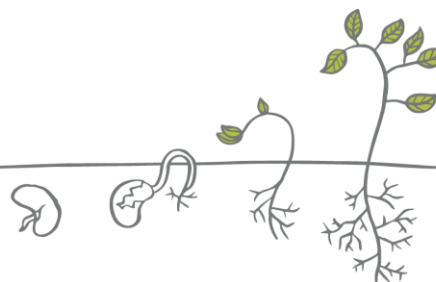


08/02/2017

# LES PRINCIPAUX ENSEIGNEMENTS DU PROGRAMME SCIENTIF [Compte-rendu d'étude]



Avec la participation de :



**GRAND LYON**  
communauté urbaine

Avec le soutien financier de :



**TITRE :**

Les principaux enseignements du programme Sciencil : observatoire de l'arbre urbain sur la Cité internationale de Lyon

**AUTEUR :**

Jean-Pierre ROSSIGNOL

**RELECTEUR :**

Olivier DAMAS, Caroline LOHOU, Frédéric SÉGUR

**THEMATIQUES :**

Agronomie, sols urbains et conduite des végétaux

**MOTS-CLES :**

Reconstitution de sols, arbres, arbustes, diagnostic de reprise, agro-pédologie, diagnostic aérien, diagnostic racinaire, morphogénèse aérienne, morphogénèse racinaire, eau, arrosage, tensiométrie, pédogénèse

**RESUME :**

Le programme Sciencil, initié par le Grand Lyon au milieu des années 90, a permis autour du projet d'aménagement de la Cité Internationale de Lyon d'acquérir d'importantes connaissances scientifiques sur la plantation et la conduite d'arbres en ville. De nombreuses avancées techniques d'aujourd'hui en termes de plantations et conduites d'arbres proviennent des résultats de Sciencil.

La synthèse de tous ces résultats sur 15 ans est présentée sous la forme d'une fiche de synthèse transversale à portée opérationnelle et entrée de lecture (la présente fiche) et de 3 fiches thématiques plus précises selon des entrées (i) sol, (ii) eau, (iii) végétal (racines et partie aérienne).

Le programme Sciencil : Observatoire de l'arbre urbain sur la Cité Internationale de Lyon a permis de faire aboutir **4 livrables** :

- **Le compte-rendu de l'étude** « Les principaux enseignements du programme Sciencil » (ci-contre) qui synthétise **3 fiches de synthèse thématiques** :
  - > Fiche de synthèse « L'eau et les transferts hydriques »
  - > Fiche de synthèse « Les sols de la Cité Internationale de Lyon »
  - > Fiche de synthèse « Reprise des arbres – racines et tiges »

# SOMMAIRE

<b>AVANT-PROPOS</b> .....	<b>5</b>
<b>1 CONTEXTE, ENJEUX ET OBJECTIFS DU PROGRAMME SCIENTIF</b> .....	<b>5</b>
1.1 CONTEXTE ET ENJEUX .....	5
1.2 LA CRISE DE TRANSPLANTATION .....	7
<b>2 LES CONDITIONS DE LA REPRISE : LES PRINCIPAUX RÉSULTATS DES ÉTUDES</b> 7	
2.1 LES CONDITIONS DE CULTURE EN PÉPINIÈRES : L'ARBRE EN PÉPINIÈRE.....	7
2.2 CONTRÔLE DE LA QUALITÉ DES ARBRES EN PÉPINIÈRE PAR LES GESTIONNAIRES DES PARCS ET JARDINS .....	10
<b>3 LES CONDITIONS DE LA TRANSPLANTATION : LE SOL D'ACCUEIL ET SES PROPRIÉTÉS</b> .....	<b>10</b>
3.1 LE MODÈLE DE SOL.....	10
3.2 LA MASSE VOLUMIQUE APPARENTE (OU DENSITÉ APPARENTE).....	11
3.3 LA PERMÉABILITÉ .....	13
3.4 LA POROSITÉ .....	14
3.5 LA RÉSISTANCE � LA PÉNÉTRATION.....	15
3.6 LES PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES ET TRAVAIL DU SOL: .....	17
3.7 CONCLUSIONS.....	19

<b>4</b>	<b>LES CONDITIONS DE LA TRANSPLANTATION : LA FOURNITURE EN EAU ET LA REPRISE RACINAIRE</b> .....	<b>20</b>
4.1	BESOINS EN EAU DES ARBRES AU MOMENT DE LA REPRISE APRÈS LA TRANSPLANTATION .....	20
4.2	LE CALCUL DES CONSOMMATIONS EN EAU DES ARBRES : APPLICATION À LA GESTION DE L'IRRIGATION.....	22
<b>5</b>	<b>L'ÉVOLUTION DE LA CROISSANCE DES ARBRES : ÉTUDE DES PARTIES AÉRIENNE ET RACINAIRE</b> .....	<b>24</b>
5.1	LA PARTIE AÉRIENNE.....	24
5.2	LA PARTIE SOUTERRAINE.....	26
5.3	CARACTÉRISATION DU PROCESSUS DE REPRISE DES ARBRES .....	30
5.4	FACTEURS FAVORISANT LA REPRISE .....	31
5.5	ALIMENTATION HYDRIQUE.....	31
5.6	RECOMMANDATIONS POUR L'AMÉNAGEMENT ET LE SUIVI D'UNE PLANTATION .....	32
<b>6</b>	<b>CONCLUSIONS</b> .....	<b>32</b>
6.1	LE SOL .....	32
6.2	L'ALIMENTATION HYDRIQUE.....	32
6.3	LA REPRISE APRÈS TRANSPLANTATION .....	33
6.4	LES OBJECTIFS RECHERCHÉS .....	33
6.5	LE BILAN ET LA VISION DU GESTIONNAIRE DES ARBRES DU GRAND LYON, FRÉDÉRIC SÉGUR.....	33
<b>7</b>	<b>DOCUMENTS PRODUITS DANS LE CADRE DE SCIENCIL</b> .....	<b>35</b>
	MÉMOIRES ET RAPPORTS ÉTUDIANTS .....	35
	ARTICLES.....	35
	AUTRES DOCUMENTS.....	36

## AVANT-PROPOS

Cette synthèse reprend les éléments les plus marquants et les plus opérationnels des résultats obtenus au cours du programme Sciencil sur les trois thématiques principales: Sols fertiles, Eau et transferts hydriques, Reprise des arbres.

Pour obtenir plus de détails et de développement sur certains aspects énoncés dans cette présente fiche, il est nécessaire de se reporter à ces fiches thématiques également disponibles sur la plate-forme internet de Plante & Cité.

## 1 CONTEXTE, ENJEUX ET OBJECTIFS DU PROGRAMME SCIENCIL

### 1.1 CONTEXTE ET ENJEUX

Le programme Sciencil : observatoire de l'arbre urbain appelé aussi « arboratoire », s'est déroulé entre 1994 et 2000. Il est né du souci des services des espaces verts de Lyon, de Villeurbanne et de l'agglomération lyonnaise d'assurer la gestion des arbres dont ils ont la charge. Au moment de l'étude (en 1993), aucun référentiel professionnel ne permet de répondre à un certain nombre d'interrogations concernant la plantation et la reprise des arbres en ville, et en particulier des gros sujets. En effet ces gros sujets sont coûteux à l'achat et présentent des potentiels de reprise plus faibles que les jeunes sujets. Des centaines d'arbres de grandes dimensions sont plantés dans des sols entièrement reconstitués soit dans des parcs, soit en arbres d'alignement.

La demande sociale est très forte concernant la présence d'arbre de qualité et en bonne santé près de la population. Le besoin de nature en ville des habitants s'intensifie avec l'augmentation de la population urbaine et la densification des constructions. Ces plantations de gros sujets demandent un haut niveau de technicité pour reconstituer un milieu propice à ces arbres. Comment assurer aux générations futures que ces plantations deviendront demain des arbres centenaires? Les plantations d'arbres effectuées au 19<sup>e</sup> siècle arrivent en fin de vie et doivent être remplacées. Il faut mettre au point les techniques modernes qui permettront ce renouvellement. Investir dans la qualité des arbres fournis, dans les conditions de plantation, dans la qualité des sols, permet de limiter les opérations de gestion des arbres urbains tout en augmentant leur impact paysager.

**Un constat** au début des années 90: la pérennité des arbres plantés n'est pas assurée. On constate une mortalité importante, parfois supérieure à 50%, des arbres transplantés en particulier des gros sujets.

**Le principal objectif** est le suivi scientifique et technique de la plantation des arbres en milieu urbain. La plantation et l'entretien des arbres en ville ont longtemps reposé sur des données empiriques. Le programme propose de nouveaux itinéraires techniques en reconstruction de sols et des protocoles de diagnostics pour la reprise des arbres.

