

GRANDLYON

communauté urbaine

SCIENCIL – FICHE SOL

SYNTHESE THEMATIQUE - SOLS DE LA CIL

TABLE DES MATIERES

Synthèse thématique - Sols de la CIL	1	
1. Préambule	4	
2. Contexte	4	
2.1 Les sols urbains reconstitués	4	
2.1.1 Fonctions des sols urbains reconstitués	4	
2.1.2 Limites et objectifs d'amélioration des sols de plantation	5	
2.1.3 Synthèse des hypothèses testées par le dispositif de suivi des sols de la CIL	6	
2.2 Occupation antérieure de la CIL et contexte pédologique	7	
2.2.1 Rappel historique	7	
2.2.2 Les sols et matériaux en place avant la CIL	8	
3. Méthode d'étude des sols	9	
3.1 Typologie de sols reconstitués	9	
3.1.1 Les sols du parc Sud	9	
3.1.2 Les sols du Triangle Interpol	10	
3.1.3 Les sols des Bandes Boisées	11	
3.1.4 Les sols des espaces verts amont	12	
3.1.5 Les sols de terre-plein	13	
3.2 Le suivi des sols	14	
3.2.1 Variables mesurées	14	
1.1.1.1. Description pédologique du sol		14
1.1.1.2. Analyses en laboratoire		14
1.1.1.3. Mesures in situ		15
3.2.2 Campagnes de mesures	15	
4. Résultats	16	
4.1 Dimension et configuration des sols de plantation	16	
4.1.1 Colonisation racinaire des sols de plantation	16	
4.1.2 Cas particulier des sols de terre-plein	17	
4.2 Nature des matériaux terreux	18	
4.3 Dynamique d'évolution de la matière organique du mélange terre-compost	18	
4.4 Transferts hydriques en relation à l'encaissant	21	
4.5 Densité et compacité des sols	23	
5. Proposition de pratiques de reconstitution de sols et de méthodes de suivi	25	
5.1 Les indices du bon fonctionnement d'un sol fertile	25	
5.2 Construire un sol fertile dans le Lyonnais	26	
5.2.1 Choix des matériaux terreux	26	
5.2.2 Configurations optimales des sols	26	
5.2.3 Maîtriser les transferts hydriques verticaux	27	
5.2.4 Itinéraire technique de reconstitution de sol	29	

1.1.1.4.	Décapage et stockage	29
1.1.1.5.	Stockage	30
1.1.1.6.	Mise en œuvre des matériaux fertiles	30
5.3	Maitriser la qualité de la construction des sols fertiles	31
6.	Perspectives	32

1. PREAMBULE

Cette fiche traite d'une opération de reconstitution de sols urbains réalisée dans le cadre de l'aménagement de la Cité Internationale de Lyon (CIL) dans le courant des années 1990, conçue ici comme un observatoire du comportement des sols et des arbres dans les conditions de réalisation.

Ce travail s'attache à décrire les processus d'évolution des sols ainsi construits et à vérifier que leurs caractéristiques initiales et actuelles sont propices au développement du végétal.

Cet observatoire n'impliquait pas de comparaison de différentes méthodes de mise en œuvre. En effet, d'autres pratiques et techniques existent pour la reconstitution des sols, comme celle du mélange terre-pierres par exemple. Mais une étude comparative aurait exigé d'autres moyens et conditions de réalisation, qui n'entraient donc pas dans le champ de ce projet.

Les conclusions que l'on y trouvera s'appuient donc sur les observations nombreuses et détaillées effectuées sur le terrain, confortées au besoin par des considérations issues de connaissances agronomiques communément admises.

2. CONTEXTE

2.1 LES SOLS URBAINS RECONSTITUES

2.1.1 Fonctions des sols urbains reconstitués

Les sols urbains présentent la particularité d'être majoritairement construits par l'homme, afin d'assurer au mieux des services utiles à la ville :

Supporter les bâtiments et infrastructures aériennes diverses ;

Accueillir des infrastructures souterraines (réseaux, bâtiments,...) ;

Recueillir, rediriger ou stocker les eaux pluviales ;

Porter le développement du végétal.

Les transformations profondes subies par les sols urbains concernent principalement l'amélioration de leurs propriétés mécaniques. Néanmoins, cela affecte significativement une majorité des caractéristiques qu'ils présentaient à l'état naturel : perméabilité, rétention en eau, porosité, compacité, fertilité chimique et biologique, état de contamination, etc. La construction des sols à vocation géotechnique nécessite la plupart du temps un remplacement des matériaux initialement présents par des matériaux minéraux exogènes ou un traitement mécanique ou physique *in situ*.

La proportion de sols naturels préservés dépend sensiblement de la stratégie d'urbanisation menée par la ville, mais un gradient positif est souvent observé en s'éloignant du centre-ville. Ces espaces végétalisés font l'objet d'une intensité de gestion variable en fonction de leur usage (espace récréatif, agriculture, boisement, friche, etc.).

Ainsi, les sols urbains sont majoritairement composés de matériaux issus de carrière, ou d'un amoncellement de matériaux peu favorables du point de vue mécanique, souvent compactés, plus ou moins pollués et mélangés à des déchets anthropiques divers. Dans ce contexte, l'amélioration ou la création de sols de plantation doit à la fois permettre de pallier les contraintes spécifiques du milieu urbain et de subvenir aux fonctions essentielles permettant le développement végétal :

Contraintes fréquentes, caractéristiques du milieu urbain	Fonctions essentielles permettant le développement du végétal
Interface avec les sols urbains « portants » alentours	Volume de matériaux fertile suffisant pour l'exploration racinaire
Volume restreint	Fourniture continue en eau et en nutriments

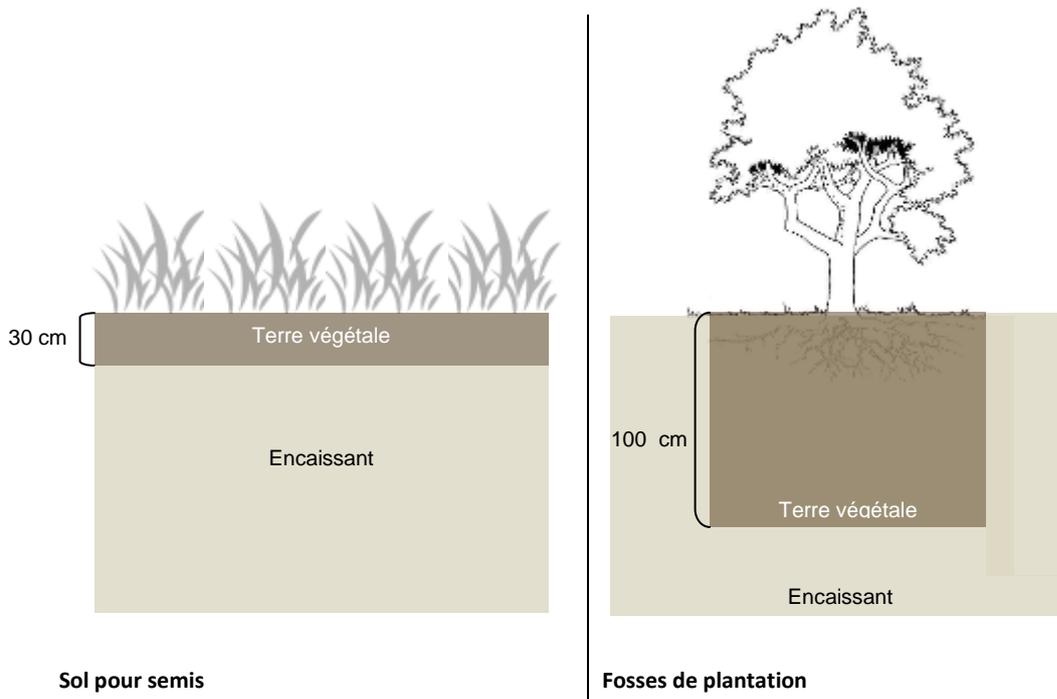
Matériaux en place et encaissant pas ou peu fertiles	Absence d'engorgement
Impluvium important (imperméabilisation des surfaces alentours)	Porosité et aération suffisantes
Piétinement, roulement	Pas de pollution (faible phytotoxicité)
Pas de connexion à la nappe sous-jacente	

Contraintes et fonctions essentielles des sols de plantation en milieu urbain

Principes usuels de constitution des sols de plantation avant Sciencil

Avant la diffusion des innovations apportées par le programme Sciencil en 1994, deux types de sols de plantations étaient généralement mis en place :

- Les sols pour semis étaient constitués d'une épaisseur constante de terre d'apport d'origine agricole (environ 30 cm), quel que soit le type de plantation envisagé (pelouse, prairie, plantes couvre-sol, arbustes).
- Les fosses de plantation des grands sujets faisaient l'objet d'un apport unique de terre végétale d'origine agricole sur environ 1 m de profondeur et 1,5 m de largeur soit environ 2,5 m³ par sujet. Ces fosses étaient unitaires *i.e.* déconnectées de tout sol fertile alentour.



2.1.2 Limites et objectifs d'amélioration des sols de plantation

Les sols fertiles constitués selon les modèles décrits par le paragraphe pr c dent présentent des limites importantes qui réduisent sensiblement la pérennité des végétaux semés ou plantés :

- Limitation importante du développement racinaire
- Problèmes d'engorgement ou d'assèchement excessif

Les facteurs à l'origine de ces problèmes sont multiples mais ils concernent en général les étapes clés suivantes :

Conception du sol fertile

- Mauvaise connaissance du type d'encaissant et des matériaux jouxtant le sol fertile (propriétés chimiques, physiques, comportement hydraulique)
- Pas d'optimisation du profil de perméabilité du sol fertile en fonction des contraintes locales (climat, impluvium, capacité d'infiltration en profondeur)
- Pas d'optimisation du volume de sol prospectable par les racines

Réalisation du sol fertile

- Faible maîtrise de la qualité des matériaux d'apport (en particulier état d'humidité et de compacité)
- Dégradation des matériaux pédologiques durant le transport ou la constitution des sols

De plus, l'utilisation de la terre végétale pour constituer des fosses de plantation est excessive : des matériaux organiques sont mis en place dans l'intégralité de la fosse. Or, la matière organique de type compost se décompose mal en profondeur en dessous de 30cm par manque d'oxygène. La ressource non renouvelable que constitue la terre végétale est donc gaspillée car elle n'est pas utilisée de façon optimale dans les sols de plantation.

C'est pourquoi les sols fertiles de la CIL ont fait l'objet d'un effort particulier dans leur conception et le suivi de la qualité de leur réalisation. Les types de sols fertiles habituellement réalisés avant la CIL ont été améliorés afin de mieux servir la pérennité du végétal :

- Sols pour semis → sols superficiels
- Fosse de plantation unitaire → tranchée continue
- Matériaux homogène en profondeur → constitution de couches horizontales de matériaux aux propriétés maîtrisées et différenciées (horizons pédologiques)
- Diversification des matériaux utilisés : terre végétale, terre non organique, mélange terre / compost, mélange terre / pierre, terre caillouteuse, ...

