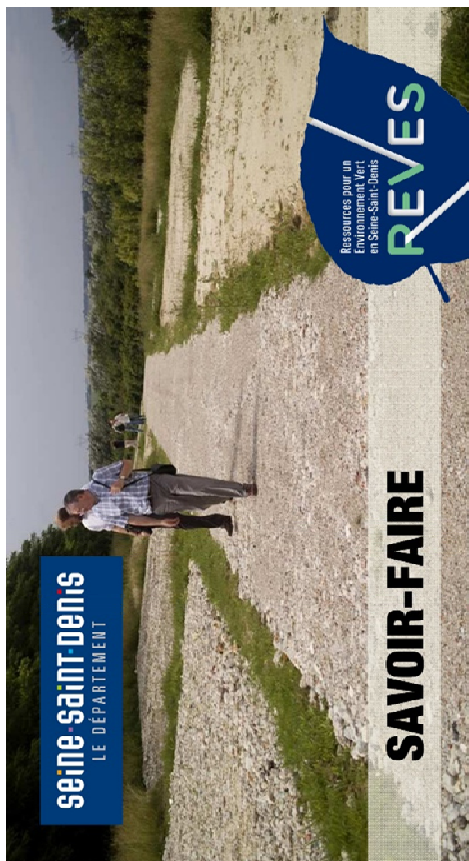
Photo 42. Le sol construit à base de sédiment et de compost au pied d'un arbre six mois après sa plantation (1)

**Expérimentation du recyclage des sédiments de curage de fossés  
et noues comme substrat de plantation**



**Photo 43. Le sol construit à base de sédiments et de compost au pied d'un arbre  
six mois après sa plantation (2)**

# ANNEXE XIV : Projet de reconstitution de sols fertiles à partir de matériaux recyclés – Source : (DNPB et al., 2014)



## PROJET DE RECONSTITUTION DE SOLS FERTILES A PARTIR DE MATERIAUX RECYCLES

Mars 2014



Etude réalisée par :

DIRECTION DE LA NATURE DES PAYSAGES ET DE LA BIODIVERSITÉ  
Conseil général de la Seine-Saint-Denis  
BUREAU DES ETUDES GENERALES

Audrey Muratet | Chargée d'études, pôle scientifique de l'Observatoire Départemental de la Biodiversité Urbaine (ODBU)  
amuratet@cge3.fr  
01 43 93 41 98

Crédits photographiques & Illustrations  
Myr Muratet &  
Direction de la Nature, des Paysages et de la Biodiversité  
Conseil général de la Seine-Saint-Denis

Ce document fait partie des Ressources pour un Environnement Vert en Seine-Saint-Denis (REVES), plateforme de partage de données et de connaissances sur l'environnement. Retrouvez toutes les ressources départementales en ligne sur le site <http://marcinfo.seine-saint-denis.fr> dans la rubrique REVES.

## Créer des sols fertiles sans exploiter les ressources naturelles

### I. Une collectivité, une entreprise et un laboratoire de recherche mobilisés sur une même problématique

L'Europe reconnaît que la protection des sols est fondamentale et met un accent sur l'importance de maintenir et de conserver des sols durables dans sa stratégie pour la protection intégrée des sols (Commission européenne, 2002). Les sols naturels sont menacés par leur utilisation en (re)végétalisation. En France, par exemple, chaque année plus de 3 millions de mètres cubes de terre végétale et de granulats sont utilisés pour la réalisation d'espaces verts publics et l'approvisionnement en terre végétale commence à être difficile pour les grosses agglomérations.

Ainsi, afin de préserver ces sols et de limiter les coûts d'approvisionnement, différentes collectivités, telles la Seine-Saint-Denis s'orientent peu à peu vers la reconstitution de sols fertiles en passant par le recyclage local de matériaux inertes et de déchets verts pour les plantations urbaines. Outre la préservation des sols naturels, l'enjeu est aussi de valoriser les déchets de démolition et les déchets verts produits localement et souvent peu ou non recyclés.

La plupart des parcs du département de la Seine-Saint-Denis ont été créés dans les années 1970 et le plus souvent modelés avec des remblais, issus des excavations des chantiers d'aménagement. Au cours de ces transformations majeures des sols du département, aucun suivi de l'impact de ces apports extérieurs sur les sols n'a été mis en place.

Aujourd'hui, le Département via l'Observatoire départemental de la Biodiversité urbaine (ODEBU) cherche à connaître la qualité de ses sols remaniés, 40 ans après leur installation. Il s'agit d'un préalable nécessaire pour répondre au deuxième objectif du Département qui est de pouvoir mieux maîtriser le mélange de matériaux urbains pour reconstituer des sols lors de prochains projets d'aménagement ou d'extension dans les parcs départementaux. C'est pourquoi l'ODEBU a souhaité se placer dans une démarche expérimentale réaliste afin d'évaluer différents types de sols reconstitués pour de futurs aménagements. Un comité scientifique a été mis en place dès la définition des objectifs de cette étude afin de lui donner toute la rigueur scientifique attendue.

La société Enviro Conseil Travaux (ECT), certifiée ISO 14 001, est le leader français du stockage de matériaux inertes issus des chantiers de bâtiment et de travaux publics. Elle a développé des compétences de gestion et de recyclage de matériaux de déconstruction mais aussi de recyclage de déchets verts en compost. La société est à la recherche de nouvelles possibilités de valorisation des matériaux stockés sur ses plateformes.

## SOMMAIRE

<b>Créer des sols fertiles sans exploiter les ressources naturelles sur une même problématique</b>	<b>4</b>
I. Une collectivité, une entreprise et un laboratoire de recherche mobilisés sur une même problématique	4
II. Historique	5
III. Expérimenter et évaluer différents mélanges de sol	6
III - 1. Reconstituer des sols fertiles en testant différents mélanges en champs ex situ	6
III - 2. Analyser et suivre leurs caractéristiques biologiques, physiques et chimiques	7
III - 3. Situer leur "dynamique" dans une gamme de référence de terres urbaines	7
<b>Sites d'étude</b>	<b>7</b>
I. Placettes d'expérimentation	7
II. Placettes de référence	8
<b>Mise en œuvre du projet</b>	<b>8</b>
I. Un prototype de sol construit	8
I - 1. Mélanges testés	8
I - 2. Palette végétale	9
II. Analyser et suivre leurs caractéristiques biologiques, physiques et chimiques	10
III. Situer leur "dynamique" dans une gamme de référence de terres urbaines	11
<b>Le Comité scientifique, rôle et composition</b>	<b>11</b>
<b>Valorisation du projet</b>	<b>12</b>



Enfin, le monde de la recherche s'est depuis longtemps intéressé aux sols égrégés dans des objectifs de rendement et d'amélioration de la production des terres cultivées. Depuis seulement quelques années ces travaux se sont étendus aux sols urbains. Plus particulièrement l'Institut d'écologie et des Sciences de l'Environnement de Paris (IEES) de l'Université Paris Est Créteil tente de comprendre le fonctionnement écologique de ces sols soumis à diverses perturbations anthropiques. Les scientifiques de ce laboratoire cherchent à utiliser les connaissances actuelles et à en acquérir de nouvelles sur l'évolution du sol et le temps nécessaire pour un sol remanié pour retrouver des fonctions écologiques similaires à des sols « naturels ». Ainsi diverses réflexions émergent sur les manières d'évaluer et de suivre la qualité des sols urbains, qualité à la fois physique, chimique mais aussi biologique.