**Un projet pluridisciplinaire** regroupant les acteurs de la filière paysage, à savoir les techniciens des collectivités, les chercheurs et enseignants chercheurs, les professionnels de la pépinière et du paysage :

- les collectivités : le Grand Lyon, les villes de Lyon et Villeurbanne, la SEM de la Cité internationale.
- l'enseignement supérieur et la recherche : des enseignants-chercheurs de l'INHP (aujourd'hui Agrocampus-Ouest, centre d'Angers), des chercheurs de l'INRA centre d'Angers et des étudiants en stage de fin d'études.
- les pépinières qui ont fournies les arbres : pépinière Guillot-Bourne et pépinière Lappen.

- les bureaux d'étude spécialisés : sols, irrigation, enracinement, arbres : Végétude, Sol Paysage, Hydrasol, Pousse conseil.

**Un lieu d'observation :** la Cité internationale de Lyon (CIL) en cours d'aménagement. Un site pilote qui a offert les conditions nécessaires pour mener à bien des observations "in situ" et grandeur nature sur les plantations urbaines.

Le site d'étude couvrent 5 secteurs paysagers principalement: les Bandes boisées, le Parc sud, le Triangle Interpol, le Rond-point Poincaré, l'Arboretum. La figure n°1 présente le plan de la CIL et des différents secteurs paysagers.



Figure 1 : Plan de la Cité internationale de Lyon et des différents secteurs paysagers

Trois thématiques principales ont été définies au départ du programme:

- le sol : la qualité des sols reconstitués
- l'eau : l'alimentation hydrique des arbres
- l'arbre : la plantation et la qualité de la reprise aérienne et souterraine.

## 1.2 LA CRISE DE TRANSPLANTATION

Lors de sa plantation environ 60% du système racinaire de l'arbre reste dans le sol de la pépinière. La taille des parties aériennes est aussi conséquente. L'arbre d'ornement mis en place dans les espaces verts subit un traumatisme très fort au moment de la plantation que l'on appelle « la crise de transplantation ». Ces traumatismes peuvent-ils être dépassés grâce aux conditions de sol et d'alimentation hydrique ? L'arbre peut-il retrouver une croissance « normale » ? Comment réagit l'arbre à ce stress (perte de racines à l'arrachage). Comment se fait la reprise ?

Après la transplantation, la reprise d'un arbre est le redémarrage de la croissance et du développement de l'arbre qui ont été brutalement stoppés au moment de l'arrachage dans la pépinière. « La reprise est une anomalie du développement causée par un accident particulier, l'arrachage, qui provoque l'arrêt puis le redémarrage du développement de l'arbre » (Pousse-conseil, 2014). Il y a reprise complète lorsque l'arbre a récupéré son aptitude à se développer normalement comme un arbre forestier. La régénération nécessite le redémarrage des capacités de croissance et le retour d'un développement de l'arbre conforme à celui d'un individu n'ayant pas subi la transplantation. Cette phase peut durer de quelques mois à quelques années ou ne jamais cesser parfois jusqu'à la mort de l'arbre; mais les contraintes environnementales peuvent bloquer son développement. La reprise de la croissance se mesure traditionnellement par l'augmentation du diamètre du tronc et des branches et par l'allongement des rameaux, mais aussi par l'allongement des racines. Elle se mesure aussi par l'architecture qui se met en place, suivant ou non, le mode de développement de l'espèce.

La plantation d'arbres en espaces verts présente trois étapes :

- les conditions de cultures en pépinières
- les conditions de la transplantation
- l'évolution de la croissance

Le programme Sciencil a été mis en place pour tenter de donner des réponses à cette problématique : peut-on mettre au point des méthodes de contrôle de l'environnement de l'arbre transplanté et établir des diagnostics de la reprise ?

## 2 LES CONDITIONS DE LA REPRISE : LES PRINCIPAUX RÉSULTATS DES ÉTUDES

### 2.1 LES CONDITIONS DE CULTURE EN PÉPINIÈRES : L'ARBRE EN PÉPINIÈRE

L'arbre de pépinière est préparé pour être transplanté dans les parcs et jardins. Par rapport à son modèle de développement naturel, c'est un arbre déstructuré. La taille et la transplantation, en annulant les corrélations de croissance, provoquent la disjonction d'éléments morphologiques qui devraient évoluer de concert. La taille et la transplantation provoquent notamment une distorsion de la séquence d'évolution de la partie aérienne. Cette rupture se traduit par un affaiblissement de la vigueur des rameaux.

Les transplantations successives en pépinières dès les premières années conduisent à une forte densité racinaire dans la motte de transplantation. Le pivot originel est sectionné et des racines verticales et horizontales se développent.

La connaissance des itinéraires techniques et des modes de culture en pépinières sont importants pour connaître les caractéristiques morphologiques des racines des arbres plantés.

Les arbres de la cité internationale viennent de deux pépinières qui pratiquent des itinéraires techniques partiellement différents : après une à deux transplantations en pépinières d'élevage, les jeunes plants sont contreplantés en pépinières de gros sujets. Ils y resteront 3 à 5 ans avant une autre contreplantation ou la plantation définitive.

De la première pépinière, localisée en Rhénanie, proviennent des chênes pédonculés (*Quercus robur*). Des contre-plantations sont pratiquées très régulièrement (tous les 3 ans) de façon à forcer le développement des racines dans un volume restreint. Le sol de cette pépinière présente une texture sableuse, qui induit un développement important du chevelu par rapport aux charpentières. Un enherbement permanent est présent sur l'ensemble de la parcelle. Les arbres fournis ont une force de 20/25 à 45/50. Les observations ont montré qu'une grande partie de l'enracinement se trouve dans la motte avec de nombreuses racines fines. Environ 50% du volume de sol fortement prospecté par les racines est présent dans la motte (Fayet, 1994) (figure 2).

De la deuxième pépinière localisée en Isère, proviennent les frênes blancs (*Fraxinus americana*). Les contre-plantations sont moins régulières, le sol de la parcelle, argilo-limoneux, est travaillé en surface 2 ou 3 fois par an. Les racines des frênes se développent plus librement tant horizontalement que verticalement. Environ 5% seulement du volume de sol prospecté par les racines est présent dans la motte (Fayet, 1994) (figure 2).

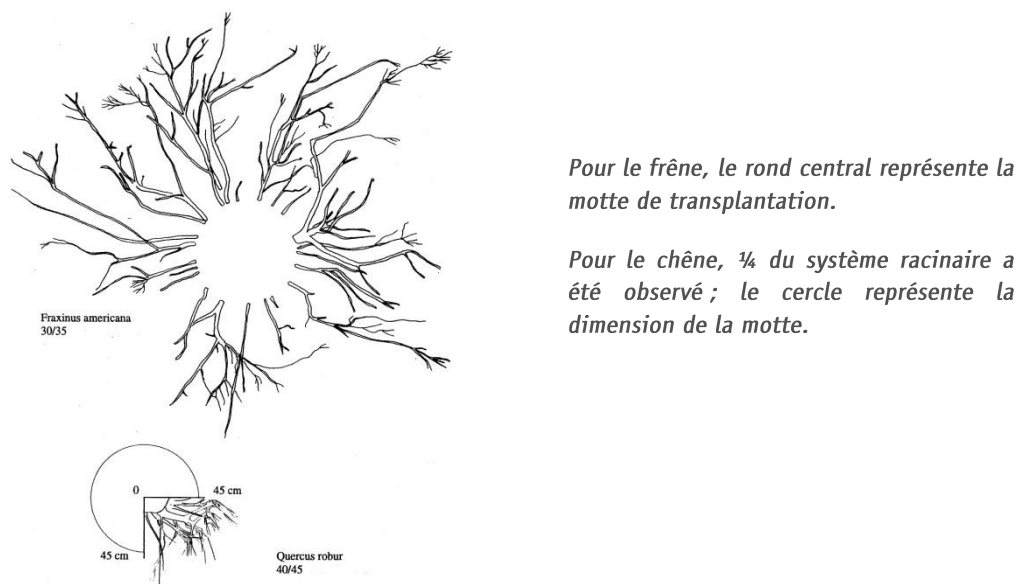


Figure 2 : Comparaison de l'étendue du système racinaire du frêne et du chêne en pépinière

La caractérisation de la partie aérienne en pépinière doit pouvoir qualifier l'expression du modèle architectural et déterminer aussi le stade de développement de l'arbre. L'observation de la silhouette générale de l'arbre et de l'axe principal est une première étape, elle doit dire aussi si la flèche est toujours dominante, si des rameaux hypotones ou épitones se développent et comment ils se répartissent. Les différents étages de charpentières sont décrits ainsi que la hauteur sous couronne. D'autres observations comme l'état du tronc, la longueur des rameaux annuels et l'état des feuilles peuvent aussi être réalisées.

Le tableau 1 résume les observations réalisées sur la partie aérienne des frênes et des chênes en pépinière.