2.1.3 Synthèse des hypothèses testées par le dispositif de suivi des sols de la CIL

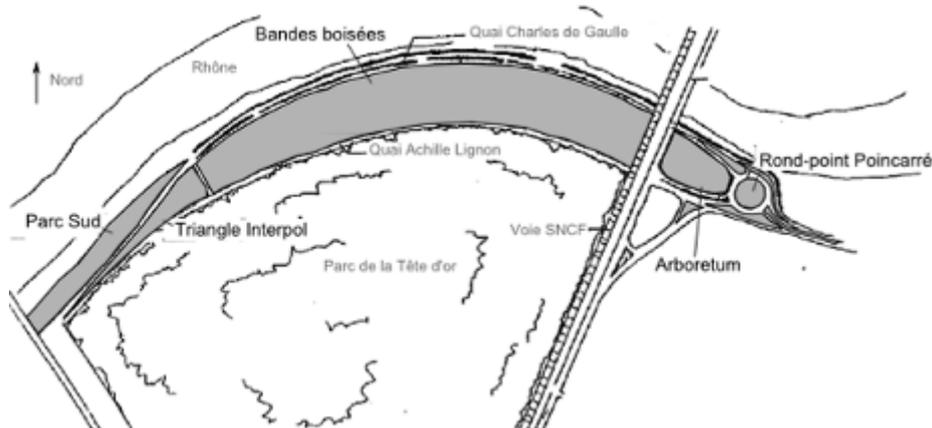
Les points d'innovation détaillés ci-dessus et les efforts de conception et de maîtrise de la qualité de la construction des sols fertiles ont été testés, en grandeur nature, par le chantier de plantation de la CIL. En ce qui concerne les sols, les moyens mis en œuvre en phase chantier et les campagnes de suivi pédologique opérées par la suite ont eu pour objectif de tester les hypothèses suivantes :

- La tranchée continue avec horizons différenciés est-elle une bonne alternative à la fosse unitaire ? Peut-on s'assurer de la qualité de sa constitution ?
- Peut-on créer différents types de sols fertiles, aux propriétés distinctes, en utilisant les matériaux disponibles dans la région ? Peut-on s'assurer de la qualité de ces matériaux importés ?
- Le mélange terre / compost constitue-t-il un horizon de surface fonctionnel ?
- Quelle épaisseur définir pour chaque horizon sur le profil entier, en particulier quelle profondeur pour l'horizon de surface organique ?
- Comment réduire le besoin en arrosage des plantations ?

2.2 OCCUPATION ANTERIEURE DE LA CIL ET CONTEXTE PEDOLOGIQUE

2.2.1 Rappel historique

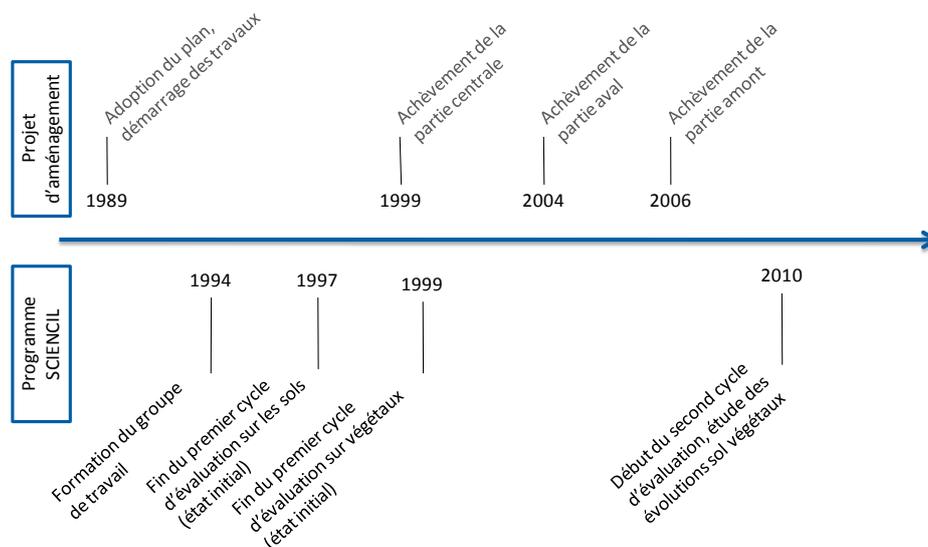
La Cité Internationale a vu le jour grâce au concours international lancé en 1984 pour la réhabilitation de ce secteur. C'est le plan de composition urbaine conçu par Renzo Piano et Michel Corajoud qui a été adopté en 1989.



Plan de repérage des 5 secteurs composant le périmètre d'étude de SCIENCIL

Le projet s'est ensuite déroulé sans interruption jusqu'en 2006, selon différentes étapes de travaux :

- En service depuis **1995**, le **nouveau quai** a fait l'objet d'aménagement des voies de circulation et du rond-point paysager organisant les échanges avec les boulevards urbains et les voies d'accès au Périphérique.
- **1996-1999 : Achèvement de la partie centrale.** Composée du centre de congrès, du musée d'art contemporain de Lyon, de l'hôtel Hilton, d'un complexe cinéma, de bureaux et commerces, d'un parking public et d'espaces verts, la partie centrale qui constitue un véritable pôle culturel, économique et hôtelier.
- **2004 : Achèvement de la Partie Aval** constituée de 300 logements divisés en plusieurs pavillons, une crèche et deux pavillons de bureaux.
- **2006 : Achèvement de la Partie Amont** qui comporte l'amphith atre, l'extension du centre de congrès, des pavillons de bureaux avec restaurants et deux hôtels.



Etapes-clés de constitution de la CIL et du programme SCIENCIL

2.2.2 Les sols et matériaux en place avant la CIL

A la moitié du XIX^{ème} siècle des inondations violentes incitent la Ville de Lyon et l'Etat à construire successivement deux digues (1838 et 1859). Ces infrastructures sont à l'origine de la création du site qui deviendra celui du Parc de la Tête d'Or et du Quai Achille Lignon. La foire de Lyon s'établit à l'emplacement de l'actuelle CIL entre 1916 et 1984 (voir les 7 halls d'exposition sur la photographie ancienne ci-dessous).



Vue aérienne de la zone de la CIL en 2008 et en 1943 (images IGN et NASA)

La zone de la CIL, du parc Sud et du triangle Interpol étaient donc initialement des espaces de remblaiement ayant certainement accueilli des matériaux d'origine très diverse (graves du Rhône, matériaux géologiques divers, matériaux de démolition, déchets urbains, ...). Les travaux de la CIL ont nécessité l'évacuation d'éventuels horizons pédologiques ayant pu se développer sur de tels substrats, et les encaissants ont été reprofilés. La nature des matériaux profonds, situés sous les actuels sols fertiles de la CIL varient en fonction du secteur considéré :

- Parc Sud : graves naturelles du Rhône, peu ou pas remaniées ;
- Triangle Interpol et sous-sol de la CIL : remblais divers d'origine urbaine et anthropique très compactés ;
- Frange Ouest et partie amont : grave d'origine géologique (peu de déchets) compactée formant la digue.

Ces différents matériaux encaissants ont été observés et caractérisés lors des différentes campagnes de suivi pédologique du site.

Les différentes reconstitutions de sols ont lieu à partir de 1994.

3. METHODE D'ETUDE DES SOLS

3.1 TYPOLOGIE DE SOLS RECONSTITUES

Les sols étudiés appartiennent à la classe des ANTPHROPOSOLS RECONSTITUES d'après le Référentiel pédologique français de 2008 (Baize et Girard, 2008). Les typologies de sols présentées ci-après sont proposées à partir d'un regroupement selon leurs propriétés agronomiques.

3.1.1 Les sols du parc Sud

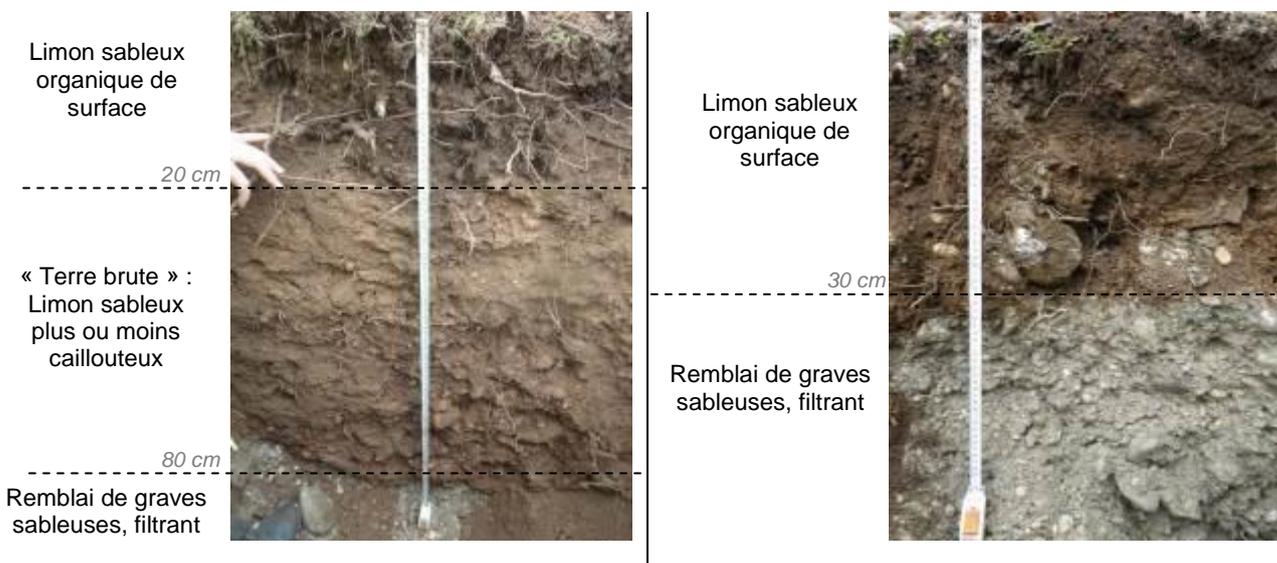
Dans la zone du parc Sud, située le long du Rhône au sud de la Cité Internationale, deux types de sols ont été reconstitués :

-  sols profonds limono-sableux de plantation
-  sols peu épais limono-sableux



Les sols profonds ont été reconstitués dans les zones arborées afin d'offrir une réserve en eau et éléments nutritifs suffisante pour répondre aux besoins des grands sujets. Ils sont généralement construits sur 1m de profondeur. En surface, on retrouve 20 à 30 cm de terre de nature limono-sableuse organique, résultant d'un apport de mélange terre-compost au moment de la plantation. La terre brute sous-jacente est composée de limons sableux plus ou moins caillouteux et repose sur une couche de remblais de graves sableuses filtrants,

Les sols supports de pelouse ont fait l'objet d'un apport de mélange terre-compost sur 30 cm d'épaisseur, ce qui est suffisant pour répondre aux besoins de ce type de plantation. Ils reposent eux aussi sur des remblais de graves sableuses perm eables et peu compactes.