Pour mettre en œuvre ces différents objectifs dans des conditions écologiques optimales, le Département, la société ECT et l'université Paris Est Créteil mutualisent leurs différents savoir-faire et compétences afin de reconstituer des sols fertiles pour les plantations urbaines et agricoles.

**II. Historique**

Le Département de la Seine-Saint-Denis a fait réaliser en 2003 une analyse bibliographique par un bureau d'étude (Sol Paysage 2003) sur la reconstitution de sols fertiles à partir de la valorisation de déchets organiques et industriels, de matériaux naturels, industriels et de produits recyclés.

En général dans les travaux de végétalisation, les granulats utilisés sont des pouzzolanes, ou d'autres granulats issus de l'exploitation de ressources naturelles non renouvelables.

**Matériaux de déconstruction**

Cette étude affirme qu'il est possible d'obtenir des granulométries similaires avec des matériaux de déconstruction. Il s'agit donc d'une alternative intéressante à expérimenter pour valoir son efficacité. Sur la figure 1 issue de l'étude menée par Sol Paysage (2003), on peut remarquer l'avantage évident de recycler les déchets inertes pour la reconstitution de sols fertiles. Ceux-ci composent 80% des déchets de démolition du BTP en Seine-Saint-Denis et parmi eux, le béton constitue 60% des matériaux potentiellement recyclables.

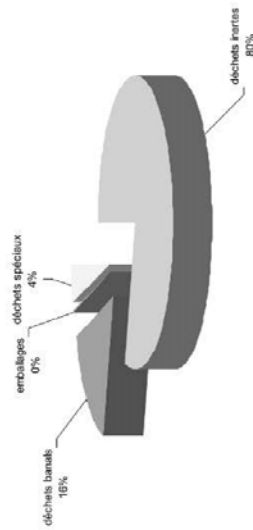


Figure 1. Composition des déchets du BTP en Seine-Saint-Denis (Sol Paysage 2003)

**Composts**

Le compost issu de déchets verts peut venir en complément à l'usage de terre végétale naturelle pour recréer des sols fertiles. Les quantités de déchets verts en Seine-Saint-Denis sont de 45000 à 54000 tonnes par an et seules 24000 à 33000 tonnes sont effectivement valorisées. On peut classer ces déchets en deux groupes :

- les branches d'élagage et de tailles de haies qui sont des produits ligneux, secs qui se dégradent lentement.
- les produits de tontes de gazon, de plantes herbacées fraîchement coupées qui sont des produits fermentescibles riches en eau, en sucre et en azote qui se dégradent plus rapidement.

Le compost possède de nombreuses qualités. Il aère le sol, il améliore les capacités de rétention d'eau, il augmente le taux de matières organiques, il apporte des éléments nutritifs (N, P, K, Ca, Mg+ oligoéléments), favorise l'activité biologique etc.

A partir de ces matériaux, il est possible de tester des mélanges adaptés aux différents usages qui en seront faits.

**III. Expérimenter et évaluer différents mélanges de sol**

L'objectif principal de ce projet est de valoriser les déchets de démolition et les déchets verts produits localement pour reconstituer des sols fertiles pour les plantations urbaines et l'agriculture. Il s'agit de reconstituer des sols dont les propriétés agronomiques et écologiques permettront le développement de végétaux dans des conditions satisfaisantes sans impacter l'environnement. Pour ce faire, le projet se veut cohérent avec les expérimentations existantes et s'appuie sur les savoir-faire déjà acquis par différentes collectivités, associations et institutions scientifiques.

De manière plus précise, les objectifs de ce projet peuvent se distinguer en trois parties :

**III - 1. Reconstituer des sols fertiles en testant différents mélanges en champs ex situ**

En cohérence avec les études existantes menées par d'autres collectivités comme la Val-de-Marne et l'association Plante & Cité, mais aussi en cohérence avec les besoins en aménagement propres au département de la Seine-Saint-Denis, 3 usages sont testés :

- Arbres d'alignements. Des fosses d'arbres d'alignements sont régulièrement réalisées par le service des continuités vertes.
- Prairies de parcs et jardins. La création de prairies est plus occasionnelle que les fosses mais potentiellement plus volumineuse.
- Culture. Le but est de pouvoir réaménager des sites de stockage dans une perspective de valorisation agricole.

### III - 2. Analyser et suivre leurs caractéristiques biologiques, physiques et chimiques

Un suivi de l'évolution des caractéristiques physico-chimiques et biologiques des sols fertiles reconstitués est mis en place au démarrage de l'expérimentation afin d'évaluer leur qualité, leur fonctionnement écologique et le rendement végétal durant trois ans. Ces analyses sont réalisées par l'Institut d'Ecologie et des Sciences de l'Environnement de Paris (I-EES), en particulier l'Université Paris Est Créteil.

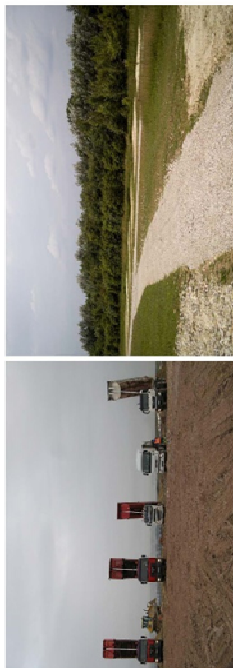
### III - 3. Situer leur "dynamique" dans une gamme de référence de terres urbaines

Une gamme de référence des sols urbains est en cours de réalisation, elle permettra de situer les sols reconstitués dans cette gamme. Cette analyse parallèle est menée en partenariat avec l'Institut d'Ecologie et des Sciences de l'Environnement de Paris (I-EES) dans les espaces verts gérés par le Conseil général de Seine-Saint-Denis. Les sols de ces espaces offrent un contexte d'étude particulièrement intéressant puisqu'ils sont issus de remblais de différents mélanges (avec ou sans terre végétale) et/ou âgés (de 1 à plus de 40 ans). Cela permettra d'évaluer la durée nécessaire pour que les sols deviennent fonctionnels. Plus finement, l'étude permettra d'identifier les espèces tolérantes aux caractéristiques physico-chimiques des sols reconstitués et la capacité de ces espèces à en assurer le fonctionnement.

Enfin, en termes opérationnels, notre ambition est de mener une expérimentation reproductible, c'est pourquoi, le projet vise à n'utiliser que des matériaux de déconstruction avec des filières d'approvisionnement importantes et peu de débouchés pour la société ECT et d'autre part, se mettre dans des « conditions réelles » concernant tous les aspects de la mise en œuvre.

## Sites d'étude

### I. Placettes d'expérimentation



Le site d'expérimentation se situe à Villeneuve-sous-Dammartin sur une ancienne carrière de sable. La société ECT y reçoit depuis 15 ans environ des matériaux inertes issus de chantiers de démolition provenant de l'ouest et du nord de la petite couronne parisienne.