Stades de développement	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Flèche	+	+	+	+	+	5/6 -	-	-	-	
Dominance apicale	+	+	+	+	4/5 -	-	-	-	-	
Hypotonie des branches inférieures		+	+	+/-	+/-	-				
Hypotonie de la partie supérieure		+	+	+	+/-	-	-	-		
Unité architecturale arbre entier	+	+	+	3/4 -	-	-	-	-	-	-
Unité architecturale partie haute	+	+	+	+	4/5 -	-	-	-	-	
Unité architecturale branches hautes	+	+	+	+	+	5/6 -	-	-	-	
Réitération sylleptique basse	-	-	-	+	+	-				
Réitération sylleptique haute	-	-	-	-	4/5 +	+	+/-	-	-	
Réitération proleptique basse	-	-	-	+/-	+	+				
Réitération proleptique haute	-	-	-	-	+/-	+	+	+	+	
Réitération proleptique totale	-	-	-	-	-	-	-	-	-	9/10 +
Vigueur des rameaux les plus forts	2 à 4	4	4	4	3 à 4	3 à 4	2 à 3	1	1 à 4	1 à 5
Acrotonie des rameaux d'un an	2 à 4	4	4	4	3 à 4	3	2	1	1 à 4	1 à 5
Mort des branches basses	-	-	-	-	4/5 +	+	6/7			
Mortalité à la base des branches	-	-	+/-	+/-	+/-	+/-	+	+	-	
Mort des extrémités de branches	-	-	-	-		-			8/9 +	
Descente de cime	-	-	-	-	-	-	-	-	-	9/10 +

Tableau 1 : Exemple d'observations réalisées sur la partie aérienne de *Fraxinus americana* et *Quercus robur* en pépinière - D'après Hélène Fayet (1994)

Case vide : le phénomène ne peut apparaître car l'organe concerné est absent  
+ : le phénomène est présent  
- : le phénomène est absent  
■ : Critères non pertinents en raison de l'élagage  
4/5 : caractère discriminant pour le passage du stade 4 au stade 5.

La figure 3 montre les observations effectuées sur un frêne du rondpoint Poincaré.

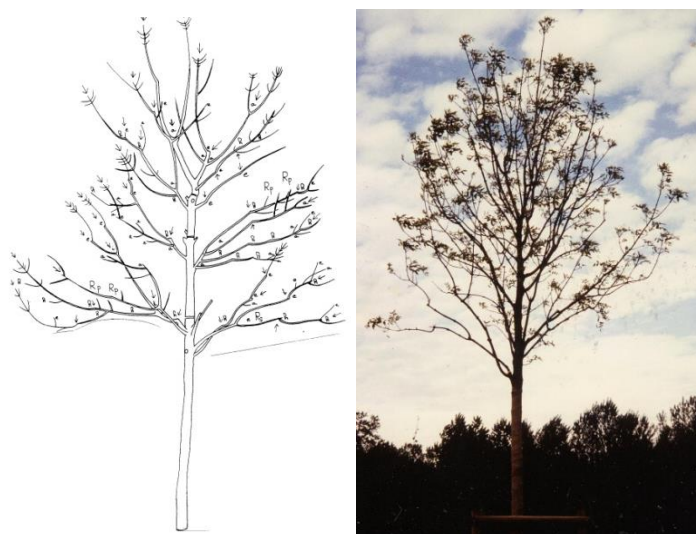


Figure 3 : Observation de la partie aérienne d'un frêne transplanté

## 2.2 CONTRÔLE DE LA QUALITÉ DES ARBRES EN PÉPINIÈRE PAR LES GESTIONNAIRES DES PARCS ET JARDINS

Quelques éléments de réponse ressortent concernant "comment juger de la qualité des plants" :

- Le choix des sujets doit être fait par les gestionnaires des espaces verts directement sur la pépinière. Ils effectuent une analyse morphologique initiale permettant des éléments de choix des sujets (voir fiche méthodologique sur plate-forme internet de Plante&Cité).
- La qualité de l'enracinement peut être appréciée lorsque les arbres sont en racines nues. Cela permet de procéder à des tailles racinaires si cela est nécessaire. Si non, des observations sur les racines présentes dans les mottes de quelques sujets doivent être réalisées. En effet le conditionnement en mottes ne permet pas de contrôler l'architecture des racines, qui est un facteur important de la reprise.
- Généralement les sujets les plus jeunes reprennent plus vite que les plus âgés.
- Dans le cas où un rééquilibrage entre les parties aérienne et racinaire est nécessaire, celui-ci peut être réalisé par une taille.

Mais le suivi réalisé dans ce travail en pépinière sur une saison ne permet de donner que des pistes de réflexion sur la méthode de choix des sujets en pépinière.

Ces arbres transplantés dans des fosses restreintes dans les aménagements paysagers sont des arbres fragiles. Il faut soigner les conditions de mise en place pour leur donner le maximum de chances de reprise : le sol d'accueil et la fourniture en eau.

## 3 LES CONDITIONS DE LA TRANSPLANTATION : LE SOL D'ACCUEIL ET SES PROPRIÉTÉS

### 3.1 LE MODÈLE DE SOL

L'importance du sol dans la croissance des parties aériennes et racinaires de l'arbre est fondamentale : en fonction du chantier, de sa localisation et des matériaux de qualité à disposition, il faut soit améliorer les sols soit reconstituer des sols fertiles. Dans le cas de la CIL, un modèle de sol fertile a été établi par analogie au sol naturel et qualifié de fertile par les agropédologues. Ce modèle de sol fertile est le suivant (Sol Paysage, 2012).



Figure 4 : Sol fertile reconstitué sur la CIL

- En surface, un mulch organique ou minéral, de 1 à 5 cm d'épaisseur. Il permet de préserver la structure du sol contre les dégradations dues aux pluies ou au piétinement. Cette couche dépend du type d'espaces verts. Elle est conseillée pour les arbres d'alignement ou les surfaces de petites tailles où le passage piétonnier est important.
- En dessous, une couche constituée de « terre végétale » qui peut être mélangée en quantité plus ou moins importante à des matières organiques transformées (compost ou fumier). Cet apport organique peut constituer jusqu'à 50% en volume total de la couche de surface. Son épaisseur est de 20 à 30 cm.

- La couche suivante est constituée de matériau meuble d'origine pédologique, dont la teneur en matières organiques humifiées est variable de moins de 1% à plus de 2%. L'important est la présence d'une structure nette en agrégats. Son épaisseur varie en fonction du type de végétation : 50 à 70 cm pour les arbres.
- Cette couche repose sur le substratum naturel ou anthropique. Il doit présenter une porosité compatible avec l'écoulement des eaux de percolation et avec la pénétration des racines. Dans le cas des arbres d'alignement cette couche constitue l'encaissant dans lequel la fosse de plantation est réalisée.

Dans cette reconstitution des sols, une grande importance est donnée à la teneur en matière organique de l'horizon de surface. Dans les 20 premiers cm, il a été incorporé un volume égal de compost à la terre végétale. Cet apport important de matière organique a un effet bénéfique sur la fertilité chimique et biologique, mais aussi sur la fertilité physique (Sol Paysage, 2012).

La reconstitution des sols a tenu compte du type de végétation à installer. Pour les pelouses et les arbustes la profondeur est de 40 cm en deux couches, pour les arbres de 100 cm en deux ou trois couches.

Un des objectifs de Sciencil était de caractériser les propriétés physiques des sols mis en place, de vérifier leur qualité agronomique, et proposer une méthodologie de mise en place et de contrôle du travail de reconstruction par les entreprises. Les moyens d'amélioration de la fertilité chimique du sol sont les mêmes que ceux utilisés en agriculture et ne constituent pas une problématique d'étude.

Les propriétés physiques à caractériser qui ont été choisies sont la masse volumique apparente (ou densité apparente), la perméabilité, la porosité (Rossignol, 1996 & 1999 – Michez, 1994 – Pailoux, 1995 – Fradin, 1997). Elles sont des marqueurs de la fertilité physique. Cette fertilité physique doit être obtenue au moment de la mise en place car l'amélioration de ces propriétés est difficile à réaliser une fois le sol installé.

Les propriétés mécaniques ont aussi fait l'objet d'étude : la cohésion, la plasticité et la liquidité. Elles sont fondamentales à connaître lors des différentes opérations de manutentions et de transports des matériaux servant à la reconstitution des sols. Ces opérations sont à l'origine des dégradations de la qualité physique des matériaux terreux, c'est-à-dire des modifications de la structure initiale des agrégats. A ce titre, la qualité du travail de reconstruction réalisé dépend étroitement du type d'engins de génie civil utilisés,. Par exemple la pelle mécanique, le chargeur, la benne, etc.

### 3.2 LA MASSE VOLUMIQUE APPARENTE (OU DENSITÉ APPARENTE)

La masse volumique apparente (ou densité apparente) permet d'évaluer la compacité du sol. Des mesures de densité apparente ont été effectuées dans les différents secteurs de la CIL, l'année de la réalisation des sols et les 2 années suivantes, dans les sols profonds et dans les sols superficiels. Deux équipements de mesures ont été utilisés, (i) une sonde gamma-densimétrique de profondeur (atténuation du rayonnement  $\gamma$ ), avec une mesure tous les 10 cm, (ii) un densitomètre à membranes.