 Sol profond limono-sableux de plantation

 Sol peu épais limono-sableux

3.1.2 Les sols du Triangle Interpol

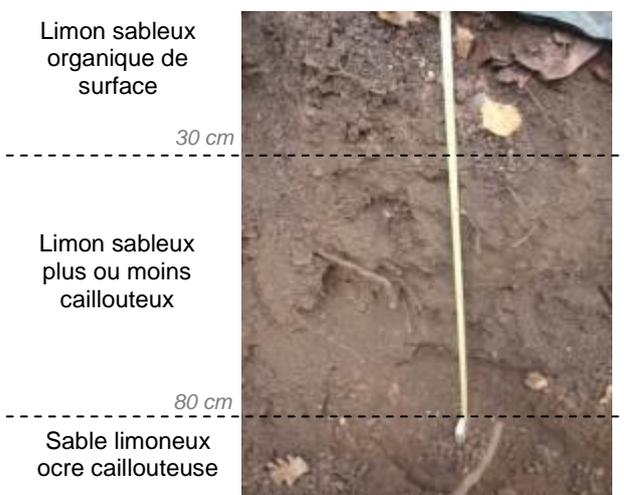
Dans la zone du triangle Interpol, située au sud de la Cité Internationale deux types de sols ont été reconstitués :

-  sols profonds limono-sableux de plantation de talus
-  sols peu épais limono-sableux

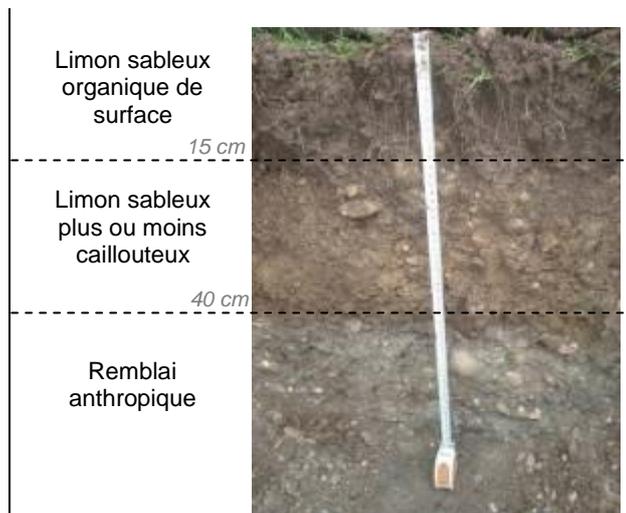


Les talus longeant le quai Charles De Gaulle sont arborés, les sols ont donc été reconstitués sur 1m de profondeur tout comme les sols profonds du Parc Sud. Les matériaux constitutifs de ces sols sont de même nature que les matériaux terreux utilisés pour le parc Sud : il s'agit de limons sableux plus ou moins caillouteux. En profondeur on observe là encore un matériau sain et filtrant mais de nature différente : il s'agit de sable limoneux ocre caillouteux compacté, peu perm eable.

Tous les sols de la zone engazonnée ont fait l'objet d'une reconstitution superficielle. Une fine couche sous-jacente de remblais de graves sableuses est parfois présente (semblables à ceux observés dans les horizons profonds du Parc Sud), afin de régler précisément l'altimétrie des sols finis. En fond de profil un horizon de remblai anthropique très caillouteux, très compact et très peu perm eable est observé.



 Sol profond limono-sableux de talus



 Sol peu épais limono-sableux

3.1.3 Les sols des Bandes Boisées

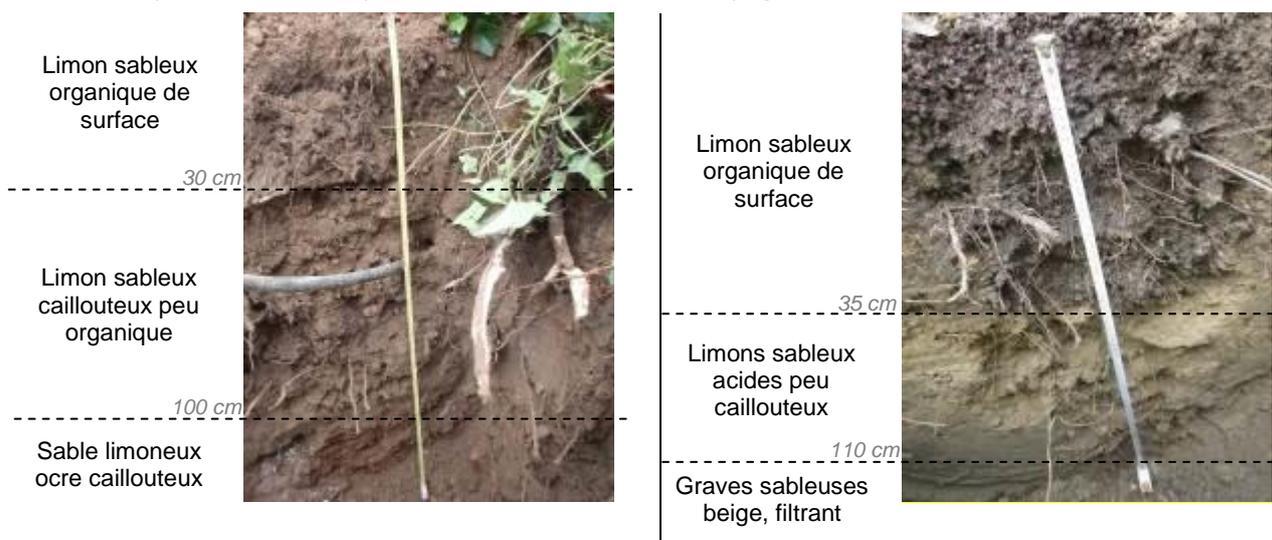
Dans la zone des bandes boisées, situées tout le long de la Cité Internationale, on retrouve uniquement des sols limoneux profonds (>1,2m). Les terres d'apport constituant ces sols sont d'origines variables (3 sites régionaux d'approvisionnement) mais présentent des caractéristiques pédologiques homogènes.

- sols profonds limoneux de plantation
- sols profonds limono-sableux sur dalle (ponctuel, non observé)



Les sols profonds reconstitués sur les bandes boisées pour les besoins des plantations (associations d'arbres, arbustes et plantes couvre-sols) sont parfois recouverts d'une couche de mulch d'origine minérale (pouzzolane), présente sur environ 15 cm. Ils sont composés de la succession de matériaux terreux suivante : 30 cm de terre limono-sableuse organique et 70 cm de terre limono-sableuse. Cette dernière peut être d'origines variées : des limons sableux caillouteux semblables à ceux observés dans le Parc Sud, ou des limons sableux acides (pH = 6) et très peu organiques, issus de parcelles décapées dans les communes voisines (Genas, Balan et Corbas). En fond de fosse, des matériaux d'origines diverses sont observés : remblai de gravas sableuses ou sable limoneux caillouteux ocre. Ces deux matériaux sont tous deux perméables.

Une partie de ces sols profonds reposent sur des dalles b tons. Cette configuration est très ponctuelle et n'a pas été constatée lors des campagnes d'observation récentes



Sols profonds limoneux de plantation (matériaux d'origines différentes)

3.1.4 Les sols des espaces verts amont

Dans la zone amont de la Cité Internationale, deux types de sols ont été reconstitués :

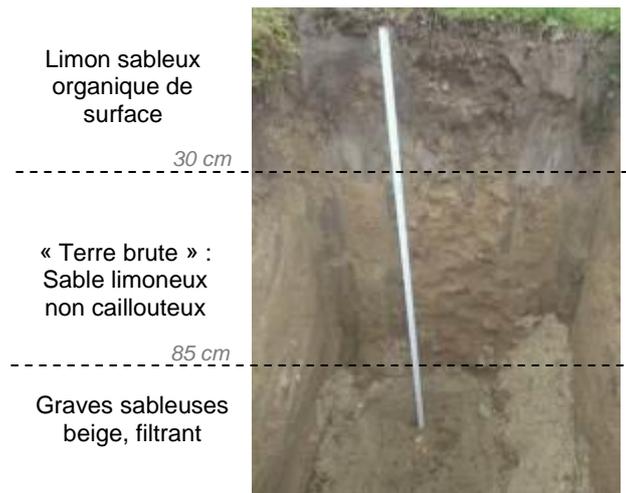
-  sols profonds limono-sableux de plantation
-  sols peu épais limono-sableux



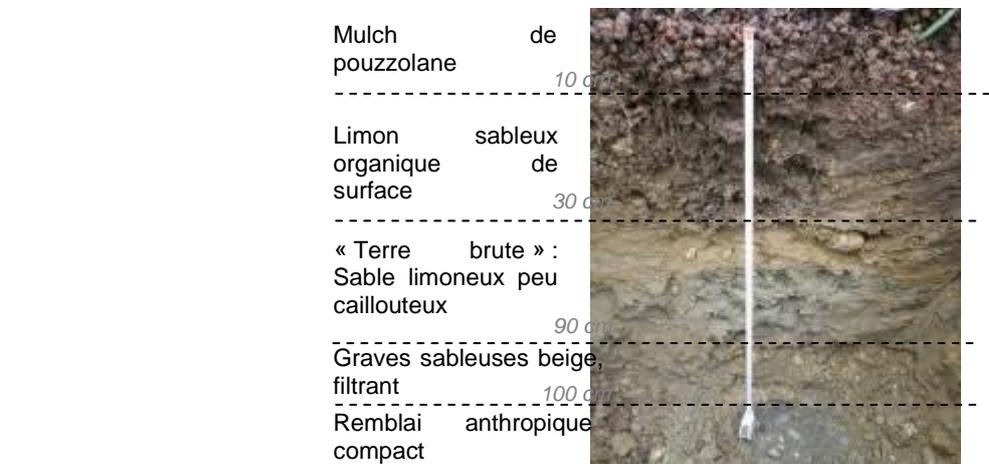
Les sols profonds sont regroupés autour des espaces arborés. Construits selon le modèle déjà décrit pour les autres secteurs, ils présentent cependant certaines spécificités : leur profondeur peut varier légèrement (1m   1,2m), le type d'encastrement est de nature variée (remblai de graves sableuses en limite Nord, graves sableuses beige d'origine naturelles mises en place pour calage altimétrique sur remblai anthropique caillouteux et compact). De plus, certains présentent une fine couche de mulch minéral protecteur en surface.



Sol profond limoneux de plantation (nord)



Sol profond limoneux de plantation (centre)



Sol profond limoneux de plantation avec mulch en surface (sud-est)

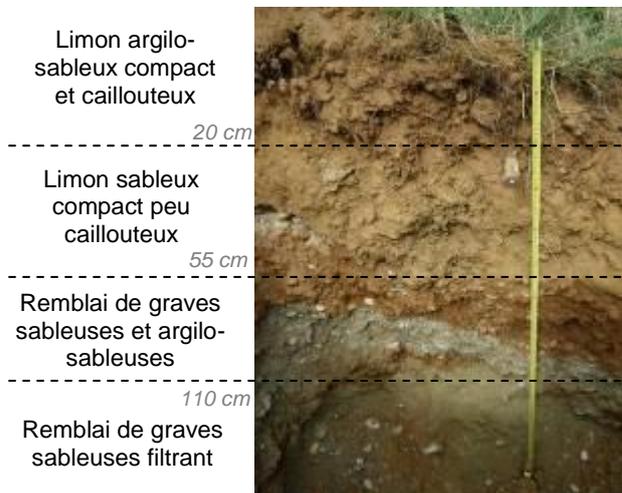
3.1.5 Les sols de terre-plein

Au niveau du rond-point Poincaré, trois types de sols ont été observés :

- ■ sol naturel limono-sableux, tronqué (suppression de l'horizon superficiel et d'une partie de l'horizon sous-jacent), non remanié
- ■ sol reconstitué de talus, remblais et matériaux fertiles hétérogènes
- ■ sol reconstitué sableux à argilo-sableux peu profond, caillouteux et compact



Les secteurs les moins perturbés (bords du Rhône, terre-plein central) présentent des sols naturels limono-sableux, tronqués (suppression de l'horizon superficiel et d'une partie de l'horizon sous-jacent). Les sols de talus ont été remblayés de façon hétérogène avec des matériaux fertiles et des matériaux graveleux. Les sols des abords routiers sont des sols reconstitués peu épais : ils sont composés d'un horizon de surface de limon sableux organique et comportent une couche de limons argilo-sableux caillouteux sous-jacents. Ils reposent sur un encaissant de remblai de graves sableuses drainant.