Une partie du site a été réservée pour l'expérimentation pour au moins 3 ans. 26 placettes expérimentales ont été mises en place correspondant aux 3 usages à tester :

- 6 placettes pour les prairies de parcs et jardins
- 12 placettes pour les arbres d'alignement
- 8 placettes pour les usages agricoles

Les matériaux utilisés pour les reconstitutions de sol sont :

- La terre « stérile » provenant de chantiers de démolition correspondant à des remblais, alluvions, limons, formations ante-quaternaires et dépourvue de matière organique. Ces matériaux proviennent majoritairement des horizons profonds de la région parisienne. Les terres stériles ont été analysées pour s'assurer de leur caractère inerte.
- Le béton recyclé provenant également de chantier de démolition et choisi avec une granulométrie de 40-80 mm. Il est utilisé uniquement sur les arbres d'alignement, pour garantir une bonne portance et éviter la compaction de ces sols parfois soumis à de fortes contraintes urbaines (stationnements automobiles, encombrants, etc.).
- Le compost de déchets verts issu de produits de fonte et de taille d'arbres et arbustes de particuliers et professionnels (biocoop). Il doit garantir l'héritage biologique qui caractérise les sols naturels, en apportant des nutriments et en assurant une stabilité de leur disponibilité.

## II. Placettes de référence

Les sols reconstitués seront replacés dans une gamme de référence de sols échantillonnés sur 14 sites du territoire de la Seine-Saint-Denis.

Les sols de référence ont été choisis sur les parcs départementaux avec un usage passé (culture) et un usage actuel (prairie) communs, afin d'éviter des biais. Le choix des sites est fait selon deux critères : l'âge du remblai et l'ajout ou non de terre végétale. L'âge des placettes permet de caractériser l'évolution que l'on peut attendre d'un sol construit sans intervention, tandis que la présence de terre végétale constitue une source d'alimentation et un habitat pour de multiples organismes du sol. Cela permet d'évaluer l'évolution de leur fonctionnement écologique et de leur qualité physico-chimique dans le temps et de produire un début de typologie des sols urbains sur lesquels les connaissances sont très réduites.

## Mise en œuvre du projet

### I. Un prototype de sol construit

#### I - 1. Mélanges testés

Au cours de ce projet sont testés des sols composés de terre stérile avec et sans compost (10% du volume total) pour les 3 types de végétation (prairies de parcs et jardins, arbres d'alignement et cultures). Pour les placettes d'arbres d'alignement sont également testés des mélanges avec ou sans granulats de béton concassé. Pour assurer une robustesse des résultats scientifiques, 3 réplicats de ce mélange ont été mis en place pour chaque modalité décrite ci-dessus.

Les sols ont été mis en place au mois de mai 2013 sur des profondeurs de 1m pour les prairies et cultures et 1m20 pour les arbres d'alignement.





## 1 - 2. Palette végétale

La végétalisation des placettes a été effectuée en automne 2013.

### ■ Prairies de parcs et jardins

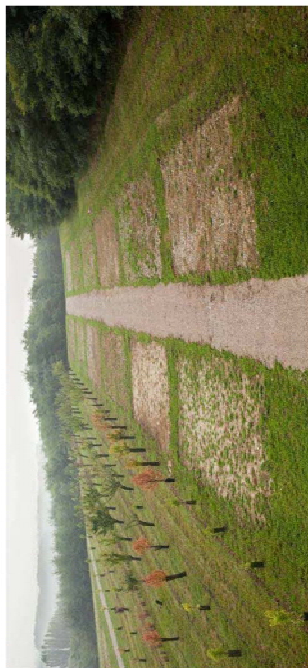
Les espèces végétales qui ont été semées sur les placettes de prairies sont identiques entre placettes. Ce sont des espèces poussant spontanément en Ile de France, d'origine connue et adaptées aux conditions environnementales du site. Concernant les proportions, afin de se rapprocher le plus possible d'une prairie naturelle, la proportion en graminées est délibérément élevée (85% de graminées et 15% de plantes à fleurs).



Vue aérienne des placettes de Prairies le lendemain du semis

### ■ Arbres d'alignement

Les essences choisies (Marisier, Tilleul à petites feuilles, Charme, Erable plane, Erable champêtre, Erable sycomore) sont adaptées à des sols variés, communément plantées par les collectivités, sans problème de maladie connu.



Vue aérienne des 12 Placettes arbrus d'alignement avant plantation (placettes vidées de part et d'autre du chemin)

### ■ Cultures

Il a été proposé de réaliser une rotation commune dans la région, à savoir : blé/orge/colza.



Deux des 8 placettes agricoles avant labour et semis

## II. Analyser et suivre leurs caractéristiques biologiques, physiques et chimiques

Un partenariat avec l'Université Paris Est Créteil a été élaboré pour mener à bien l'analyse des fonctions et qualités des sols expérimentaux et de référence via différentes mesures :

- La texture du sol par une mesure de la granulométrie qui permet de savoir si son équilibre permet une bonne cohésion ;
- Le pouvoir tampon par les capacités d'échanges cationiques qui renseigne sur la capacité du sol à assurer un approvisionnement constant de ressources aux plantes ;
- L'acidité par une mesure du pH. Celui-ci est très déterminant dans la sélection des espèces végétales et animales pouvant se maintenir dans le sol ;
- Sa fertilité par une mesure de l'azote, du phosphore et du potassium (N, P et K) qui sont les éléments majeurs pour la croissance des plantes, ainsi que du carbone, qui renseigne sur les ressources disponibles pour la faune et les microorganismes du sol ;
- La présence de certains métaux lourds (Zn, Pb, Cu, Cd, Ni et Sb) qui pourraient altérer le fonctionnement du sol est également recherchée ;
- Enfin, la faune du sol est inventoriée dans les placettes expérimentales et de référence (insectes, araignées, vers-de-terre) afin d'évaluer le fonctionnement biologique du sol.

Un état zéro (analyse de l'état initial des placettes au début de l'expérience) a été effectué sur les sols expérimentaux mis en place sur la plateforme d'ECT avant les plantations. Cette première analyse permettra d'identifier les espèces déjà présentes dans les matériaux rapportés (terre stérile, béton ou compost).

III. **Situer leur "dynamique" dans une gamme de référence de terres urbaines**  
 Notre connaissance scientifique des sols urbains est encore faible, et d'autant plus lorsqu'il s'agit de sols construits à partir de matériaux urbains. Une analyse approfondie de l'ensemble des expériences réalisées dans le passé par les agents des services techniques du Département va permettre d'avoir une idée de l'évolution que l'on peut attendre de ce type de sol, en l'absence de gestion spécifique. Un réseau de placettes de référence est mis en place afin de caractériser l'état de sols construits empiriquement depuis 40 ans.

#### ● Placettes de référence

Les analyses physiques chimiques et biologiques des placettes de référence sont réalisées une seule fois en 2013. Ces analyses ont été faites sur des prélèvements de sols dans 14 sites localisés dans 6 parcs du département pour lesquels nous avons pu obtenir une information sur l'âge du remblai et l'ajout ou non de terre végétale. Ces sites ont la particularité d'avoir un historique similaire (anciennes cultures) et un usage actuel similaire également (prairies et pelouses) de manière à ce que seul l'âge des remblais et l'ajout ou non de terre végétale varient entre les sites. Les sites sans remblai permettent d'évaluer les impacts négatifs ou positifs de l'ajout de remblais.

L'âge de la mise en place des sols sur ces placettes étant variable, ces données permettront de produire une gamme de référence de sols urbains. Cette production d'une gamme de référence sera également réalisée par l'Université Paris Est Créteil.

#### ● Placettes expérimentales

Concernant les 26 placettes expérimentales, les analyses seront, cette fois-ci, menées chaque année afin de suivre l'évolution de leur propriété au cours du temps. La gamme de référence permettra de replacer ces placettes expérimentales dans la gamme et ainsi d'identifier le pas de temps nécessaire à l'obtention de sols fonctionnels. Le suivi de ces analyses sur les placettes expérimentales est mis en place sur 3 ans et sera ensuite mené de façon plus espacée sur une période plus longue de 10 ans.