Secteurs	densités apparentes moyennes
Arboretum haut	1,45 +/- 0,05
Triangle Interpol	1,47 +/- 0,06
Arboretum bas	1,48 +/- 0,02
Bande boisée 1	1,49 +/- 0,02
Bande boisée 0	1,49 +/- 0,02
Bandes boisées 2 – 3 – 4	1,51 +/- 0,01
Parc sud	1,56 +/- 0,02
Rond-point Poincaré	1,60 +/- 0,02

Tableau 2 : Masses volumiques apparentes (da) des sols reconstitués.

Secteurs	densités apparentes moyennes
Parc sud	1,56 +/- 0,02
Triangle Interpol	1,83 +/- 0,01

Tableau 2a : da moyennes des sols profonds  
(Mesures dans les couches en dessous de l'horizon superficiel)

Les tableaux 2a et 2b présentent des valeurs moyennes de densités apparentes, très différentes selon les secteurs. Pour les sols profonds, les valeurs varient de 1,45 à 1,60. Ce sont des valeurs conformes à des horizons de profondeur de référence. Pour les sols superficiels, les densités ont été mesurées dans deux secteurs. Les valeurs de masse volumique des différents secteurs sont convenables, sauf pour les sols superficiels du triangle Interpol où elles sont fortes. Ces densités apparentes sont la résultante d'une compaction au moment de la mise en place, du fait d'une part de l'humidité du matériau et d'autre part au type d'engin utilisé.

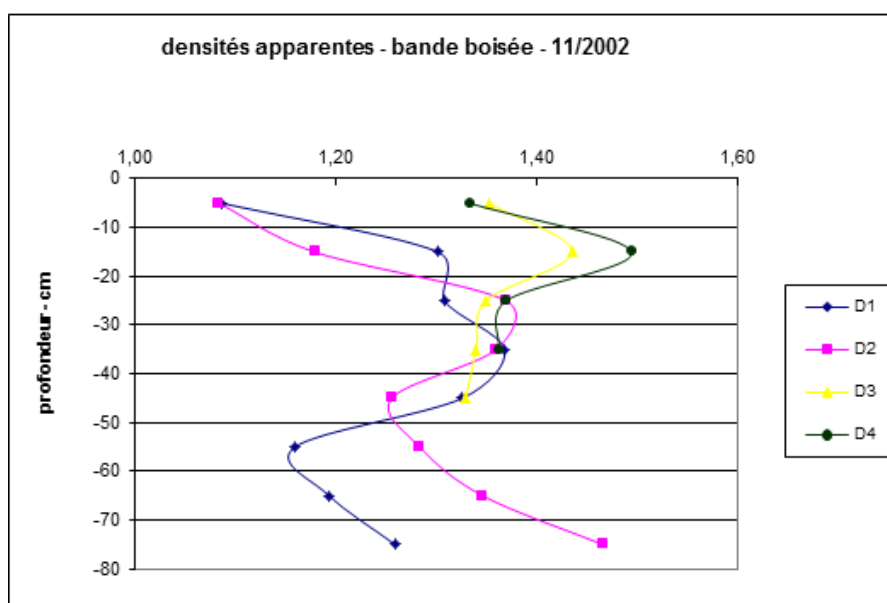


Figure 5 : Densités apparentes des sols de la bande boisée en 2002

Les courbes obtenues en 2002 sur les sols de la Bande boisée sont assez caractéristiques des sols reconstitués (figure 5) ; en forme de Z ou de S à l'envers. La faible densité apparente de surface est liée à la forte teneur en matière organique. L'augmentation entre 50 et 80 cm correspond au poids du sol sur lui-même. Les valeurs obtenues entre 1,1 et 1,5 sont des valeurs de sols poreux, à mettre en relation avec les descriptions de fosses pédologiques effectuées. Le profil de densité s'est stabilisé en trois à quatre ans. Les mottes et les agrégats sous l'action des agents atmosphériques (pluies, assèchement) et du poids du sol se réorganisent lentement. En moyenne la densité apparente a augmenté de 24% en 3 ans dans les sols du rond-point Poincaré mais seulement de 11% dans les sols du triangle Interpol en 2 ans. Ceci se traduit par une diminution du volume du sol, principalement sur la hauteur. Suivant les secteurs, celle-ci diminue de 20 cm environ au rond-point Poincaré et de 10 cm dans le triangle Interpol. Pour pallier ce phénomène, au moment de la mise en place, la hauteur de sol peut être augmentée de 10%.

Trois classes de valeurs de la densité apparente sont proposées pour évaluer la compacité :

- $da < 1,5$  : faible compacité : les racines pénètrent facilement dans les sols et les eaux de drainage circulent rapidement dans les horizons.
- $1,5 < da < 1,7$  : compacité moyenne à élever des couches de surface et compacité normale des couches profondes.

- $d_a > 1,7$  : forte compacité : la majorité des racines ne peuvent pas pénétrer dans la couche de sol.

En terme de bilan de méthode, la gamma-densimétrie est délicate à mettre en œuvre car elle utilise des sources radioactives, et elle n'est disponible que chez très peu de laboratoires ou services (ex. Ponts et Chaussées-IFSTTAR, services de Voirie, laboratoires de Recherche).

Mais des méthodes plus rustiques, comme le densitomètre à membrane, le cylindre, le sable calibré ou l'eau peuvent être utilisées en routine, mais nécessitent l'ouverture de fosses.

### 3.3 LA PERMÉABILITÉ

Cette propriété est importante car elle mesure la vitesse de circulation de l'eau dans les sols. Elle permet la réhumectation et le ressuyage du sol. Elle est reliée à la macroporosité la plus grossière dans laquelle circulent l'eau (porosité de drainage) mais aussi l'air ! Le tableau 3 montre que cette perméabilité est toujours plus forte en surface qu'en profondeur et qu'elle varie énormément non seulement entre les secteurs, mais aussi à l'intérieur de ceux-ci (écart-type élevé).

secteurs	Profondeur 35 cm		Profondeur 65 cm	
	moyenne	écart-type	moyenne	écart-type
Parc sud (sp)	15,64	6,06	6,10	6,14
Rondpoint Poincaré	6,99	4,94	4,11	2,18
Triangle interpol (sp)	5,00	2,91	2,45	3,10
Bande boisée 1	4,34	3,67	0,67	0,49
Parc sud (ss)	1,69	2,07		
Triangle interpol (ss)	1,45	1,90		
Bande boisée 0	1,59	1,82	1,45	
Bande boisée 4	0,40	0,16	1,09	1,81
Arboretum	0,23	0,16	0,31	0,13

Tableau 3 : Perméabilité des sols de la CIL en cm.h-1

sp : sols profonds

ss : sols superficiels

La perméabilité dépend directement des conditions de mise en place des sols. La capacité de drainage est évaluée par la mesure de conductivité hydraulique (Kfs) avec les valeurs de référence :

- $Kfs > 5$  cm/h : forte capacité de drainage. La percolation des eaux de pluie ou d'irrigation se fait rapidement.
- $2$  cm/h  $< Kfs < 5$  cm/h : moyenne capacité de drainage. La percolation des eaux se fait normalement.
- $Kfs < 2$  cm/h : faible capacité de drainage. La percolation de l'eau est lente à très lente ; une certaine stagnation de l'eau se produit dans le sol.

Les sols de la CIL possèdent des perméabilités moyennes et faibles. Il n'y a pas de relations simples entre densité apparente et perméabilité, qui sont deux caractéristiques complémentaires. Car la circulation rapide de l'eau n'est reliée qu'à la porosité grossière.

Le matériel utilisé est le perméamètre de Guelph. Il est assez difficile à mettre en œuvre et l'interprétation des résultats est délicate. Des bureaux d'étude peuvent être équipés et proposer une prestation de services. D'autres méthodes existent comme l'infiltromètre à double ou simple anneau, l'infiltromètre à tension prédéfinie, le perméamètre à charge constante.

### 3.4 LA POROSITÉ

La porosité du sol a deux fonctions : la rétention en eau qui se fait dans la microporosité, l'aération et la circulation de l'eau qui se font dans la macroporosité. La connaissance de ces deux domaines poreux permet de mieux caractériser la fertilité physique des horizons. Leur détermination peut permettre de mieux connaître les mécanismes de reconstitution des sols lors de la mise en place.