Limon argilo-sableux compact et caillouteux

20 cm

Limon sableux compact peu caillouteux

55 cm

Remblai de graves sableuses et argilo-sableuses

110 cm

Remblai de graves sableuses filtrant



Limon sableux organique de surface

15 cm

Limon argilo-sableux compact et caillouteux

35 cm

Remblai de graves sableuses, filtrant

■ Sol reconstitué de talus, remblais et matériaux fertiles hétérogènes

■ Sol sableux à argilo-sableux peu profond, caillouteux et compact



■ Sol naturel limono-sableux, tronqué, non remanié, non compact, non caillouteux (terre-plein central)

3.2 LE SUIVI DES SOLS

3.2.1 Variables mesurées

La caractérisation agropédologique des sols comprend plusieurs types de mesures et d'observations :

1.1.1.1. Description pédologique du sol

La dernière campagne d'observation avait notamment pour objectif de vérifier l'adéquation des sols actuels avec la typologie des sols à reconstituer élaborée dans le cadre de l'aménagement de la CIL. La description du sol au sens pédologique consiste à observer et caractériser le sol en place : des profils de sol sont décrits (face verticale d'une fosse creusée à la pelle mécanique) et des carottes sont prélevées lors de sondages complémentaires à la tarière pédologique manuelle. Une bonne observation est indispensable pour percevoir certains caractères : identification et caractérisation des horizons de leur succession et de leur épaisseur, formes et dimensions des agrégats, enracinement, signes d'hydromorphie et/ou excès d'eau localisés, etc. De plus, l'analyse du contexte environnemental permet de replacer le sol au sein de son environnement naturel et humain, afin de mieux comprendre les conditions de sa formation et la dynamique de son fonctionnement.

Environnement	Couvert végétal, état de surface du sol, position topographique, contexte hydrogéologique, distance aux éléments structurants du paysage ou du bâti
Terre fine	Texture, état d'humidité, structure, hydromorphie, couleur, taux de calcaire, porosité, compacité
Activité biologique	Macrofaune du sol : quantité, type Racines : taille, état sanitaire
Eléments grossiers	Abondance, taille, type, origine
Eléments anthropiques	Géotextiles, dispositifs d'arrosage, fondations ou structures d'éléments bâtis, débris de brique, béton, déchets
Autres traits pédologiques	Revêtements, descentes d'horizons

1.1.1.2. Analyses en laboratoire

Les analyses de laboratoire permettent de caractériser plus finement les matériaux constitutifs du sol. Elles donnent une description détaillée de leurs propriétés chimiques et physiques. Ces analyses ont une portée agronomique : elles permettent d'évaluer précisément la fertilité physique, chimique et biologique du sol, et notamment de préciser la disponibilité en eau et éléments nutritifs indispensables au développement végétal.

Caractéristiques physiques	Capacité de rétention en eau Masse volumique apparente sèche sur échantillon reconstitué Refus à 2 mm Analyse granulométrique 5 fractions
Caractéristiques chimiques	pH eau et pH KCl Conductivité CEC Calcaire total, Taux de matière organique, Azote total et rapport C/N Teneurs en cations échangeables: K ⁺ , Ca ²⁺ , Mg ²⁺ , Na ⁺ et phosphore assimilable ETM : As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Sb, Se, V, Zn

1.1.1.3. Mesures in situ

Ce sont des mesures effectuées sur le sol en place, afin de comprendre son fonctionnement en s'affranchissant de la perturbation provoquée par l'échantillonnage (nécessaire pour les analyses en laboratoire) :

Mesure de la densité apparente par sonde gammamétrique

La sonde gammamétrique permet de mesurer la densité apparente du sol en place en utilisant une source radioactive de rayons gamma. Cette méthode est rapide et a l'avantage de ne pas perturber le sol étudié. Il est possible d'effectuer des mesures en profondeur sur de nombreuses tranches de sol minces et successives dans un temps limité. C'est une alternative rapide et non destructive à la mesure classique (méthode au cylindre).

Mesure de la perméabilité

Des essais au perméamètre de Guelph (entre autres méthodes disponibles) permettent de mesurer la perméabilité c'est-à-dire la capacité d'infiltration de l'eau dans les sols reconstitués à différentes profondeurs : horizons superficiels, intermédiaires et profonds.

Pénétrométrie

L'utilisation d'un pénétromètre permet de déterminer la résistance à la pénétration d'un sol c'est-à-dire son état de compacité et (dans une certaine mesure) de la facilité avec laquelle les racines vont pouvoir y prospecter.

3.2.2 Campagnes de mesures

Depuis la formation du groupe de travail Sciencil en 1994, de nombreuses séries de mesures et observations ont été menées. Celles-ci sont organisées en deux campagnes principales : caractérisation de l'état initial (1994 à 1997) et caractérisation de l'état contemporain (2009 à 2012). Leur objectif est de suivre l'évolution de certains paramètres pédologiques et de contrôler la fonctionnalité du sol fertile au cours du temps.

Le type et le volume de données mesurées à l'état initial et à l'état actuel sont récapitulés dans le tableau suivant :

	Nombre de données acquises entre 1994 et 2002	Nombre de données acquises entre 2009 et 2012
Description	56	43
Chimie	26	40
Granulométrie	26	40
Perméamétrie	32	10
Densité	421	0
Pénétrométrie	71	0

Récapitulatif des données acquises entre 1994 et 2012

4. RESULTATS

4.1 DIMENSION ET CONFIGURATION DES SOLS DE PLANTATION

4.1.1 Colonisation racinaire des sols de plantation

Les sols continus offrent aux dispositifs racinaires des plantations un volume de prospection très supérieur à celui disponible dans une fosse unitaire. Les observations menées 15 ans après les travaux de plantation mettent en évidence une colonisation racinaire importante dans les bandes boisées et plus généralement dans l'ensemble des sols continus.

En profondeur, les racines pénètrent largement dans les horizons peu organiques de sous-face (en dessous de 30 cm) qui leur dispensent eau et sels minéraux. Des racines de diamètre relativement important (de 1 à 2 mm) ont été observées jusqu'à plus d'un mètre de profondeur. Leur progression en profondeur est néanmoins stoppée par l'encaissement de remblai de graves sableuses ou de remblai anthropique (selon les zones envisagées, voir § 1.2.2).



Bandes boisées : les racines sont observables jusqu'à plus d'1m de profondeur



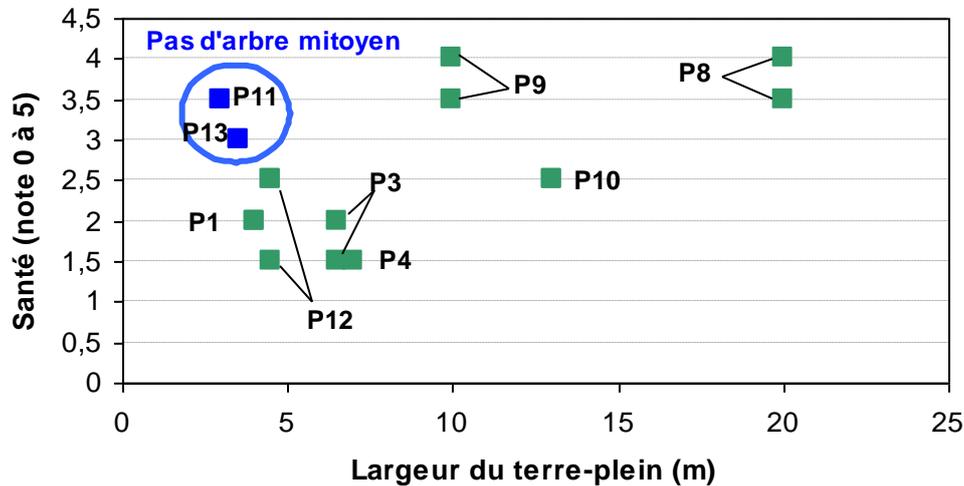
Parc Sud : Transition entre sol superficiel et sol profond ; le tronc de l'arbre le plus proche est à environ 3m de l'extrémité de la fosse (côté droit)

Dans le sens horizontal, les racines s'étendent largement en dehors de la surface qu'aurait pu offrir une fosse unitaire. Dans le Parc Sud, des racines de 2 mm de diamètre ont été observées à plus de 5 m du tronc, jusqu'à environ 50 cm de profondeur. De plus, lorsque les sols profonds de plantation jouxtent (sans aucune discontinuité) des sols superficiels sous couvert herbacé, les racines continuent leur progression dans l'horizon de surface de ce dernier.

Ces observations indiquent que le volume de prospection racinaire offert par la fosse unitaire est très limitant par rapport aux besoins de l'arbre. Le sujet ayant la possibilité d'explorer un volume de sol moins contraint dispose d'une quantité de nutriments plus importante, ce qui renforce sa pérennité et le rend moins sensible aux contraintes environnementales exceptionnelles (sécheresse, blessure, maladie, etc.).

4.1.2 Cas particulier des sols de terre-plein

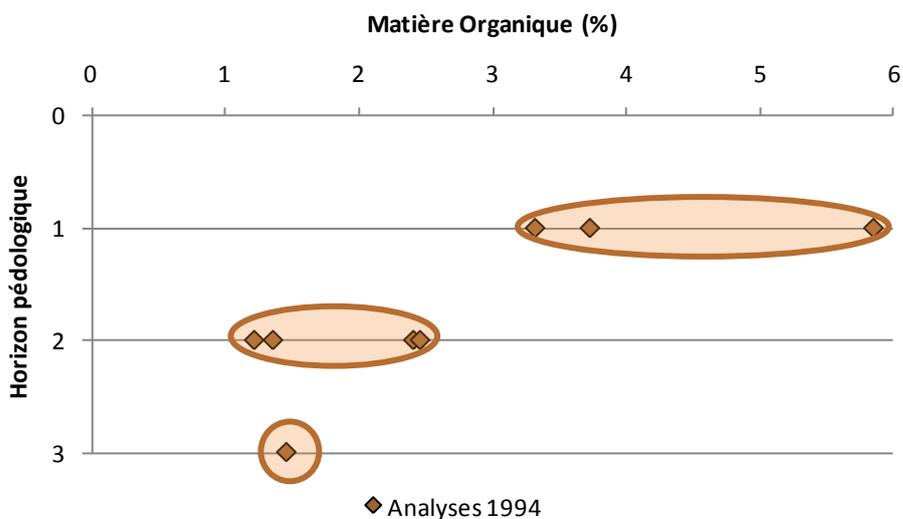
Les sols de plantation de terre-plein présentent des contraintes spatiales très fortes en raison de la présence des sols sous voirie contigus. Le graphe ci-dessous présente la relation entre l'état sanitaire de plantations ( valuation qualitative) et la largeur du terre-plein. L'information sur présence/absence d'arbre mitoyen renseigne sur le volume pouvant être prospecté par les appareils racinaires.



L' tat sanitaire des sujets plantés en terre-plein semble plus favorable lorsque la largeur du terre plein augmente ou lorsqu'il n'y a pas d'arbre mitoyen. Observations réalisées en 2009 sur le Boulevard Bonnevey.

Le volume prospecté par les racines est très limité lorsque le terre-plein est de faible largeur. Les sujets plantés dans cette situation sont fragilisés et présentent davantage de signes de dépérissement. Pour une plus grande largeur de terre-plein, ou lorsqu'il n'y a pas d'arbre mitoyen, le volume de sol prospecté par les sujets est plus important. Ils semblent alors présenter un état sanitaire plus favorable.

Bien qu'il ne permette pas de produire des tests statistiques significatifs, le nombre de données disponibles permet d'établir une tendance de relation entre espace de prospection et état sanitaire du végétal.