## Le Comité scientifique, rôle et composition

Un comité scientifique a été mis en place au démarrage du projet. Ce comité scientifique garantit que ce prototype de sol construit permettra d'acquérir des connaissances dans la construction de sol selon les critères scientifiques internationaux. Il permet d'avoir un recul sur les expériences passées et une cohérence avec les autres projets en cours sur la même thématique. Il a validé le plan expérimental, apporté une expertise sur les compositions de sols retenus et sur les espèces végétales choisies. Il a enfin permis de définir un ensemble d'indicateurs à suivre au cours du temps pour obtenir une caractérisation physique, chimique et biologique du sol. Ces paramètres permettront de mesurer l'évolution des sols et la vitesse de la pédogenèse, afin d'identifier les facteurs susceptibles de l'accélérer. Ce comité scientifique est composé de :

- Michel BERTRAND, INRA de Versailles
- Manuel BLOUIN, Université Paris Est Créteil, IEES Paris
- Nicolas BUTTAZZONI, Département de la Seine-Saint-Denis, DNPB
- Florence CARRIERE, Département du Val-de-Marne
- Olivier DAMAS, Plante & Cité

- Sandrine DEROC, Département de la Seine-Saint-Denis, DNPB
- Dorothee DESCAMPS, Ville de Paris, DEVE
- Daniel JOYE, Département de la Seine-Saint-Denis, DNPB
- Fiona LEHANE, Conservatoire botanique national du Bassin Parisien
- Audrey MURATET, Département de la Seine-Saint-Denis, DNPB
- Céline PELOSI, Unité PESSAC, INRA de Versailles
- Christian PERNOT, Département de la Seine-Saint-Denis, DNPB
- Gaëlle STOTZENBACH, Département de la Seine-Saint-Denis, DNPB
- Benjamin TILLIET, Société Enviro Conseil et Travaux
- Alan VERGNES, Université Paris Est Créteil, IEES Paris

## Valorisation du projet

Cette expérimentation fera l'objet d'un article dans le prochain *Biodiversitaire*. Elle sera présentée aux 300 chercheurs du laboratoire IEES de l'Université Paris Est Créteil afin de faire connaître ce projet et de potentiellement faire émerger des propositions de travaux complémentaires à ceux en cours sur cette étude. Enfin, le site étant aménagé pour recevoir des visiteurs, il sera également possible de présenter cette expérimentation aux collectivités et partenaires intéressés.

ANNEXE XV : Localisation de la plateforme de tri et de traitement des terres à Novaciéries et localisation de la revalorisation de celles-ci – source : (Leroy,2019)



ANNEXE XVI : Photos d'une partie de la valorisation des terres suite au traitement – Source : (atelier VILLES & PAYSAGES, 2016)