Une partie de la macroporosité s'apprécie qualitativement par la description morphologique des différentes couches du sol. Elle nécessite l'ouverture de fosses pédologiques. Elles ont donc été réalisées sur les différents secteurs de la CIL, entre 1994 et 2002 ; 57 solum ont été décrits (Sol Paysage, 2012). La quantification de la porosité s'est faite sur certaines fosses de la Cité internationale en utilisant la technique de l'analyse d'images de blocs de sols solidifiés et non modifiés. Plusieurs types de pores sont décrits : les fissures, les pores ronds et les pores interconnectés (ou amas de pores). La figure 6 montre les variations suivant les secteurs ; en particulier dans le Parc sud et dans le triangle Interpol. La macroporosité mesurée est supérieure en profondeur par rapport à la surface, montrant ainsi qu'un compactage de surface a eu lieu. C'est une méthode originale mais réservée à la recherche.

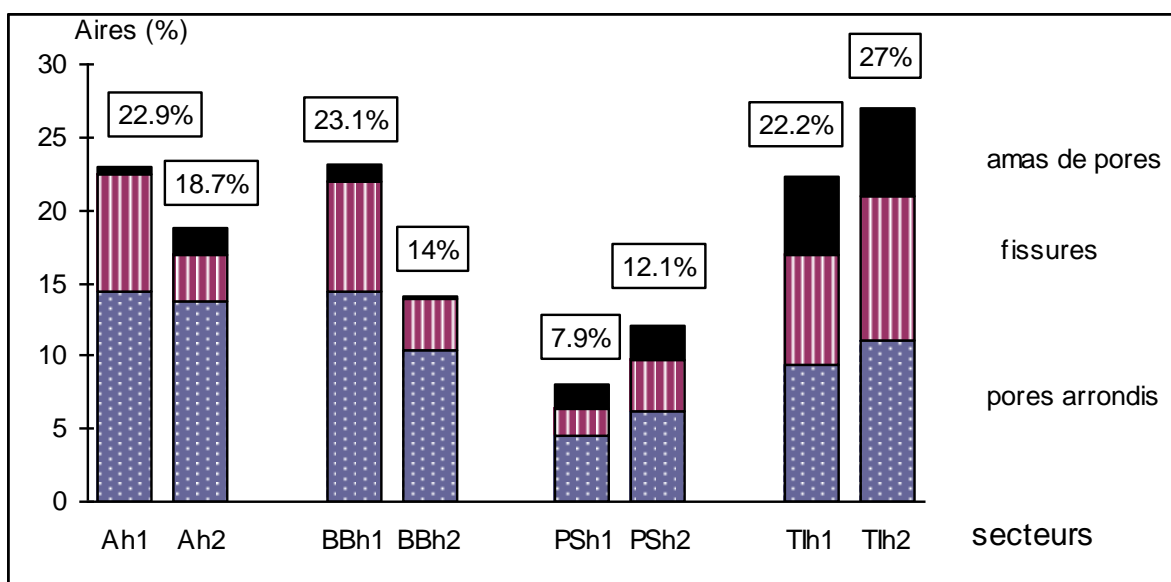


Figure 6 : Macroporosité et forme des pores

h1 et h2 : horizons 1 de surface et 2 de profondeur

A : arboretum - BB : bandes boisées - PS : parc sud - TI : triangle interpol

L'utilisation des données analytiques permet d'avoir un ordre de grandeur de ces deux porosités, par les relations suivantes :

- Porosité totale  $P_t$  :  $P_t = (d_r - d_a) / d_r$  (où  $d_r$  = masse volumique réelle ;  $d_a$  = masse volumique apparente)
- Porosité totale = macroporosité - microporosité
- Microporosité =  $HCC \times d_a$ , où HCC = humidité à la capacité au champ en % pondéral
- Macroporosité = porosité totale - microporosité

Le tableau 4 présente quelques résultats sur certains secteurs. La microporosité varie relativement peu. C'est la macroporosité qui varie le plus car elle est davantage soumise aux contraintes extérieures.

secteurs		dr	da	Pt	mp	Mp
Arboretum	Horizon 1	2,56	1,51	41,0	28,2	12,8
	Horizon 2	2,47	1,35	45,3	29,5	15,8
Rondpoint	Horizon 1	2,62	1,21	53,8	25,9	27,9
Bande boisée	Horizon 1	2,56	1,5	41,4	28,8	12,6
	Horizon 2	2,6	1,46	43,8	29,3	14,5
Triangle interpol	Horizon 1	2,54	1,84	27,5	27,5	7,2
	Horizon 2	2,54	1,37	46,1	25,9	23,6
Parc sud	Horizon 1	2,66	1,54	42,1	23,8	18,3

Tableau 4 : Porosité

dr : densité réelle – da : densité apparente – Pt : porosité totale – mp : microporosité – Mp : macroporosité

La macroporosité (Mp) renseigne sur la capacité d'aération :(diffusion de l'air dans le sol, renouvellement de son atmosphère, circulation de l'eau.

On considère que :

- Mp > 20% : forte capacité d'aération et de percolation
- 10 < Mp < 20% : capacité d'aération et de percolation moyenne
- Mp < 10% : faible capacité d'aération et risque de mauvaise percolation.

Les sols de la CIL présentent une macroporosité moyenne, généralement entre 10 et 20 %. Les sols superficiels du triangle Interpol ont été compactés et leur macroporosité est faible (7%).

### 3.5 LA RÉSISTANCE À LA PÉNÉTRATION

Le contrôle de la qualité du travail de mise en place des sols est un élément important à prendre en compte. Il est intéressant d'avoir des méthodes de mesure non destructives et faciles d'utilisation. Le pénétromètre répond à cette problématique par la mesure de la résistance à la pénétration d'un cône de diamètre donné dans le sol. Un type de pénétromètre a été testé sur les sols de la CIL (pénétromètre Panda®). La résistance à la pénétration est une propriété du sol liée principalement à deux paramètres : la compacité et l'humidité. Les courbes obtenues peuvent aussi être interprétées suivant les matériaux présents et leur humidité (exemple Figure 7).

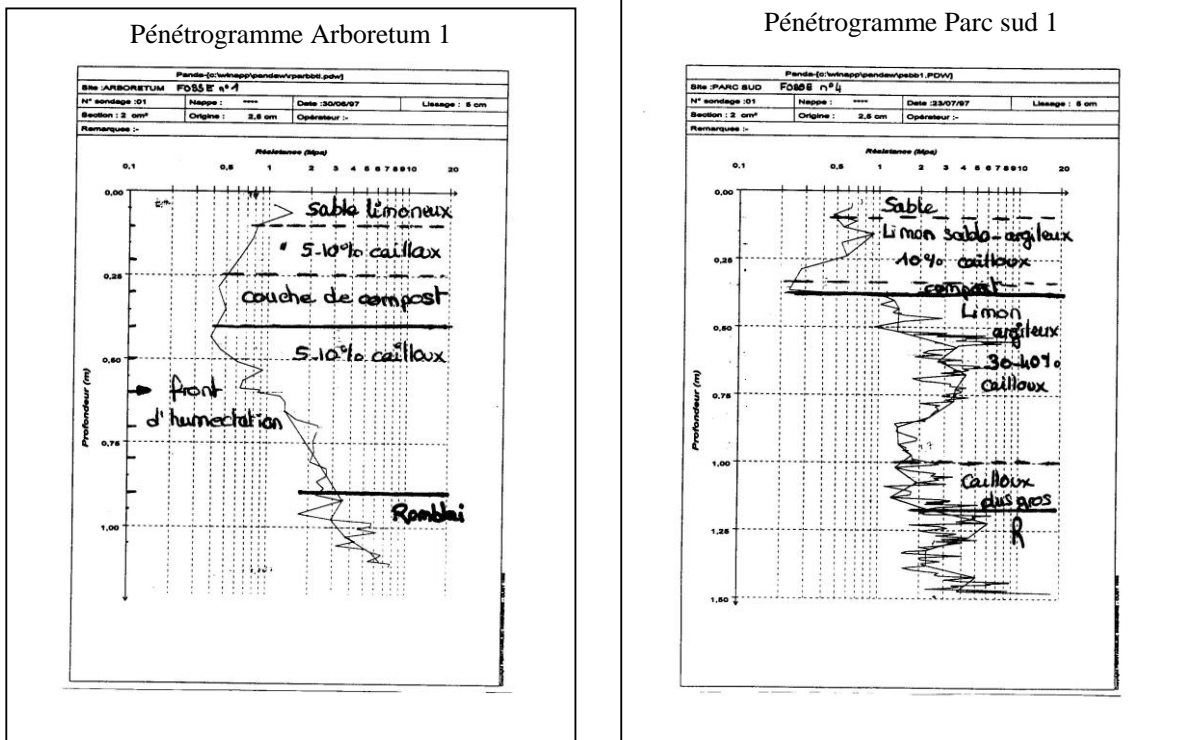


Figure 7 : Pénétrogrammes et couches du sol

La principale difficulté d'interprétation des courbes obtenues réside dans les variations de la résistance à la pénétration en fonction de l'humidité. En effet le sol présente trois états mécaniques : état liquide en sol très humide à saturé, état plastique en sol ressuyé, état cohérent en sol sec. Pour une même compacité, la valeur de la résistance à la pénétration dépend de l'état mécanique. En sol très humide, elle est toujours faible ; par contre en sol sec, elle devient très forte. (Debayle, 1998) (figure 8)