4.2 NATURE DES MATERIAUX TERREUX

Dans le Lyonnais, les matériaux terreux d'apport peuvent être de nature variable. Ceux que l'on retrouve le plus fréquemment dans les sols reconstitués de la Cité Internationale sont les suivants :



Limon sableux organique de surface neutre à faiblement calcaire



Limon plus ou moins caillouteux neutre à faiblement calcaire



Terres de Genas, Balan et Corbas : limons sableux acides



Sable limoneux ocre caillouteux (ponctuellement sable argileux)



Grave naturelle sableuse



Remblais anthropiques

Les limons sableux organiques se retrouvent exclusivement dans les horizons de surface. Ils ont la particularité de présenter un taux de matière organique plus important qui est soit lié à l'apport de compost lors de la reconstitution des sols soit à la dégradation naturelle des humus de surface. Ce matériaux de surface est poreux, peu compact et filtrant, propriétés qui lui sont conférées par sa texture sableuse et la forte activité biologique qu'il présente. (pH 7 à 7,5 ; MO 2   5% ; CEC 9 à 16 meq/100g, pas de contamination en ETM)

Dans les sols profonds, l'horizon intermédiaire limoneux est composé de matériaux d'origines diverses. Ils ont toutefois des caractéristiques communes : majoritairement limoneux, ils proposent une bonne capacité de rétention en eau et sont assez peu compacts. (pH 6 à 8 ; MO 2   3% ; CEC 8 à 10 meq/100g, pas de contamination en ETM)

En profondeur, plusieurs types de matériaux apparaissent : sable limon sableux ocre caillouteux, grave naturelle sableuse, grave remblayée et remblais anthropiques caillouteux et compacts. Globalement caillouteux, ces matériaux non organiques ont des propriétés physico-chimiques différentes : le remblai anthropique est peu poreux et très compact alors que la grave sableuse naturelle est poreuse et peu compacte. (pH 7,5 à 8 ; MO 1   2% ; CEC 6 à 9 meq/100g, faible contamination en ETM pour les remblais anthropiques)

4.3 DYNAMIQUE D'EVOLUTION DE LA MATIERE ORGANIQUE DU MELANGE TERRE-COMPOST

La matière organique joue dans les sols un rôle crucial, car sa présence améliore significativement certaines de leurs propriétés :

- réserve en eau et en nutriments minéraux disponibles pour les végétaux ;
- aération du sol, alimentation en air des racines, limitation du ruissellement ;
- intensité de l'activité des micro-organismes, production de nutriments organiques disponibles pour les végétaux ;

- diversité et quantité des organismes vivants dans le sol, qualité de la biodiversité.

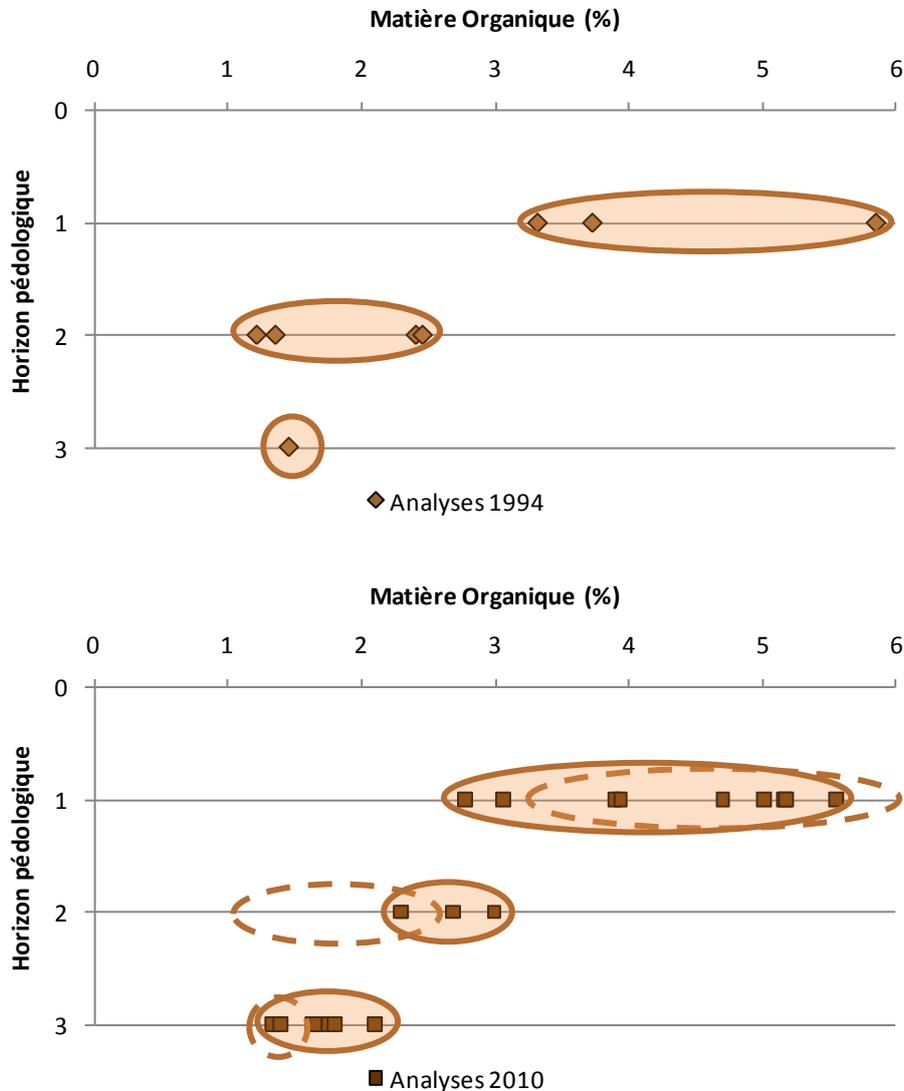
La teneur en matière organique doit être maîtrisée afin de produire des sols les plus fonctionnels possibles. Dans le cas de la CIL, cette teneur a été ajustée en mélangeant du compost vert (dénomination selon la norme NFU 44-051) aux matériaux terreux. Ce mélange terre / compost n'a été disposé que sur les 30 premiers centimètres des sols de plantation, en dépit de la pratique usuelle consistant à remplir toute l'épaisseur de la fosse de plantation avec des matériaux très organiques. La photographie ci-dessous présente l'état du mélange terre / compost 15 ans après sa mise en œuvre.



L'activité biologique qui s'est développée dans les horizons de surface entraîne un brassage de la matière organique au sein de l'horizon. Les débris végétaux (de taille pluri-millimétrique) sont fractionnés, dégradés et homogénéisés au sein de la couche superficielle du sol. Ce processus s'est nettement développé jusqu'à 25 cm de profondeur. Au dessous de cette cote, des débris végétaux grossiers sont encore visibles (cf. zooms ci-dessus), indiquant que la dégradation de la matière organique est beaucoup moins intense.

Il apparaît ainsi que mettre en place des matériaux riches en matière organique (mélange terre / compost, terre végétale, ...) sur une épaisseur très importante est peu efficace. La pratique consistant à remplir une fosse de plantation de 1 à 1,5 m d'épaisseur de ces matériaux est donc à proscrire. Il est préférable de construire un sol constitué de couches homogènes dont seule la première est riche en matière organique.

Les deux graphes suivants présentent l'évolution de la teneur en matières organiques des trois horizons d'un type de sols de la CIL entre 1994 et 2010. Cependant, le nombre de mesures (environ 25 mesures) réalisées ne permet pas de produire des tests statistiques significatifs concernant l'évolution des teneurs dans le temps.



Evolution entre 1994 et 2010 des teneurs en matières organiques dans les horizons superficiels (1), intermédiaires (2) et profonds (3) de différents secteurs de la CIL. Aucune évolution significative n'est observée, indiquant que le stock de matière organique est stable dans le temps.

La teneur moyenne en matières organiques reste stable (4,3 → 4,4%) dans l'horizon de surface (0 à -30/-40cm). Elle varie de manière peu significative dans l'horizon intermédiaire (1,9 → 2,7% ; -30/-40 à -60/-80cm) et dans l'horizon profond (1,5 → 1,7% ; -60/-80cm à >1m), certainement en raison d'un biais d'échantillonnage. Les hypothèses suivantes peuvent être formulées pour apporter un élément d'explication aux tendances observées :

- Le couvert herbacé en surface a certainement contribué à entretenir le taux de matière organique (la matière végétale crée compensant les pertes par minéralisation du carbone organique)
- La matière organique de surface n'a pas migré, ou seulement dans des proportions très limitées et non significatives : progression racinaire, descente d'horizon, bioturbation (brassage par la faune du sol). Cette hypothèse devrait néanmoins être vérifiée par une analyse précise, basée sur un nombre plus

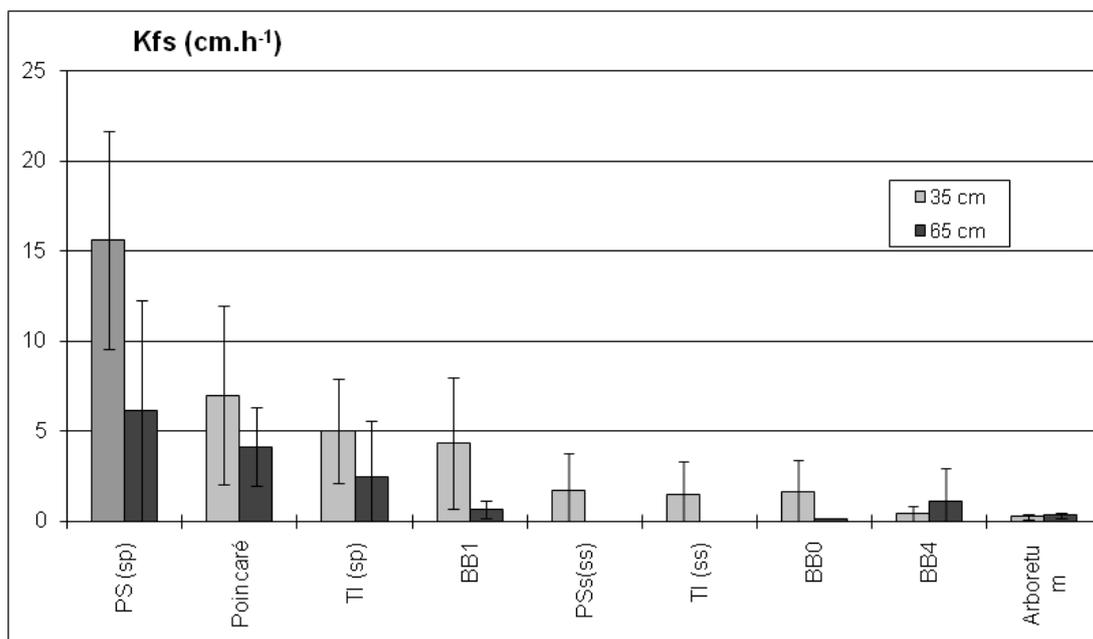
important d'échantillons (signification statistique), pour écarter les biais possibles liés à un artéfact ponctuel, à l'hétérogénéité spatiale de la distribution de la matière organique, à un échantillonnage grossier.

- La migration n'a pas affecté l'horizon profond.

L'opération d'amendement des sols avec du compost semble donc représenter un puits de carbone durable, si le sol reste v g tal s .

4.4 TRANSFERTS HYDRIQUES EN RELATION A L'ENCAISSANT

Les sols de la Cité Internationale sont construits de façon à avoir une forte capacité d'infiltration en surface et une infiltration modérée en horizon intermédiaire (choix de matériaux à bonne rétention en eau). La figure ci-dessous illustre ces observations :



Perméabilité des horizons superficiels et intermédiaires (PS : parc sud, TI : triangle interpol, BB : bande boisée, sp : sol profond, ss : sol superficiel)

L'horizon limoneux intermédiaire présente parfois des traces d'hydromorphie ponctuelles ou généralisées (taches d'oxydation rouille et/ou taches de réduction grisâtres) signes d'un engorgement temporaire ou permanent qui peut être provoqué par la présence en profondeur de matériaux non perm rables.