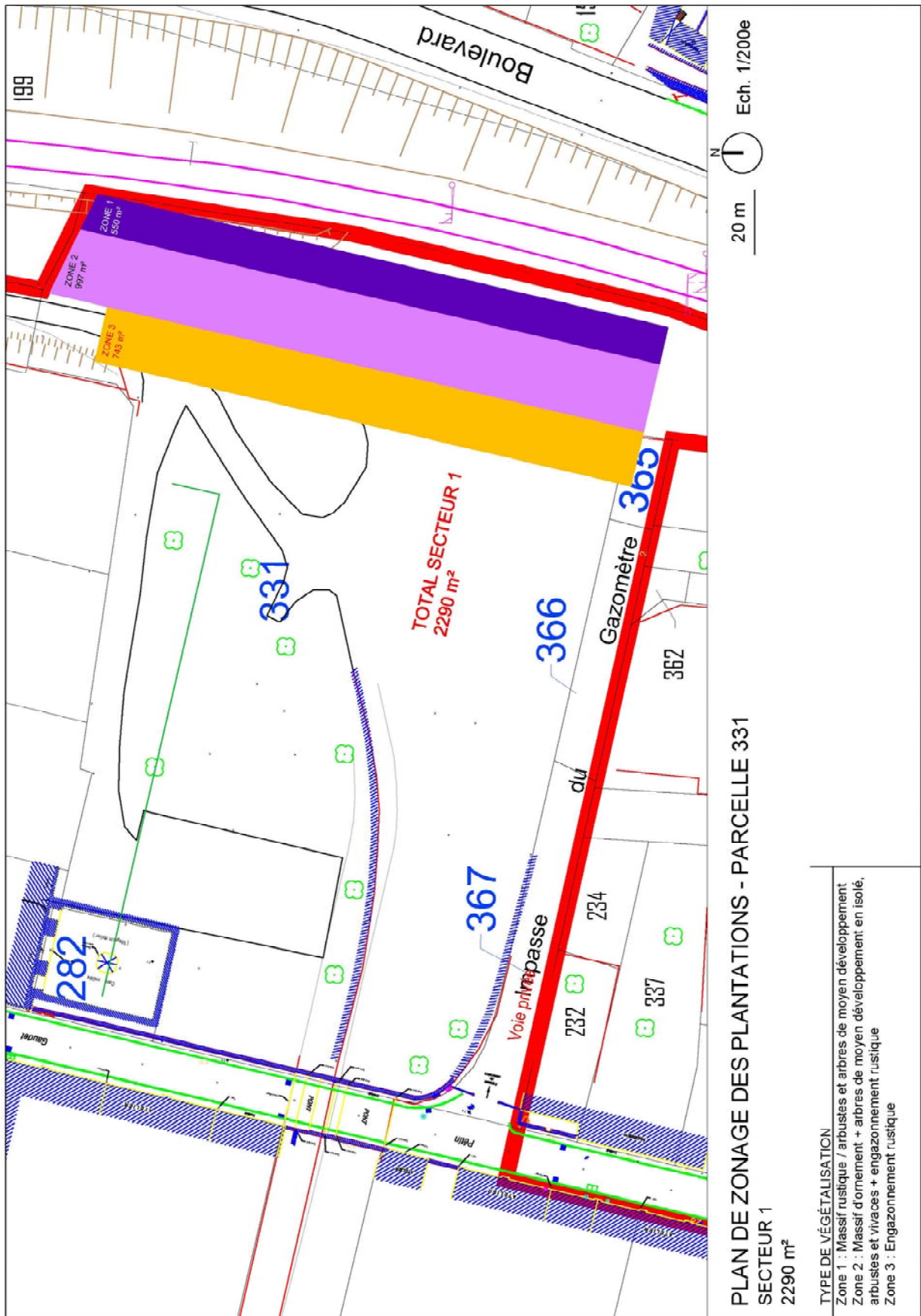


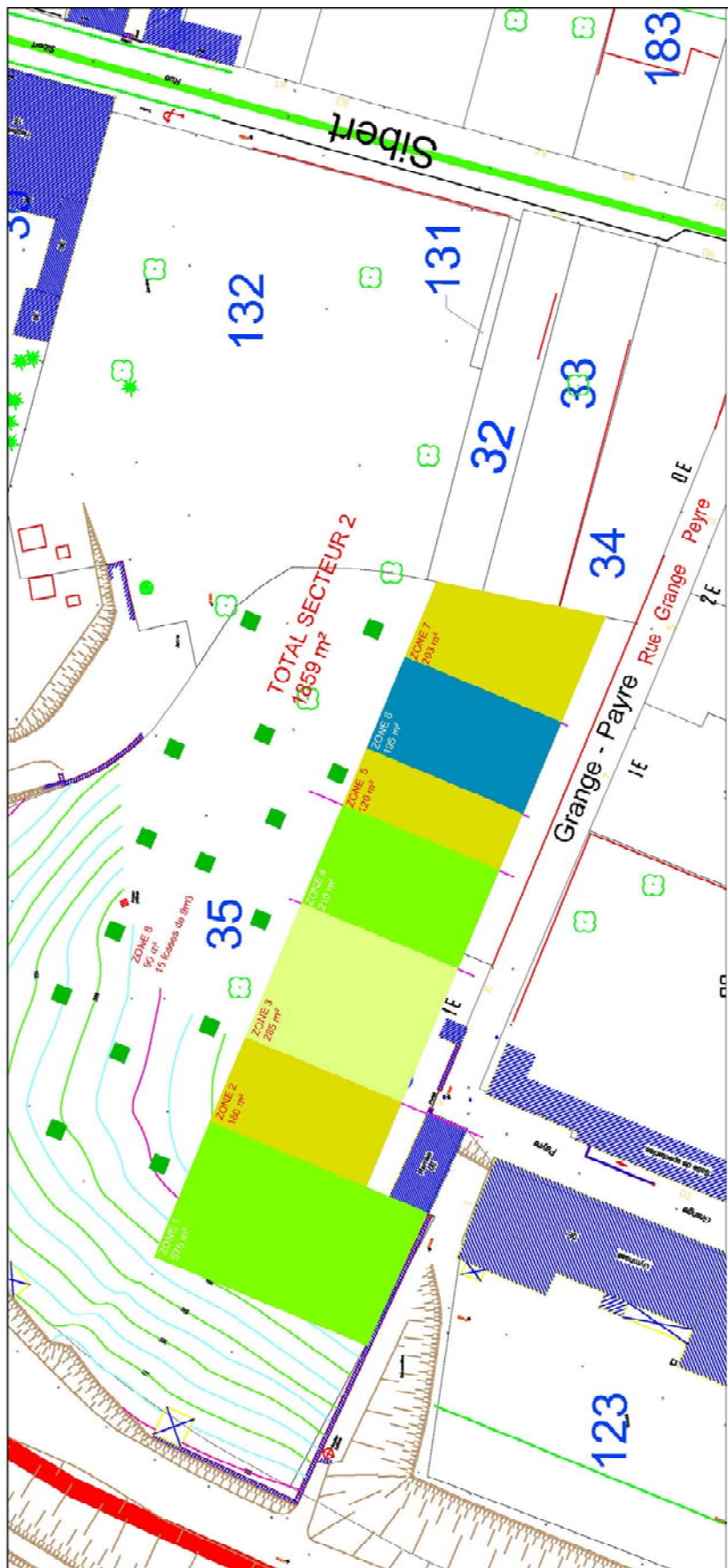
ANNEXE XVIII : Localisation du projet expérimental sur le site de Novaciéries

– Source : (Leroy, 2019)



ANNEXE XIX : Plan de zonage des plantations pour le secteur 1 et 2 –  
 Source : (Leroy, 2019)





PLAN DE ZONAGE DES PLANTATIONS - PARCELLE 35 ET 132

SECTEUR 2

1265 m<sup>2</sup>

20 m Ech. 1/2000

TYPE DE VÉGÉTALISATION

- Zone 1 : Arbres susceptibles d'être employés en alignement ou en isolé
- Zone 2 : Prairies champêtre
- Zone 3 : Prairies haute + arbres de moyen développement en isolé
- Zone 4 : Arbres susceptibles d'être employés en alignement ou en isolé
- Zone 5 : Prairies fleurie
- Zone 6 : Trame végétale bocagère
- Zone 7 : Engazonnement rustique
- Zone 8 : Arbres de moyen et grand développement en isolé



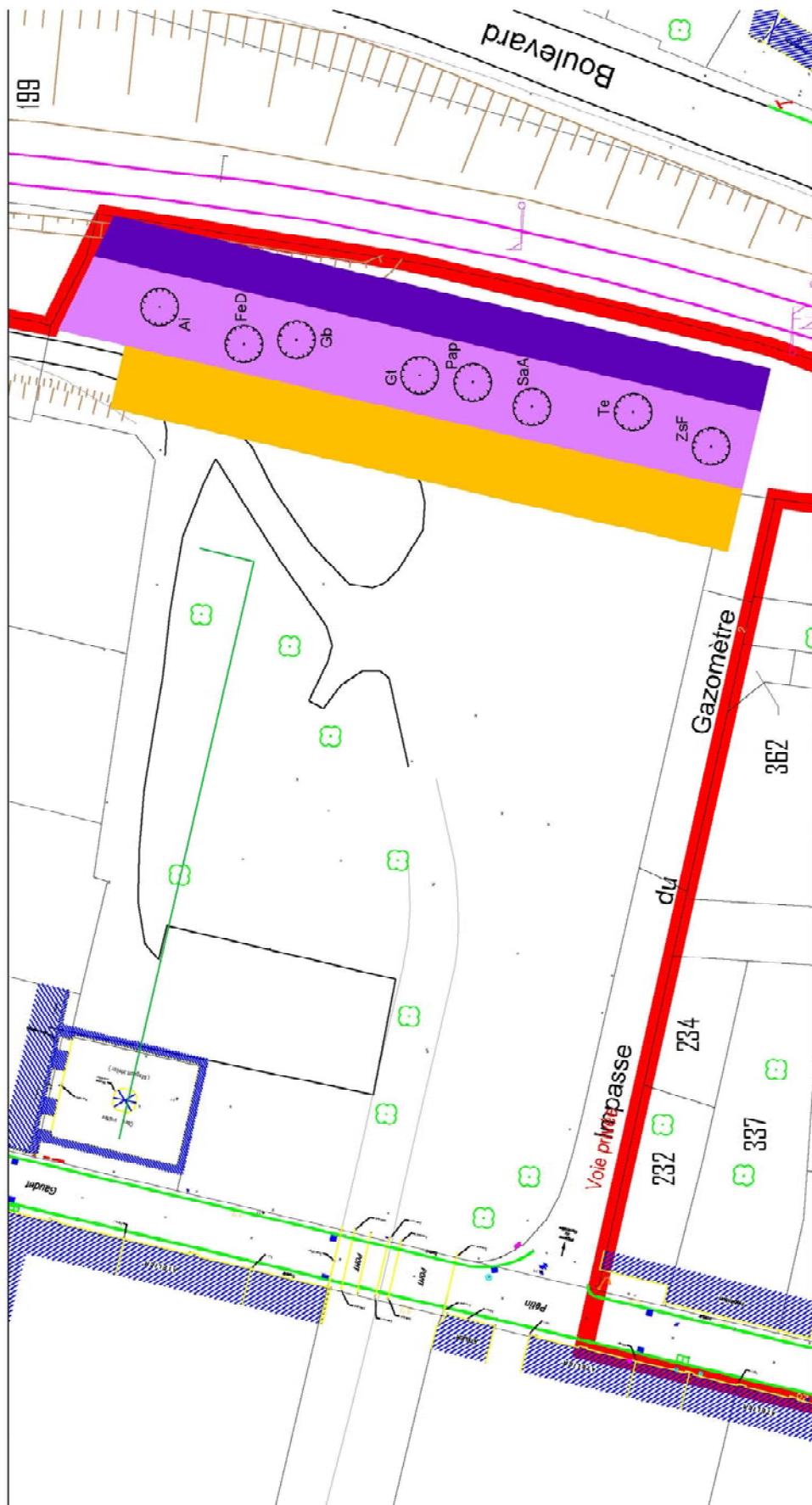
ANNEXE XX : Tableaux de sélection des essences pour la catégorie « arbre d'alignement » - Source (Leroy, 2019)