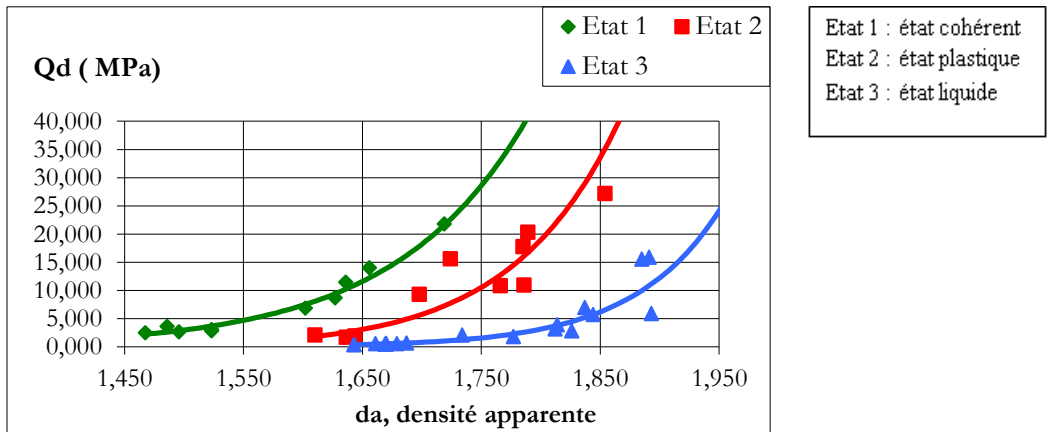


Figure 8 : Relations entre résistance à la pénétration et densité apparente

Ces mesures de résistance à la pénétration comme méthode de contrôle de la mise en place des sols sont intéressantes à considérer. Mais un certain nombre de précautions sont à prendre :

- connaître le taux d'humidité du sol au moment des mesures et le relier à son état mécanique. Des observations à la tarière à main peuvent être réalisées au préalable et si nécessaires des mesures de teneur en eau d'échantillons.
- connaître les différents matériaux présents. De même des observations à la tarière à main peuvent être effectuées.



- comparer plusieurs profils de résistance entre eux, dans les zones où les sols sont identiques et les matériaux homogènes.

L'utilisation du pénétromètre Panda peut permettre de mettre en évidence des couches très compactées, caillouteuses. Les courbes obtenues donnent des indications sur la nécessité de poursuivre les contrôles en utilisant d'autres méthodes plus destructives. C'est une première étape.

Sur les sols de la CIL et en particulier pour la terre dite de Genas, des valeurs ont été mises en évidence. Le tableau 5 donne ces valeurs seuils entre résistance à la pénétration et densité apparente liées à l'état mécanique du matériau. Deux valeurs sont retenues : 5 MPa correspond au début de l'augmentation rapide de la résistance et 30 MPa à la valeur maximum mesurée par le pénétromètre Panda.

	Etat cohérent		Etat plastique		Etat liquide	
	5MPa	30MPa	5MPa	30MPa	5MPa	30MPa
Résistance à la pénétration						
Densité apparente	1,55	1,7	1,7	1,85	1,85	1,95 à 2

Tableau 5 : Valeurs de résistance à la pénétration

Ces valeurs montrent que l'utilisation du pénétromètre donnera des résultats si le sol est à l'état cohérent : la résistance de 5 MPa correspond à une densité apparente de 1,55 et 30MPa à 1,7.

D'autres pénétromètres manuels existent, mais n'ont pas été testés dans les études Sciencil. Ce travail reste à faire.

### 3.6 LES PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES ET TRAVAIL DU SOL:

#### COHÉSION, PLASTICITÉ ET LIQUIDITÉ

Suivant la teneur en eau les matériaux présentent trois états : cohérent, plastique et liquide. Les propriétés qui en découlent sont les suivantes.

- **Etat cohérent** : les agrégats et les mottes résistent d'abord aux forces d'écrasement, puis éclate en éléments plus petits et en terre fine. A la main on a un matériau friable et fragile, les mottes s'égrainent bien.
- **Etat plastique** : sous l'action de forces extérieures, les constituants minéraux des agrégats et des mottes glissent les uns sur les autres, grâce aux films d'eau. Le matériau se malaxe et se compacte sous un outil ou sous les doigts.
- **Etat liquide** : l'eau présente en grande quantité est responsable d'une liquéfaction du matériau sous l'action de forces extérieures.

Ces propriétés mécaniques conditionnent les différentes opérations de collecte, de transport, de stockage et de mise en place de la terre. Le matériau doit se trouver à l'état cohérent pour éviter les compactages et les prises en masse.

Le test Proctor de compactage dynamique illustre le rôle de l'humidité du matériau dans sa réaction au compactage. La terre de Genas, un des composants des sols reconstitués de la CIL, a subi ce test. Les courbes montrent l'augmentation rapide de la densité apparente da lorsque l'on passe de l'état cohérent à l'état plastique. Elles montrent aussi l'augmentation de la densité apparente en fonction de l'intensité de la force exercée. La figure 9 présente les courbes Proctor de la terre de Genas et les domaines d'humidité des différents états. La courbe bleu foncé représente la valeur de l'entrée en plasticité en fonction de l'intensité de la contrainte. Elle varie entre 8 et 12 % d'humidité pondérale : c'est la passage de la terre friable à la terre malléable (Debayle, 1998).

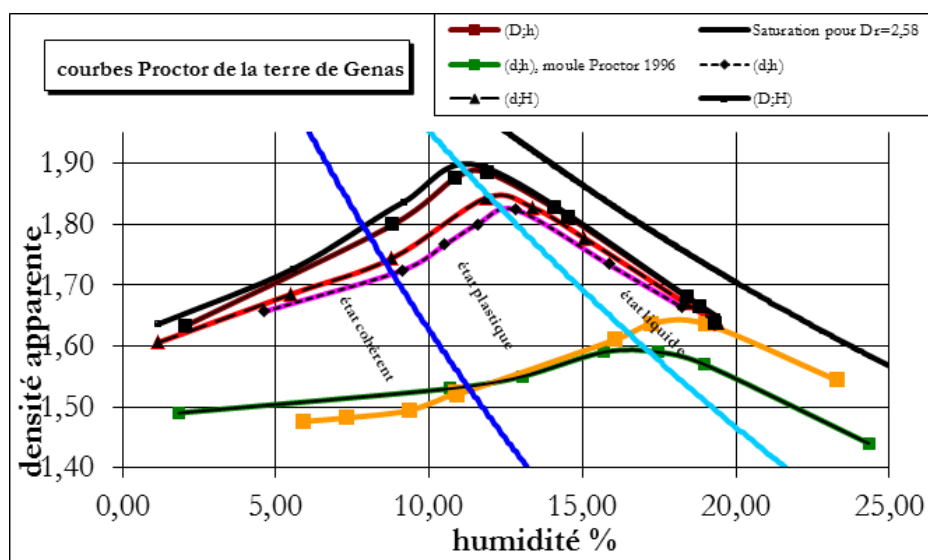


Figure 9 : Courbes Proctor de la terre de Genas

Pour cette terre de Genas les limites d'Atterberg ont été déterminées : dont la limite de plasticité (LP) déterminée à 21% ce qui est une valeur forte par rapport aux valeurs de la courbe Proctor. Il est donc préférable de privilégier l'usage de la courbe Proctor à celui des limites d'Atterberg.

Les tests Proctor se pratiquent dans les laboratoires de génie civil.

### CONDITIONS DE TRAVAIL DE LA TERRE

Les sols reconstitués de la CIL ont été mis en place par différents engins, benne, pelle mécanique et chargeur. Les matériaux étaient pour la plupart secs, et certains humides. En croisant les conditions de mise en place (engins, humidité) et les valeurs des caractéristiques physiques (densité apparente, perméabilité, porosité), il a été mis en évidence le risque d'apparition de zones compactes au moment de la mise en place des sols (Tableau 6).

Secteurs	Type de sol	Date de mise en place	Conditions de reconstitution des sols		Risque de compactage
			Engin utilisé	Matériaux	
Arboretum	profond	Mars 96	benne	sec	faible
Triangle interpol	profond	Oct-nov-déc 94	pelle mécanique	sec	faible
Bande boisée 1	profond	Janvier 96	pelle mécanique	sec	faible
Bande boisée 0	profond	Février 97	pelle mécanique	sec	faible
Bande boisée 2, 3, 4	profond	Juin-juil-nov 95	pelle mécanique	sec	faible
Parc sud	profond	Déc 94 / fév-mars 95	pelle mécanique	humide	moyen
Rond-point Poincaré	profond	Mars 94	pelle mécanique	humide	fort
Parc sud	superficiel	Déc 94 / fév-mars 95	chargeur	humide	fort
Triangle interpol	superficiel	Oct-nov-déc 94	chargeur	sec	fort

Tableau 6 : Conditions de travail de la terre à la mise en place des sols

Le rond-point Poincaré est un lieu de grand passage automobile à certaines heures de la journée. Les vibrations dues à la circulation sont transmises au sol humide en augmentant le risque de compactation interne.