Exemple : La présence de remblai anthropique compact en fond de fosse provoque un engorgement en eau de l'horizon sus-jacent (couleur grisâtre généralisée)



Ce phénomène reste ponctuel sur les sols de la CIL et dépend du type d'encaissant. Très souvent dans le Lyonnais, les sols sont naturellement drainants en profondeur de par la présence de graves sableuses très perméables. Une forte capacité d'infiltration profonde a donc été favorisée lors de la reconstitution des sols de plantation de la Cité Internationale. Trois types d'encaissants sont principalement retrouvés en fond des fosses de plantation :

- la grave sableuse naturelle ;
- les remblais de graves sableuses ;
- les remblais anthropiques fortement caillouteux et compacts.

Ces différents matériaux présentent des caractéristiques physico-chimiques différentes ce qui leur confère une perméabilité variable :

Grave naturelle



K = 1,04E-04 m/s

très élevée

Grave remblayée



K = 1,48E-06 m/s

ralentie

Remblai anthropique



K = 3,35E-07 m/s

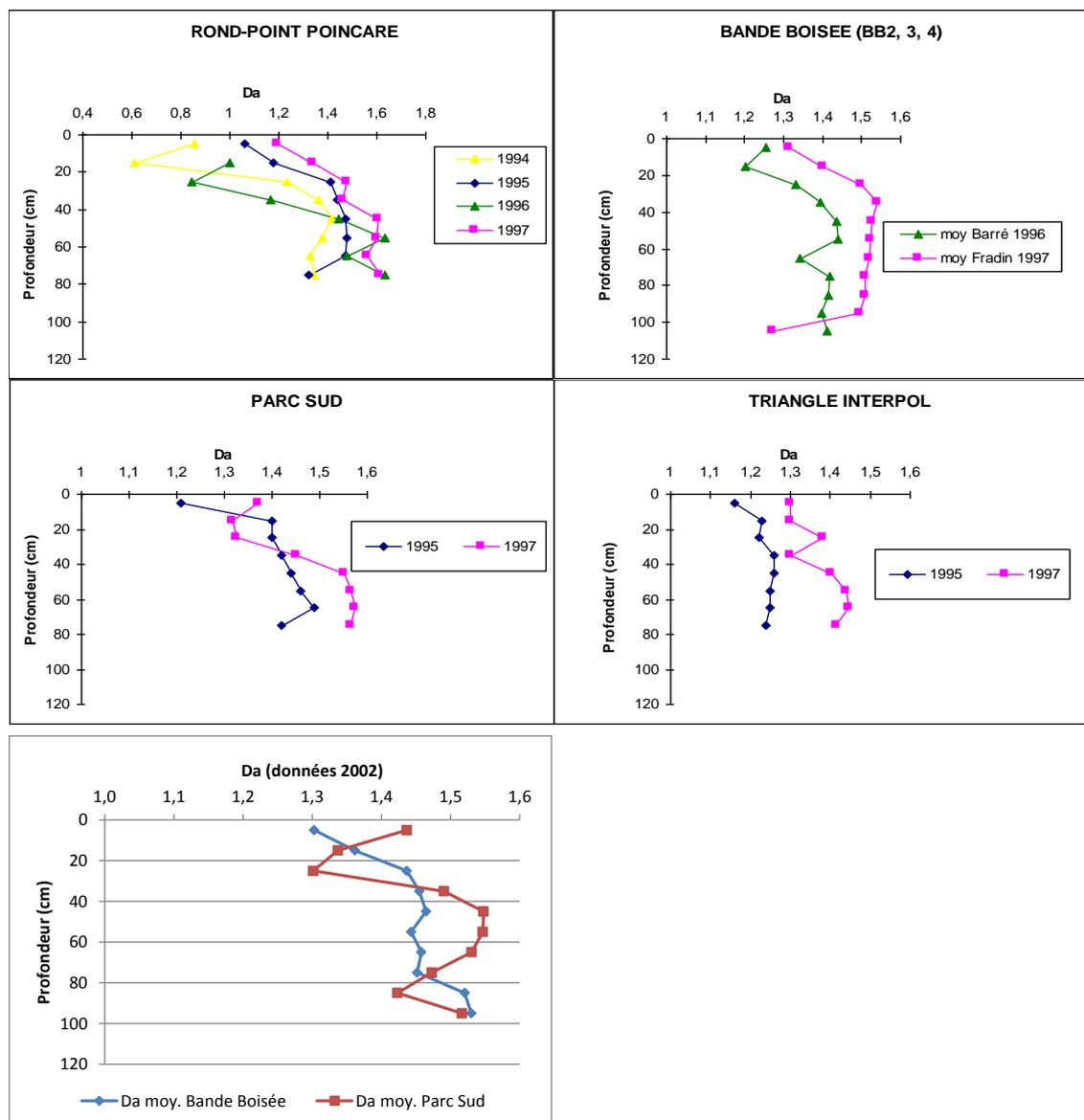
faible

La grave naturelle et la grave remblayée sont de nature sableuse. Du fait de leur texture et de la forte proportion d'éléments grossiers qu'ils contiennent, ces matériaux présentent une bonne perméabilité. La grave remblayée, plus compacte que la naturelle, présente une perméabilité légèrement ralentie. En revanche, le remblai anthropique caillouteux et très compact, présente une faible capacité d'infiltration.

4.5 DENSITE ET COMPACTITE DES SOLS

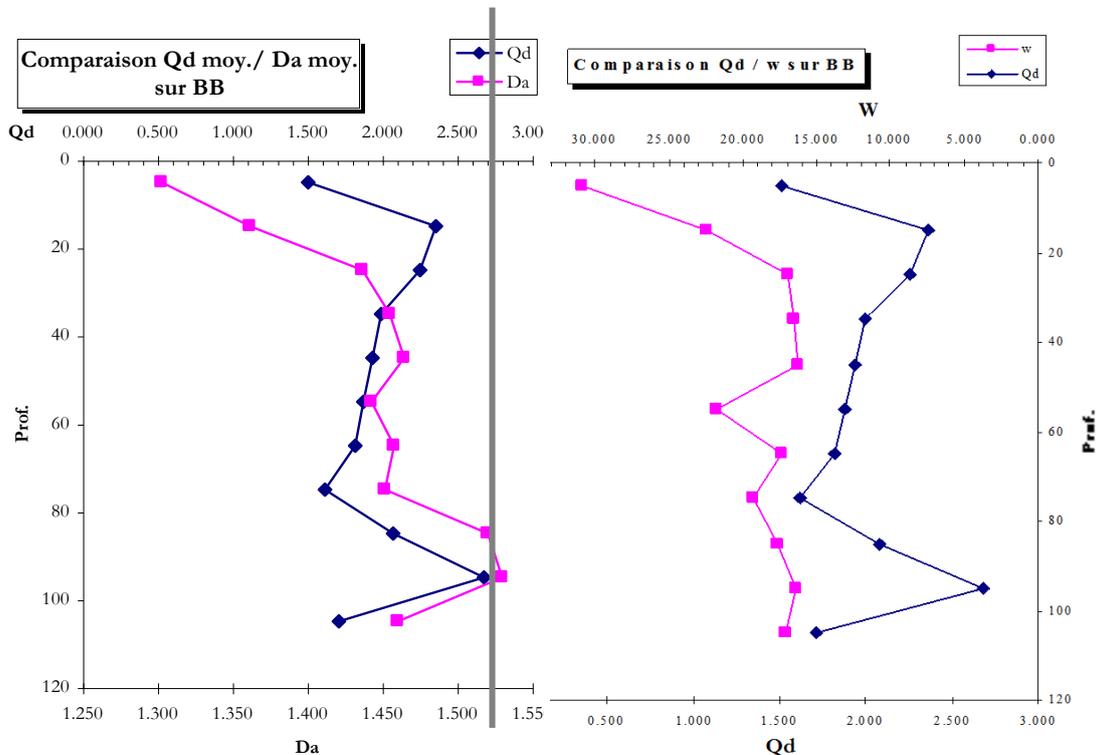
La détermination de la densité apparente des sols de la CIL a été réalisée très précisément lors de la première campagne de mesure. Ces observations montrent que les dispositions prises en phase travaux ont permis de constituer des sols à la densité limitée, ne présentant pas de limite pour le développement végétal (  titre d'exemple, la progression racinaire est limitée pour des densités apparentes supérieures à 1,6 en moyenne).

Les différentes campagnes de mesure de la densité apparente menées avant 2000 (voir figure ci-dessous jusque 1997) ont permis de mettre en évidence un début de stabilisation de ce paramètre à partir de 2 à 3 ans après la reconstitution des sols. La densité apparente des horizons de surface est de manière générale comprise entre 1,1 et 1,4. Elle augmente légèrement en profondeur pour atteindre 1,4 à 1,6 entre 30 et 60cm. La dernière campagne (2002) ne montre pas d'évolution significative de ces valeurs.



Comparaison de profils de densité apparente moyenne en fonction des années

Les études menées sur la CIL ont également permis de mettre en correspondance la densité avec la résistance à la pénétration (voir figure A ci-dessous). La comparaison visuelle des courbes tend à montrer une corrélation entre ces deux paramètres. La teneur en eau des matériaux influence cependant fortement la résistance à la pénétration (voir figure B ci-dessous). Les interrelations entre résistance à la pénétration, densité apparente et teneur en eau a été étudiée finement, ce qui a permis d'établir des modèles pour estimer la densité des sols à partir des deux autres grandeurs.



[A] Comparaison entre résistance à la pénétration (Qd en MPa) et masse volumique sèche (Da en g.l⁻¹) ; Prof : Profondeur (cm)

[B] Comparaison entre résistance à la pénétration (Qd en MPa) et humidité (W en %)

Ces études ont ainsi permis de montrer qu'un suivi de la densité et de la compacité des sols peut être réalisé à l'aide d'un pénétromètre classique, ce qui rend la procédure beaucoup plus aisée (matériel et temps d'acquisition). Des valeurs de résistance à la pénétration de référence ont été déterminées et mises en relation avec la densité limite pour le développement du végétal. Néanmoins ces informations sont a priori seulement pertinentes pour le contexte pédoclimatique du Lyonnais.

5. PROPOSITION DE PRATIQUES DE RECONSTITUTION DE SOLS ET DE METHODES DE SUIVI

5.1 LES INDICES DU BON FONCTIONNEMENT D'UN SOL FERTILE

Les sols fertiles reconstitués ont pour objectif d'assurer le développement rapide et pérenne du végétal. Le bon fonctionnement d'un sol de plantation peut donc être évalué par le suivi du développement des sujets plantés (état sanitaire, taux de croissance, développement racinaire, etc.). Ces observations sont pertinentes si elles sont réalisées sur une longue durée.