Code	Nom scientifique	Origine	Forme	Port	Chapiteau	Comportement	Exposition	Exposition au vent	Exposition à la pollution	Exposition à la neige	Exposition à la glace	Exposition à la sécheresse	Exposition à la chaleur	Exposition à l'humidité	Exposition à la salinité	Exposition à la pollution	Exposition à la pollution	Exposition à la pollution	Exposition à la pollution	Exposition à la pollution
AE	Acer campestre 'Elatik'	Europe centrale-Est	Conique	Moyenne	Inconnue	Solide	Caduc	Léger	10-15	Tout type de sol	Neutre à acide	En cœur	OUI	Précipitations abondantes	OUI	Alignement / isolé	Alignement / isolé	Alignement / isolé	Alignement / isolé	OUI
US	Liquidambar styraciflua	Amérique du Nord	Conique	Lente	Inconnue	Solide	Caduc	Moyen	30-40	Tout type de sol	Neutre à acide	En cœur	OUI	Précipitations abondantes	OUI	Alignement / isolé	Alignement / isolé	Alignement / isolé	Alignement / isolé	OUI
MG	Mercuaria glaberrima	Asie	Conique	Rapide	Importante	Solide / Abondante	Caduc	Léger	30-35	Frais à humide, riche	Acide à neutre	Profond	OUI	Précipitations abondantes	OUI	Alignement / isolé	Alignement / isolé	Alignement / isolé	Alignement / isolé	OUI
JC	Sophora japonica 'Columnaris'	Japon	Quadrée	Moyenne	Inconnue	Solide	Caduc	Léger	10-15	Frais à sec, sable à calcaire	Acide à calcaire	Étaillé	OUI	Précipitations abondantes	OUI	Alignement / isolé	Alignement / isolé	Alignement / isolé	Alignement / isolé	OUI
Sa	Sorbus aria	Europe	Quadrée	Lente	Inconnue	Solide	Caduc	Léger	10-15	Frais à sec, drainé	Acide à calcaire	En cœur	OUI	Précipitations abondantes	OUI	Alignement / isolé	Alignement / isolé	Alignement / isolé	Alignement / isolé	OUI
Tk	Tilia cordata 'Lancaster'	Europe	Conique	Moyenne	Inconnue	Solide	Caduc	Dense	10-15	Sec à frais, riche	Acide à calcaire	En cœur	OUI	Précipitations abondantes	OUI	Alignement / isolé	Alignement / isolé	Alignement / isolé	Alignement / isolé	OUI