Les sols superficiels engazonnés présentent plus de risques de compactage par piétinement dus à la forte fréquentation du public et à l'entretien répété de la pelouse.

Cette comparaison des conditions de mise en place et des caractéristiques des sols montre que la pelle mécanique est l'engin de chantier qui réalise le meilleur travail de reconstruction du sol, dans la mesure où l'engin peut travailler en reculant et ne roule jamais sur le travail réalisé. Le chargeur est à proscrire car il roule sur la terre mise en place. Le versement de la terre par une benne entraîne une ségrégation granulométrique des agrégats : les plus gros tombent plus vite que les plus petits. Les matériaux doivent être mis en œuvre secs et cohérents, à une humidité inférieure à l'entrée en plasticité.

### 3.7 CONCLUSIONS

Les caractérisations précédentes permettent de porter un jugement sur la fertilité physique des sols de la CIL, en utilisant les classes définies ci-dessus. A chacune des propriétés est affectée une note de 1 à 3. Cette méthodologie est réutilisable pour toute opération d'aménagement (Fradin, 1997).

Notes / Propriétés	Compacité	Capacité de drainage	Capacité d'aération
3	da < 1,5	Kfs > 5 cm.h <sup>-1</sup>	Mp > 20 %
2	1,5 < da < 1,7	2 < Kfs < 5 cm.h <sup>-1</sup>	10 < Mp < 20 %
1	da > 1,7	Kfs < 2 cm.h <sup>-1</sup>	Mp < 10 %

Tableau 7 : Détermination de la fertilité physique d'un anthroposol reconstitué

Ces notes sont attribuées aux propriétés des différents secteurs de la CIL ; la note de fertilité physique s'obtient par addition.

Secteurs	Type de sol	compacité	Capacité de drainage	Capacité d'aération	Fertilité physique
Rond-point Poincaré	profond	2	3	3	8
Triangle Interpol	profond	3	2	3	8
Parc sud	profond	2	3	2	7
Arboretum	Profond	3	1	2	6
Bandes boisées 2, 3, 4	profond	3	1	2	6
Parc sud	superficiel	2	1	2	5
Triangle Interpol	superficiel	1	1	1	3

Tableau 7a : notation des propriétés

Cette note globale de fertilité physique indique d'une part les conditions de la mise en place, d'autre part les conditions de la croissance et du développement de la végétation. Une forte note est le signe d'un travail de reconstitution des sols bien fait et d'une bonne fertilité physique apte à l'implantation rapide des végétaux. Au contraire une faible note montre des propriétés physiques défavorables à l'installation des plantes. D'après ce tableau, les sols profonds de la CIL présentent des propriétés physiques favorables à la colonisation racinaire, avec des variations entre le rond-point et les bandes boisées. Les propriétés physiques des sols superficiels sont mauvaises à très mauvaises.

En conclusion, les méthodes de contrôle de la qualité du sol reconstitué sont :

- **qualitatives** : observation morphologique d'un profil de sol
- **semi-quantitatives** : utilisation du pénétromètre
- **quantitatives** : mesures de la densité apparente et de la perméabilité

## 4 LES CONDITIONS DE LA TRANSPLANTATION : LA FOURNITURE EN EAU ET LA REPRISE RACINAIRE

Une autre condition de réussite de la transplantation est la fourniture en eau des arbres qui viennent d'être plantés. La reprise de la croissance du végétal après la transplantation est déterminée par la qualité et la quantité de la fourniture en eau. L'eau apportée doit toujours être facilement disponible aux racines au moins dans les premiers mois après la transplantation de l'arbre.

La méthode choisie pour le suivi hydrique dans le sol a été la tensiométrie (mesure du potentiel hydrique dans le sol). Elle s'est révélée être la plus pertinente tant sur le plan technique qu'économique. Les tensiomètres "électriques" «Watermark®» ont été choisis en 1994 car ils étaient utilisés en production fruitière et maraichère, et donnaient satisfaction. Les sondes étaient réparties dans un plan de la fosse, latéralement (motte, 70 cm et 100 cm) et verticalement (20, 40, 60 et 80 cm).

Deux autres méthodes ont été utilisées pour caractériser et suivre l'état hydrique des arbres eux-mêmes : la mesure du potentiel hydrique de base des feuilles, effectuée à l'aube et la mesure des variations micrométriques de diamètre de rameaux ou de branches. La comparaison de ces méthodes entre elles a permis de choisir celle pertinente, et qui en routine est facile à mettre en œuvre : la tensiométrie Watermark®.

### 4.1 BESOINS EN EAU DES ARBRES AU MOMENT DE LA REPRISE APRÈS LA TRANSPLANTATION

Les besoins en eau des arbres au moment de la reprise ont été étudiés dans le secteur de l'Arboretum en fosse de plantation de 8m<sup>3</sup> sur des Fresnes américains (*Fraxinus americana*).

Le suivi tensiométrique a été réalisé sur des arbres récemment transplantés en mottes dans des fosses de 8 m<sup>3</sup>. Une couche de mulch minéral recouvre le sol et coupe l'évaporation de l'eau. L'assèchement du sol est dû uniquement aux prélèvements par les racines. Les mesures effectuées la première année de la transplantation ont montré l'avancement d'un front d'assèchement tant latéralement que verticalement par l'action de racines absorbantes (Hydrasol, 2013). Cette évolution des profils hydriques dans le temps indique donc le développement de la colonisation racinaire dans la fosse, au moins pour les racines absorbantes (Maarouf, 1995 - Delcambre, 1996 - Madelaine, 1997). (Figure 10). Au niveau de la motte, à 70 cm et 100 cm du tronc, les tensiomètres montrent un assèchement régulier du sol, et le déclenchement d'une irrigation ramène les valeurs de potentiel proche de 0. Les tensiomètres montrent l'action d'absorption de l'eau par les racines et ne préjugent pas sur l'architecture du système racinaire.

Sur l'arbre, deux types de mesures ont été effectuées pour contrôler que l'eau dans le sol se trouve facilement exploitable par les racines et que l'arbre est en "confort hydrique" : (i) le potentiel hydrique de base des feuilles et (ii) les variations micrométriques des diamètres des rameaux.

Le potentiel hydrique des feuilles se détermine juste avant le lever du soleil, lorsqu'un équilibre hydrique s'est rétabli entre le sol et l'arbre. En valeur absolue, plus le potentiel hydrique du sol augmente, plus le potentiel de base des feuilles augmente. La figure 10 montre que le potentiel hydrique de base des feuilles varie parallèlement aux potentiels hydriques du sol.

Les variations micrométriques des rameaux indiquent le moment où le stress hydrique débute ; à savoir lorsque l'amplitude de contraction journalière augmente. Il peut être relié à un potentiel hydrique de base des feuilles et à un potentiel hydrique moyen de la fosse de plantation. Il permet donc de déterminer le déclenchement de l'irrigation. Ce sont ces mesures micrométriques qui permettent de définir les conditions de confort hydrique des arbres. (Figure 11).

Les capteurs de type "Watermark®" ont donné de très bons résultats dans la mesure du potentiel hydrique du sol et dans la gestion de l'irrigation. Leur utilisation et leur mise en place faciles en font des instruments de choix dans le pilotage de l'irrigation.

De nouveaux matériels de mesure de l'humidité dans le sol sont disponibles actuellement comme les sondes TDR et capacitives. Elles mesurent cependant l'humidité volumique du sol et non le potentiel hydrique de l'eau. Les tensiomètres électriques de type « Watermark® » sont couramment utilisés de nos jours en espaces verts.