Des indices peuvent néanmoins renseigner sur la qualité du fonctionnement d'un sol sans attendre plusieurs années de développement végétal :

Paramètre	Fonctions	Quelques méthodes de diagnostic possibles
taux de matière organique	nombreuses fonctions (voir §3.3)	Mesure de la teneur totale, caractérisation du fractionnement (laboratoire agronomique), observation pédologique
activité biologique	approvisionnement en nutriments, augmentation et entretien de la porosité	Mesure de la respiration du sol (laboratoire agronomique), inventaires de la pédofaune, observation pédologique
traces d'hydromorphie	régime hydrique (nécessite quelques années avant de pouvoir être observées)	Observation pédologique uniquement
compacité	capacité de pénétration racinaire, perméabilité, aération	Observation pédologique, mesure de la densité apparente (méthode au cylindre, au gammadensimètre, au pénétromètre)
Porosité, perméabilité	perméabilité, aération	Essai de perméabilité (double anneau, Guelph, Porcher, Lefranc), mesure de la porosité (laboratoire agronomique), observation pédologique (texture, structure, porosité)

La qualité du régime hydrique est souvent déterminante pour assurer le bon fonctionnement du sol. Le recours à l'observation des traces d'hydromorphie est limitant en raison de la durée relativement importante (de l'ordre de l'année) de formations des dites traces. Il peut alors être judicieux de s'appuyer sur un dispositif de tensiométrie qui mesure en continu l'état hydrique du sol (sondes tensiométriques reliées à une centrale d'acquisition).

L'objectif d'optimisation de ces différents indices (et le choix des valeurs de référence associées) doit être adapté au contexte et au type de plantations prévues. La maîtrise des fonctions du sol construit passe par la conception intelligente des sols fertiles et l'application des principes du génie pédologique.

5.2 CONSTRUIRE UN SOL FERTILE DANS LE LYONNAIS

En milieu urbain, les sols ont souvent été profondément transformés pour des besoins géotechniques. Ils sont alors majoritairement composés de remblais peu ou pas fertiles et ont perdu certaines propriétés nécessaires au développement du végétal. Dans ce contexte particulier, ils doivent être reconstruits par l'homme afin de résoudre les contraintes spécifiques du milieu urbain (gestion des eaux, support de voirie, etc.) et de subvenir aux besoins vitaux des plantations.

5.2.1 Choix des matériaux terreux

Le choix des matériaux terreux est crucial pour construire un sol fertile fonctionnel. La norme AFNOR NF-U 44-551 (AFNOR, 2002) permet de définir des critères d'acceptabilité pour les terres support de plantation. Le choix d'un matériau passe donc par sa caractérisation complète. En conséquence, les deux approches suivantes doivent impérativement être menées :

- bulletins d'analyses agronomiques : mesure de la texture (granulométrie sur terre fine), du pH, de la teneur en matière organique, du rapport C/N, de la teneur en éléments fertilisants, de la teneur en contaminants, conductivité et CEC.
- description : estimation de la texture, de la quantité de calcaire actif (qui renseigne aussi sur le pH), de la teneur en matière organique, de la nature et quantification des éléments grossiers, qualification de l'état de compacité, de la structure, de l'état d'évolution de la matière organique, etc.

Le seul recours à l'interprétation des bulletins d'analyses est insuffisant pour qualifier correctement un matériau. L'observation pédologique du stock est nécessaire afin de lever des incertitudes fondamentales sur sa qualité. De plus, afin d'optimiser la disponibilité en eau pour la plante, des mesures ou estimations complémentaires de la compacité, de la porosité et de la capacité de rétention en eau du matériau sont à prévoir.

5.2.2 Configurations optimales des sols

Le sol de plantation doit présenter plusieurs caractéristiques différentes afin d'assurer le développement optimal des plantations qu'il supporte :

- en surface, il doit proposer une teneur en matière organique et éléments fertilisants élevée (au moins 2% de matière organique dans le cas général) afin de satisfaire les besoins nutritifs des végétaux ;
- le sol reconstitué doit présenter une bonne rétention en eau (réserve utile > 100mm/m) : choix de matériaux présentant une proportion en éléments grossiers plus faible et une fraction limoneuse voire argileuse plus importante dans la terre fine ;
- en profondeur, un matériau filtrant (de type « graves sableuses » naturellement présentes dans le Lyonnais) permet d'éviter les problèmes d'engorgement

Cet horizon peut néanmoins assécher le sol et augmenter le besoin en arrosage des plantations si l'impluvium et l'abondance des précipitations ne sont pas suffisants. Le cas échéant, une couche intermédiaire avec une perméabilité contrôlée peut être disposée afin de ralentir le flux d'eau (voir 4.2.3). La capacité effective de rétention en eau du sol est alors améliorée, sans entraîner d'engorgement trop fréquent.

Une structuration des sols de plantation en différents « horizons » s'avère donc fortement recommandée.

Exemple de sol reconstitué sur la Cité Internationale :

- 0 – 20cm : Mélange Terre - Compost : riche en matière organique (>3%) et éléments fertilisants, filtrant
- 20 – 80 cm : Terre fine de type limoneuse assez peu caillouteuse, moyennement organique (1 à 2%), présentant une bonne rétention en eau
- 80 – + : Remblai de graves sableuses, non organique, filtrant.

De plus, il est nécessaire d’optimiser le volume de sol disponible pour la prospection racinaire. En effet, les arbres d’alignement sont généralement enclavés entre des infrastructures de voiries. Dans le cas de plantation en fosse unitaire, leur système racinaire est contraint sur tous les côtés par la présence de matériaux géotechniques défavorables (forte proportion d’éléments grossiers, faible teneur en matière organique, compacité, pH très élevé). L’expansion racinaire est alors réduite au volume de la fosse de plantation, seul endroit où ces organes vitaux pourront puiser l’eau et les éléments nutritifs essentiels à leur développement. La disponibilité en eau et nutriments s’en verra diminuée, de même que la force d’ancrage de l’arbre.

Pour favoriser une prospection racinaire la plus étendue possible, il est nécessaire d’augmenter le volume de sol colonisable (  défaut choisir des essences d’arbres de plus petit gabarit), et de décompacter les fonds si ceux-ci sont compacts. Pour cela, il est recommandé de favoriser au maximum la mise en place de tranchées continues d’exploitation (qui offrent un volume de sol disponible y compris sous les emprises de voiries) au lieu des fosses unitaires de plantation. Un sol continu présente des conditions de reprise plus favorable car il dispose d’une réserve hydrique plus importante, d’autant plus nécessaire du fait de la présence de remblais filtrants sous-jacents.

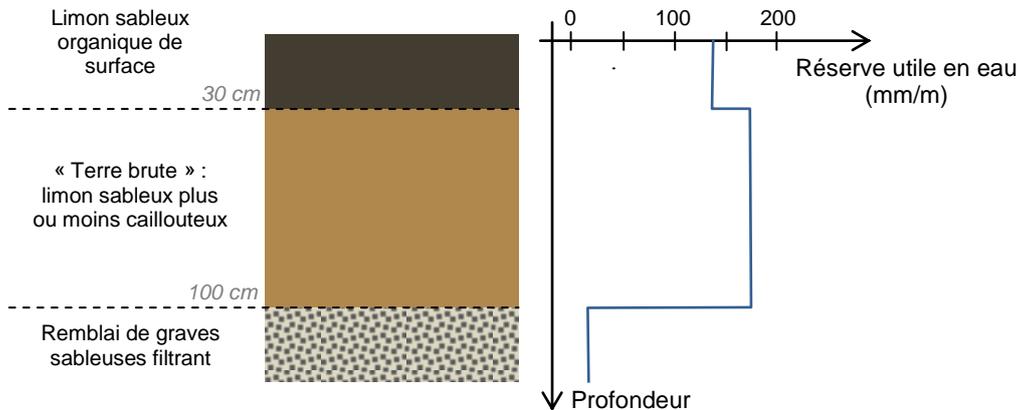
5.2.3 Maîtriser les transferts hydriques verticaux

Il est important de bien maîtriser les flux d’eau verticaux au sein des fosses de plantation. L’eau doit être disponible en quantité suffisante pour la plante mais un excès d’eau serait également défavorable : engorgement des matériaux et asphyxie des racines des plantes, risques d’érosion.

La reconstitution des sols de la Cité Internationale s’est basée sur les principes suivants :

- Favoriser l’infiltration en surface diminue les risques de ruissellement ;
- Afin de subvenir aux besoins en eau de la plante, il est nécessaire de choisir un matériau sous-jacent permettant d’accroître la capacité de rétention en eau de l’horizon intermédiaire ;
- Afin de limiter les risques d’engorgement profonds, le fond de fosse doit être constitué de matériaux filtrants.

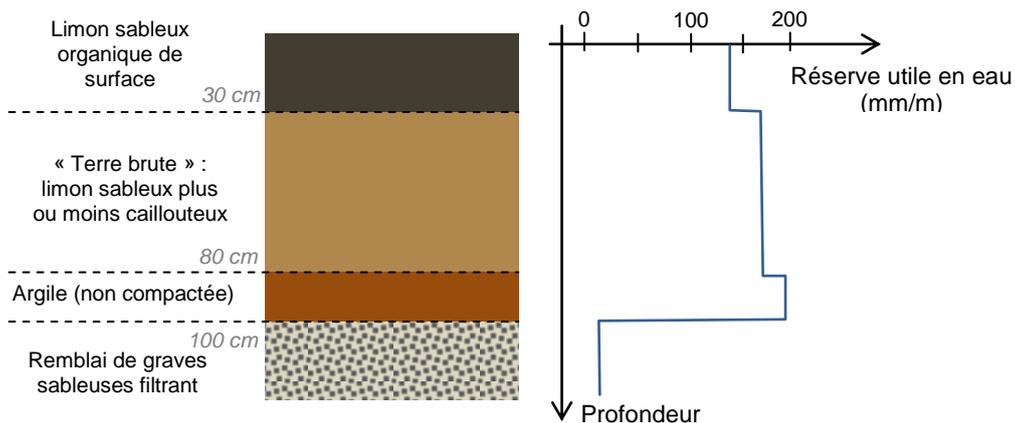
La principale contrainte de ce modèle est la réserve en eau limitée du sol, dépendant de la nature des matériaux utilisés pour constituer l'horizon intermédiaire. La figure suivante présente une alternative permettant d'augmenter la réserve en eau du sol :



Flux hydriques à travers les sols de la CIL actuels

Lame d'eau utile maximale retenue par le sol (sur 1 m) = 158 mm

Le positionnement d'une couche d'argile peu compactée entre l'horizon limoneux et l'encaissant de gravas permettrait d'augmenter la microporosité du sol et de retenir une fraction d'eau plus importante qui sera de ce fait disponible pour la plante.



Proposition d'amélioration du fonctionnement hydrique des sols de la CIL

Lame d'eau utile maximale retenue par le sol (sur 1 m) = 195 mm (+23%)

La maîtrise de la réserve utile en eau de chaque horizon est un critère essentiel pour ajuster l'approvisionnement naturel en eau des plantations et par conséquent réduire le besoin d'arrosage. Des bilans hydriques dynamiques et précis opposant la consommation en eau des plantations à la quantité d'eau disponible dans le sol à chaque instant sont difficiles à réaliser. Il faut ajouter le contrôle du risque d'engorgement (fréquence et durée du ressuyage), également complexe lorsque la topographie varie et que des infrastructures proches perturbent les écoulements (voir §3.4).