# ANNEXE XXI : Tableaux de sélection des essences pour la catégorie « parcs et squares » - Source (Leroy, 2019)

CODE	NOM SCIENTIFIQUE	NOM COMMUN	PORT	CROISSANCE	LONGEVITE	EXPOSITION	RESISTANCE AU FRAIGLE	MAUTRE EN M	PH	SISTEME RACINAIRE	RESISTANT A LA SECHESSSE	PARTICULARITE	UTILISATION	ALIGNEMENT	RESISTANT CLIMAT URBAIN	RESISTANT AUX POLLUANTS MOUS NIELS	RESISTANCE AU FONGICIDE COMBACTANT	UTILISATION DANS LE PARC D'USAGES
Ab	Acer buergerianum	Erbule trident	Globuleux	Moyenne	Inconnue	Mi-ombre	Caulic	Léger	10-15	Frais à sec, drainé	Neutre à acide	Étalé	OUI	Résistant au gel	Résistant au ge	Résistant à la pollution	Résistant à la pollution	NDN
Ap	Acer pseudoplatanus	Erbule sycomore	Ovoïde	Rapide	Importante	Soleil	Caulic	Dense	25-30	Tout type de sol	Neutre à calcaire	Pivotant	OUI	Résistant à la pollution	Résistant à la pollution	Résistant à la pollution	NDN	
Ac	Alnus cordata	Auline de Corse	Conique	Rapide	Inconnue	Soleil	Caulic	Moyen	15-20	Frais à sec	Neutre à calcaire	Étalé	OUI	Adre pionnier dans sites extrêmes	X	Résistant à la pollution	NDN	
Al	Alnus incana	Auline blanc	Conique	Rapide	Faible	Soleil	Caulic	Moyen	15-20	Frais à sec	Calcaire	Étalé	OUI	Adre pionnier dans sites extrêmes	Résistant à la pollution	Résistant à la pollution	NDN	
Cb	Carpinus betulus	Charme commun	Ovoïde	Rapide	Inconnue	Soleil	Morissant	Dense	15-20	Frais et riche, stableux argilleux	Neutre	En cœur	OUI	Supporte la chaleur	Résistant à la pollution	Résistant à la pollution	NDN	
Cc	Cedrus atlantica	Cèdre de l'Atlas	Conique	Moyenne	Importante	Soleil	Persistant	Dense	35-40	Frais à sec, profond, résiste au sec	Neutre à calcaire	Profond	OUI	Résistant au gel	Résistant à la pollution	Résistant à la pollution	NDN	
Cs	Callis australis	Micocoulier de Provence	Ovoïde	Lente	Importante	Soleil	Caulic	Léger	15-20	Riche et drainant, résiste au sec	Neutre	Pivotant	OUI	Résistant au gel	Résistant à la pollution	Résistant à la pollution	NDN	
Cs	Carex siliquastrum	Adre de Jusé	Elané	Moyenne	Inconnue	Soleil	Caulic	Léger	10	Sec à sec, sabieux, argilleux	Neutre	Pivotant	OUI	Résistant aux parasites	Résistant à la pollution	Résistant à la pollution	NDN	
FeD	Fraxinus excelsior	Frêne à feuille simple	Elané	Rapide	Inconnue	Soleil	Caulic	Moyen	20-25	Frais à humidité, riche	Neutre	Pivotant	OUI	Résistant aux parasites	Résistant à la pollution	Résistant à la pollution	NDN	
FeW	Fraxinus excelsior	Frêne commun	Ovoïde	Rapide	Inconnue	Soleil	Caulic	Moyen	20-25	Frais à humidité, riche	Neutre	En cœur	OUI	Résistant aux parasites	Résistant à la pollution	Résistant à la pollution	NDN	
FeW	"Westhof's Gloria"	"Westhof's Gloria"	Ovoïde	Rapide	Inconnue	Soleil	Caulic	Moyen	25-30	Frais à humidité, riche	Neutre	En cœur	OUI	Résistant aux parasites	Résistant à la pollution	Résistant à la pollution	NDN	
Gb	Ginkgo biloba	Adre aux quarante écus	Elané	Moyenne	Importante	Soleil	Caulic	Léger	20-30	Tout type de sol	Neutre à calcaire	Pivotant	OUI	Résistant aux parasites	Résistant à la pollution	Résistant à la pollution	NDN	
Gt	Gleditsia triacanthos	Fève d'Amérique	Ovoïde	Rapide	Inconnue	Soleil	Caulic	Léger	20-30	Tout type de sol	Neutre à calcaire	Pivotant	OUI	Résistant aux parasites	Résistant à la pollution	Résistant à la pollution	NDN	
Gd	Gymnoidia dioica	Chicot du Canada	Ovoïde	Lente	Inconnue	Soleil	Caulic	Moyen	25-30	Frais et riche	Neutre à calcaire	Pivotant	OUI	Résistant aux parasites	Résistant à la pollution	Résistant à la pollution	NDN	
Ld	Larix caedua	Mélèze d'Europe	Conique	Rapide	Importante	Soleil	Caulic	Léger	30-35	Frais à sec, riche	Neutre	Profond	OUI	Résistant au vent	Résistant à la pollution	Résistant à la pollution	NDN	
ME	Malus "Everest"	Pommier "Everest"	Ovoïde	Moyenne	Faible	Soleil	Caulic	Léger	10	Frais et riche	Neutre	Pivotant	OUI	Résistant aux maladies	Résistant à la pollution	Résistant à la pollution	NDN	
Mb	Malus alba	Mûrier blanc	Etaé	Moyenne	Inconnue	Soleil	Caulic	Dense	10-15	Frais à sec et drainant	Acide à calcaire	En cœur	OUI	Résistant aux maladies	Résistant à la pollution	Résistant à la pollution	NDN	
Pp	Parrotia persica	Parrotia de Perse	Etaé	Moyenne	Inconnue	Soleil	Caulic	Léger	10-15	Tout type de sol	Acide à calcaire	Étalé	OUI	Résistant aux maladies	Résistant à la pollution	Résistant à la pollution	NDN	
PpP	Prunus avium "Piena"	Meurisier des oiseaux	Ovoïde	Rapide	Faible	Soleil	Caulic	Dense	10-15	Frais et riche, profond	Neutre à calcaire	Pivotant	OUI	Résistant au gel et au climat urbain	Résistant à la pollution	Résistant à la pollution	NDN	
Rp	Robinia pseudacacia "Bessonina"	Robinier faux acacia	Ovoïde	Moyenne	Faible	Soleil	Caulic	Léger	20-25	Frais à sec, drainé	Neutre	Étalé	OUI	Fixe l'azote de l'air - Résistant au gel	Résistant à la pollution	Résistant à la pollution	NDN	
Sj	Sapindus japonica	Sapindus du Japon	Ovoïde	Moyenne	Inconnue	Soleil	Caulic	Léger	15-20	Frais à sec, sabieux, drainé	Acide à calcaire	Étalé	OUI	Résistant au gel - Sain	Résistant à la pollution	Résistant à la pollution	NDN	
SaA	Sorbus aucuparis "Asplenifolia"	Sorbier des oiseaux	Globuleux	Moyenne	Inconnue	Soleil	Caulic	Léger	10-15	Frais à sec, drainé	Neutre à acide	En cœur	OUI	Résistant au climat urbain et capte les poussières	Résistant à la pollution	Résistant à la pollution	NDN	
Tc	Taxodium distichum	Cypripis chauve	Elané	Lente	Importante	Mi-ombre	Caulic	Léger	30-40	Frais à humidité, riche, supporte le sec	Acide	Étalé	OUI	Résistant à la pollution	Résistant à la pollution	Résistant à la pollution	NDN	
TcG	Tilia cordata "Greengate"	Tilleul à petites feuilles "Greengate"	Elané	Moyenne	Inconnue	Ombre	Caulic	Dense	15-20	Sec à frais, riche	Acide à calcaire	En cœur	OUI	Résistant à la chaleur et au gel	Résistant à la pollution	Résistant à la pollution	NDN	
Te	Tilia euchlora	Tilleul de Grinée	Ovoïde	Moyenne	Faible	Ombre	Caulic	Dense	20-25	Sec à frais, riche	Acide à calcaire	En cœur	OUI	Résistant à la chaleur et au gel	Résistant à la pollution	Résistant à la pollution	NDN	
UF	Ulmus "Frontier"	Orme "Frontier"	Conique	Moyenne	Inconnue	Soleil / Mi-ombre	Caulic	Dense	15-20	Frais et riche	Neutre à acide	En cœur	OUI	Résistant à la pollution	Résistant à la pollution	Résistant à la pollution	NDN	
ZJF	Zelkova serrata "Flekova"	Zelkova du Japon	Etaé	Moyenne	Inconnue	Soleil	Caulic	Léger	20-25	Tout type de sol	Neutre	En cœur	OUI	Résistant au vent	Résistant à la pollution	Résistant à la pollution	NDN	
ZJG	Zelkova serrata "Green Vase"	Zelkova du Japon "Green Vase"	Ovoïde	Moyenne	Inconnue	Soleil	Caulic	Léger	15-20	Tout type de sol	Neutre	En cœur	OUI	Résistant au vent et aux maladies	Résistant à la pollution	Résistant à la pollution	NDN	

ANNEXE XXII : Plan de plantation du secteur 1 – Source : (Leroy, 2019)