La maîtrise des flux d'eau verticaux peut néanmoins être améliorée par

- L'intégration, lors de la conception du sol, de la taille de l'impluvium (comprenant les éventuelles surfaces minérales ruisselant vers le sol) et de l'intensité des précipitations efficaces (remplissant effectivement sa réserve hydrique)
- la mise en place de dispositifs en trop-plein pour évacuer l'eau libre depuis les horizons intermédiaires vers un exutoire et ainsi préserver un niveau minimum d'aération du sol

- la connexion du sol à une source d'eau alternative à l'arrosage (recueil de ruissellements proches, valorisation de l'eau pluviale ou grise de bâtiments, valorisation passive de l'eau de nappe sous-jacente, etc.)
- la mise en place de dispositifs tensiométriques pour éviter de sur-arroser

L'optimisation de l'approvisionnement en eau des plantations dépend également des besoins des végétaux, qui peuvent être ajustés par :

- la sélection d'une typologie de végétaux adaptés aux conditions hydriques du sol et à des conditions temporaires variables d'humidité le cas échéant
- l'optimisation de la taille des végétaux à la plantation pour maîtriser leur besoin en eau durant les premières années
- la plantation de sujet de très faible force dans les contextes particulièrement contraints
- la maîtrise de l'itinéraire cultural en pépinière, notamment la qualité et la vigueur du système racinaire

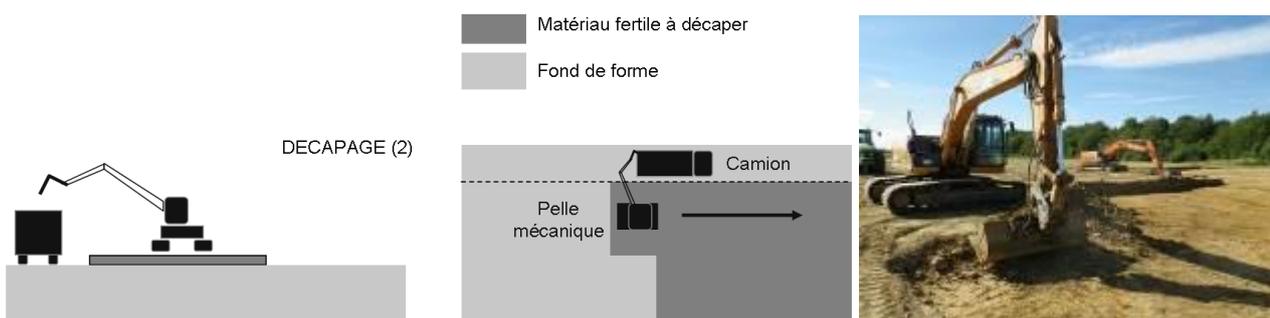
5.2.4 Itinéraire technique de reconstitution de sol

1.1.1.4. Décapage et stockage

Dans le cas d'une réutilisation de matériaux du site pour les sols de plantation, le décapage des matériaux est à réaliser en conditions sèches et préférentiellement à la pelle mécanique sur chenilles, pour éviter toute dégradation structurale irréversible (le plus souvent par compaction). Les engins sur pneus, les tracks, bull-pousseur ou scraper sont à éviter. Le matériau est retroussé sur l'amplitude de travail, en progressant vers l'arrière. Il est stocké sur un côté pour constituer un andain (hauteur maximale de 1 à 3m à adapter en fonction de l'état d'humidité du matériau) ou bien chargé directement sur camion pour transport jusqu'à une aire de stockage.

La teneur en eau devra être contrôlée, en référence à sa limite de plasticité déterminable par analyse de laboratoire. Les travaux sont à réaliser en conditions sèches, a minima sur matériau ressuy , afin d'éviter la dégradation physique et l'anoxie du matériau par la prise en masse et la formation de mottes.

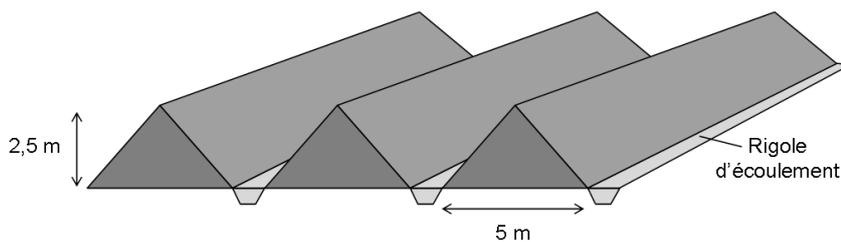
La variabilité des profondeurs de remblai étant importante, le tri des matériaux doit être mené sur la base d'un contrôle visuel lors du décapage.



Procédure de décapage de matériau fertile. La pelle mécanique à chenilles roule sur le matériau sec à décapier qui est immédiatement d compact  lors du chargement dans le tractobenne. (photographie réalisée sur le plateau de Saclay, 2012)

1.1.1.5. Stockage

Le matériel qui réalise les stocks est une pelle mécanique qui reprend les matériaux déplacés par les engins de transport et met en forme les andains de stockage. La circulation de tout engin sur les stocks de matériaux fertiles est à éviter, même en cours de constitution. La forme des stocks correspond à des andains linéaires de section triangulaire, dont la base représente au moins le double de la hauteur. L'objectif est de limiter la compaction des matériaux et l'infiltration de l'eau dans la masse. Les stocks sont orientés dans le sens de plus grande pente pour faciliter l'évacuation des eaux pluviales. Aux pieds des tas, des rigoles d'évacuation sont réalisées pour éviter toute stagnation des eaux de ruissellement. Les hauteurs maximales d'andains de stockage varient en fonction de la teneur en eau du matériel.



Stockage des matériaux fertiles en andains de section triangulaire. (photographie réalisée sur la ZAC des Monges   Cornebarrieu, 2006)

1.1.1.6. Mise en œuvre des matériaux fertiles

La mise en œuvre de la terre végétale pour la constitution des sols de plantation est à effectuer à la pelle mécanique et en conditions favorables : matériaux secs et non compactés. En cas de valorisation de matériaux caillouteux issus de déblais du site, un criblage peut être préconisé pour supprimer la fraction grossière et favoriser la capacité de rétention du matériel. Dans le cas où le fond de forme est très compact (présence de remblais anthropiques par exemple), un décompactage (pelle mécanique, sous-soleuse) est à prévoir. La mise en œuvre des matériaux fertiles est réalisée à la pelle à chenille en conditions sèches. L'engin travaille «   reculons » pour ne pas compacter le matériel mis en œuvre.



Mise en œuvre des matériaux «   reculons » pour ne pas compacter le matériel mis en œuvre. (photographie réalisée sur la ZAC des Monges   Cornebarrieu, 2006)

Les terres d'apport doivent, de manière générale, répondre aux spécifications de la norme NF U 44-551 sur les supports de culture. Une attention particulière devra être portée sur les critères suivants : proportion d'éléments grossiers (>2mm), teneur en sables, teneur en argile, teneur en matières organiques. La détermination de seuils pour ces critères doit être ajustée en fonction du contexte du projet, de la disponibilité locale des ressources, etc. Dans le cas général, hors contrainte de portance exigée par la fréquentation de véhicules, la proportion d'éléments grossiers doit être minoritaire (<50%), la texture doit être équilibrée ou à dominante limoneuse ou limono-sableuse (se référer à un triangle de texture si besoin) et la teneur en matière organique comprise entre 1,5 et 5%.

5.3 MAITRISER LA QUALITE DE LA CONSTRUCTION DES SOLS FERTILES

Plusieurs points clés sont à vérifier pour assurer le suivi qualité de la construction des sols fertiles :

- Avant les opérations de déblai : vérification de la qualité (mécanique, physique, chimique, biologique) des terres en place et élaboration d'une stratégie de recyclage approprié (description pédologique et bulletins d'analyses). Repérage précis des épaisseurs à décapier et élaboration de procédures de tri à destination de l'entreprise de terrassement.
- Phase de déblai et transport : la vérification du respect du mode opératoire et en particulier de la teneur en eau, de la non-compaction et du tri des matériaux assurera la qualité du déblai
- Phase de stockage :
 - Vérification de la qualité du stockage (respect du mode opératoire et des engins appropriés)
 - Suivi précis des volumes décapés et stockés (avec prise en compte du foisonnement)
 - Vérification de l'état des terres stockées avant la reprise (description pédologique et bulletins d'analyses)
- Phase de reconstitution des sols :
 - Choix et qualification des terres d'apport (description pédologique et bulletins d'analyses)
 - Choix du matériel pour la remise en œuvre (en fonction du CCTP et suite aux discussions avec l'entreprise)
 - Respect du Plan d'Assurance Qualité
 - Contrôle extérieur de la qualité des opérations de reconstitution des sols fertiles

Les travaux d'espaces verts sont souvent effectués en parallèle de chantiers VRD. Il faut alors porter une attention toute particulière à la transition entre ces lots : d'une part, il est primordial de bien vérifier la qualité de la manipulation des matériaux fertiles, et d'autre part, il est indispensable de s'assurer que les ouvrages d'espaces verts ne soient pas dégradés par les travaux de voiries (mise en place de structures de protection et si possible de plans de circulation, etc.).

6. PERSPECTIVES

Les innovations engagées lors des phases de conception et de réalisation des travaux de la CIL, ainsi que le suivi de l'évolution des sols ont permis d'apporter des réponses concrètes au besoin d'amélioration des sols de plantation. Néanmoins, des interrogations restent en suspens et de nouvelles questions peuvent être formulées pour améliorer les pratiques en cours.

La maîtrise de l'approvisionnement en eau des sols de plantation reste à améliorer pour réduire la consommation associée à l'arrosage et réduire les volumes d'eau pluviale à traiter en aval des réseaux d'assainissement. La connexion des sols avec les flux d'eau alentours (eau de ruissellement, des bâtiments, exutoire vers les réseaux ou la nappe) permet d'apporter une réponse au moins partielle à cette problématique.

La CIL a permis de développer des « sols à mèche » : ce sont des sols reconstitués présentant régulièrement des surprofondeurs importantes (tranchées de 2m de large pour 4m de profondeur et env. 10m de long) de terre fine atteignant la nappe sub-affleurante du Rhône. Ces dispositifs ont une fonction de m che en permettant un apport d'eau substantiel par capillarité aux sols de surface environnants. Ils ont pour objectif d'alimenter passivement les sols de plantation avec l'eau de la nappe sous-jacente. L'efficacité du dispositif et l'évolution de ces sols seront évalués prochainement.

L'interaction sol de plantation / eau peu polluée (de voirie, eau grise) constitue un sujet d'innovation pertinent, mais il est contraint par une législation très dense qui rend difficile toute modification des pratiques, surtout si le maître d'ouvrage n'y voit pas un intérêt prioritaire.

Une limite importante de la reconstitution des sols de la CIL réside dans l'utilisation de matériaux terreux issus de sites décapés alentours. Une alternative intéressante consiste à utiliser des matériaux recyclés, des sous-produits de l'activité urbaine pour reconstituer des sols fertiles. L'utilisation du compost de déchets verts représente un premier pas de cette démarche. Le programme SITERRE actuellement développé par Plante & Cité explore d'autres alternatives, autour de la réutilisation de sous-produit de démolition de bâtiments, d'épuration des eaux ou de nettoyage de la ville.

Les mesures et le suivi de l'évolution des sols effectués depuis 15 ans pourraient être complétés par de nouvelles thématiques émergentes. Parmi celles-ci, la caractérisation et l'évaluation de la biodiversité des sols peuvent constituer un axe complémentaire pertinent. Les démarches d'évaluation de la biodiversité oublient souvent de considérer la richesse et la diversité des organismes du sol (pédofaune). Ces organismes représentent pourtant généralement la proportion majoritaire de la biodiversité des écosystèmes terrestres. De plus, ils sont les garants du bon fonctionnement des sols puisqu'ils maintiennent, entretiennent et développent certaines de leurs propriétés fondamentales : fertilité globale, porosité, perméabilité, recyclage des nutriments, évolution/biodégradation des éléments organiques et de certains polluants, etc. Les services que rendent les sols vivants aux sociétés sont en partie garantis par la pédofaune. Elle devrait donc être évaluée, favorisée et reconnue pour cela.

7. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES ET NORMATIVES

BAIZE D., GIRAD M.C. (2008). Référentiel pédologique 2008, Ed. QUAE, 405 p.

AFNOR (2002). Norme NF U 44-551. Supports de culture. Dénominations, spécifications, marquage, 36 p. + annexes.