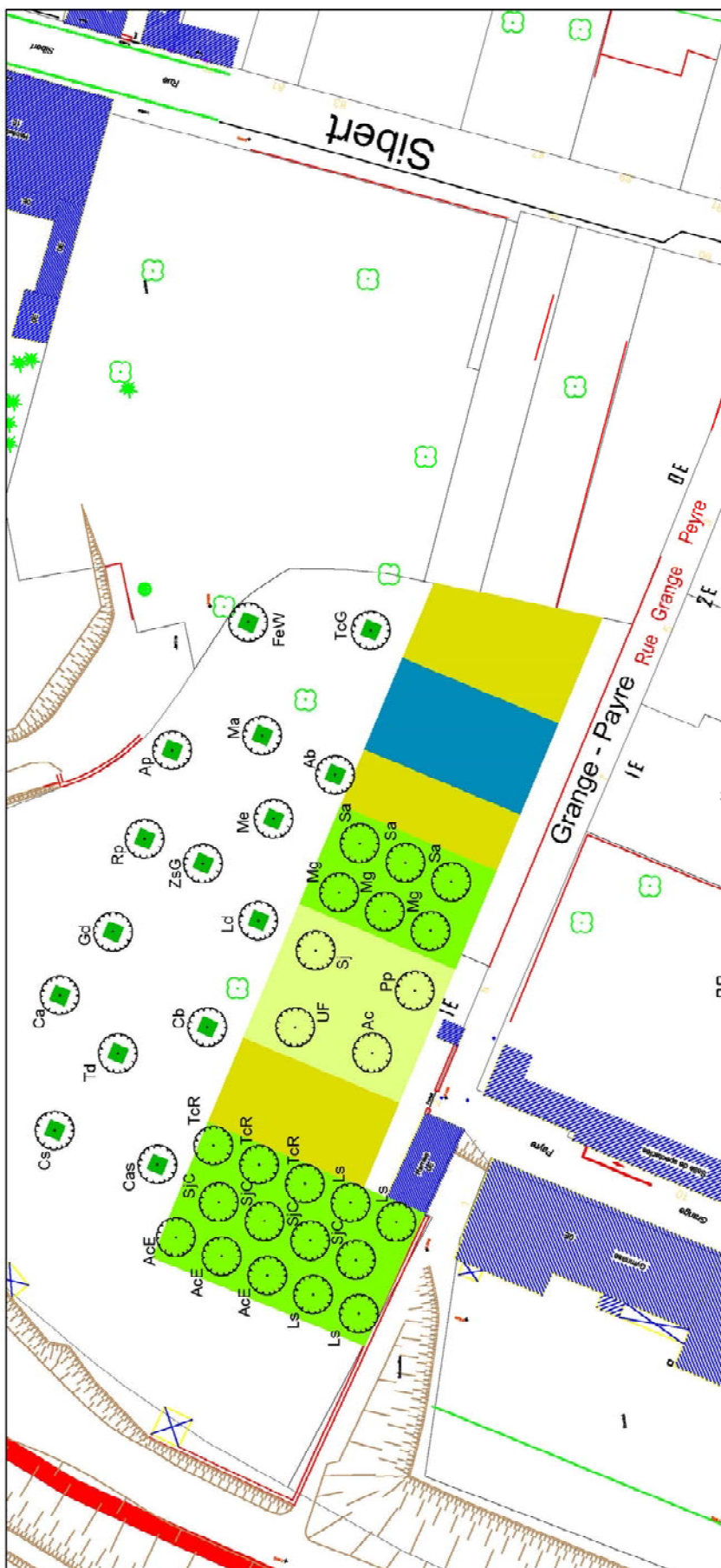


**PLAN DE ZONAGE DES PLANTATIONS - PARCELLE 331**  
 SECTEUR 1  
 2290 m<sup>2</sup>

Ech. 1/200e  
 20 m

NOMBRE D'ARBRES	NOM DES ESSENCES / USAGE "Parcs et squares"
Zone 1 : -	AI : <i>Alnus incana</i> SaA : <i>Sorbus aucuparia</i> 'Asplenifolia'
Zone 2 : 8 arbres	FeD : <i>Fraxinus excelsior</i> 'Diversifolia' Te : <i>Tilia euchora</i>
Zone 3 : -	Gb : <i>Gingko biloba</i> ZsF : <i>Zelkova serrata</i> 'Flekova'
	Gt : <i>Gleditsia triacanthos</i>
	Pap : <i>Prunus avium</i> 'Plena'

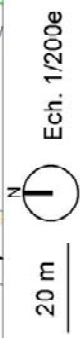
ANNEXE XXIII : Plan de plantation du secteur 2 – Source : (Leroy, 2019)



PLAN DE ZONAGE DES PLANTATIONS - PARCELLE 35 ET 132

SECTEUR 2

1265 m<sup>2</sup>



NOMBRE DE 'ARBRES	NOM DES ESSENCES / USAGE "Parcs et squares"	NOM DES ESSENCES / USAGE "Arbres d'alignement"
Zone 1 : 14 arbres	Ab : Acer bergianum	AcE : Acer campestre 'Elsrijk'
Zone 2 : -	Ap : Acer pseudoplatanus	Ls : Liquidambar styraciflua
Zone 3 : 4 arbres	Ac : Alnus cordata	Mg : Metasequoia glyptostroboides
Zone 4 : 6 arbres	Cb : Carpinus betulus	SJC : Sophora japonica 'Columnaris'
Zone 5 : -	Ca : Cedrus atlantica	Sa : Sorbus aria
Zone 6 : -	Cas : Celtis australis	TcR : Tilia cordata 'Rancho'
Zone 7 : 15 arbres	Cs : Ceras siliquastrum	
	FeW : Fraxinus excelsior 'Westhof'	
	Gd : Gymnocladus dioica	
	Ld : Larix decidua	
	Me : Malus 'Everest'	
	Ma : Morus alba	
	Pp : Parrotia persica	
	Rp : Robinia pseudoacacia	
	Sj : Sophora japonica	
	Td : Taxodium distichum	
	TcG : Tilia cordata 'Greenspire'	
	UF : Ulmus 'Frontier'	
	ZsG : Zelkova serrata 'Green Vase'	



	Diplôme : <b>Ingénieur de l'Institut Supérieur des Sciences agronomiques, agroalimentaires, horticoles et du paysage</b> Spécialité : <b>Paysage</b> Spécialisation / option : <b>Paysage : opérationnalité et projets</b> Enseignant référent : <b>Laure Beudet</b>
Auteur(s) : <b>Louison LEROY</b> Date de naissance* : <b>24/03/1994</b>	Organisme d'accueil : <b>atelier VILLES &amp; PAYSAGES</b>
Nb pages : <b>46</b> Annexe(s) : <b>23</b>	Adresse : <b>112 Cours Vitton</b>
Année de soutenance : <b>2019</b>	<b>69006 LYON</b> Maître de stage : <b>Laurent Beyron</b>
Titre français : <b>Palette végétale : intégrer les sols construits et le milieu urbain</b> Dans le contexte d'un projet mené par AGREGE Titre anglais : <b>Plant palette : integrate soft soil and urban environment</b> In the context of the AGREGE project	
Résumé (1600 caractères maximum) : Au cours du temps, la place du végétal en ville a évolué et a pris une proportion considérable au cœur des politiques d'urbanisation lors de ces dernières années. Elle représente la prise de conscience des changements climatiques en cours : précipitations torrentielles, vagues de chaleur, et sécheresses. Les cités urbaines font face à des enjeux de taille auxquels le végétal peut-être un levier d'action. Pour s'implanter durablement, les végétaux ont besoin d'un socle fertile. Or, la terre utilisée pour les projets d'aménagements urbains devient une ressource qui se raréfie. Afin de combler ce manque, l'innovation du génie pédologique a permis de créer des sols à partir de matériaux, considérés comme sous-produits ou déchets. Aujourd'hui les paysagistes doivent de manière contextuelle assurer la végétalisation de la ville pour la mener vers une résilience, en utilisant ces nouveaux sols construits. Comment peut-il procéder pour proposer des palettes végétales adaptées à ces deux contextes ? L'objet de ce mémoire est de tenter de répondre à cette question et ainsi proposer des pistes de réflexion, pour mettre, comme le disait Francis Hallé, « le bon arbre au bon endroit ». Une étude permettra de comprendre les éléments responsables de l'épuisement de la ressource « terre végétale » et de ce qui a poussé le génie pédologique à innover en construisant des sols. Le lien entre les arbres et certains enjeux climatiques seront abordés. Le programme AGREGE permettra d'illustrer la difficulté de sélection d'essences pour le paysagiste.	
Abstract (1600 caractères maximum): Planting areas have been evolved and took an important part in the urban planning during the last few years. It explains our realization of climate change: heavy rain, hot spell, and drought. The urban setting faces up to major issues that vegetation can be a lever for action. To be well rotted, plants need fertile soil. But the soil which is usually used for urban projects become a rare natural resource. To recover the deficit, the pedology engineering has created a new type of soil build with sub-products and urban waste materials. Today, to resilient cities, landscape architects must bring more vegetation back, like trees while using soil construction. How the landscape architects can propose adapting urban planting lists adapting these two contexts? The aim of this thesis is to answer the question and propose something to think about "put the right tree at the right place" like said Francis Hallé. A study to seek causes of the depletion of the nature resource, will help to understand why pedology engineering create the soft soil. The connection between trees and some climate change issues will be treated. The AGREGE program will be discussed to show difficulties of selecting plants for landscape architects.	
Mots-clés : <b>paysage, palette végétale, construction de sols, déchet, milieu urbain</b> Key Words: <b>landscape, plant palette, soil construction, waste, urban environment</b>	

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