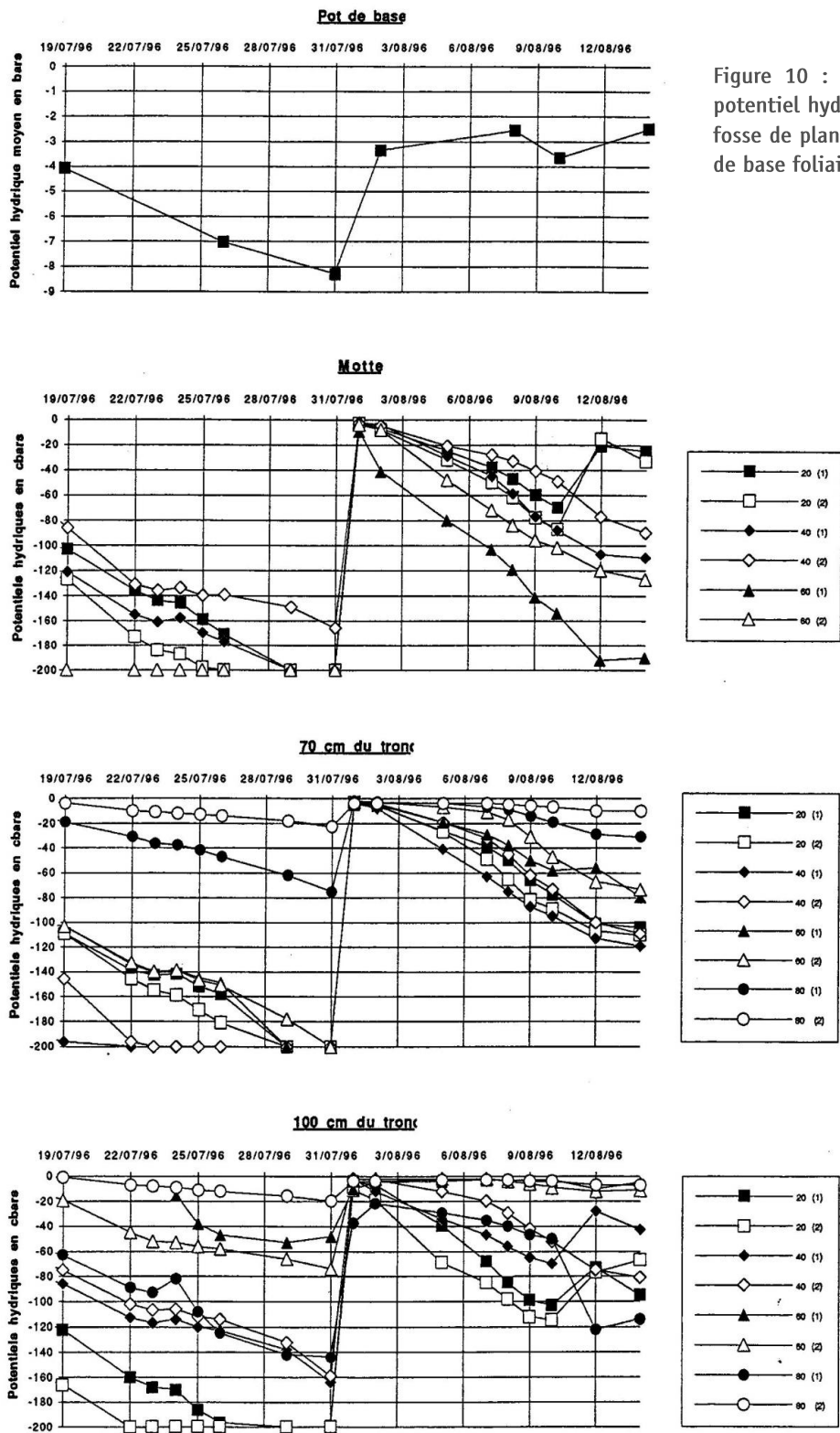


Figure 10 : Exemple de suivi du potentiel hydrique du sol dans une fosse de plantation et du potentiel de base foliaire d'un frêne

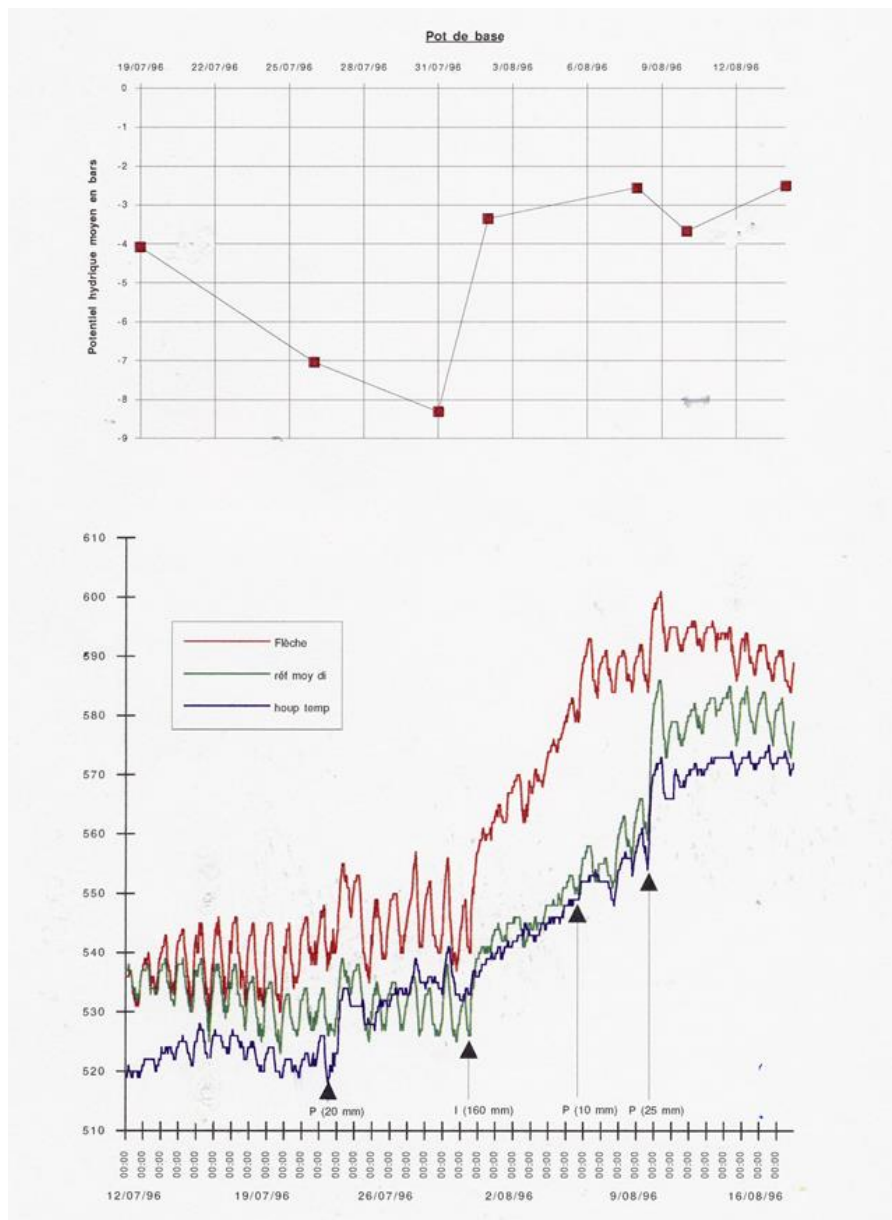


Figure 11 : Exemple de variations micrométriques de rameaux et du potentiel de base

## 4.2 LE CALCUL DES CONSOMMATIONS EN EAU DES ARBRES : APPLICATION À LA GESTION DE L'IRRIGATION

Les études suivies pendant trois ans ont permis de mettre en évidence des éléments de gestion de l'irrigation (Maarouf, 1995 - Delcambre, 1996 – Madelaine, 1997). La première partie des apports d'eau doit se faire au pied des arbres pour humecter la motte et faire sortir les racines de la motte. Les suivis tensiométriques, dans la mesure où un mulch de surface est présent, sont des indicateurs de l'assèchement du sol par les racines absorbantes des arbres. Le développement de ces racines absorbantes peut ainsi être suivi et leur localisation repérée. Le Frêne américain a une croissance racinaire rapide et en trois ans les fosses de plantation sont entièrement colonisées et les zones d'absorption sont reportées vers la périphérie. Avec un sous-sol constitué de matériaux caillouteux sans réserve en eau et difficilement pénétrables par les racines, les Fresnes montrent un stress hydrique important lorsque la totalité de la fosse a été colonisée par les racines. Dans ces conditions, il est nécessaire de faire des apports d'eau pour conserver un aspect esthétique agréable à l'œil.

Deux méthodes peuvent être utilisées pour estimer la consommation en eau des arbres :

- 1 - Utilisation de la représentation spatiale pour le calcul des volumes d'eau utilisés :

On estime la consommation des arbres à partir des données tensiométriques, en les extrapolant à l'ensemble du volume de sol. On a choisi des fosses où les valeurs de potentiels sont symétriques par rapport à l'axe de l'arbre. Les sols ont été découpés en trois calottes sphériques concentriques : la motte et sa périphérie (0,25m<sup>3</sup>) et deux autres concentriques de 0,5 et 1,5 m<sup>3</sup>. On affecte un potentiel hydrique moyen à chaque volume ; celui-ci est relié à l'humidité par la courbe humidité-pF ; ce qui permet d'estimer l'assèchement du sol : pour l'arbre n°4, entre le 13 et le 19 juin 1997, la consommation journalière a été de 14 litres d'eau.

Des courbes potentiel hydrique / humidité volumique sont donc nécessaires pour permettre de mieux déterminer la valeur du potentiel qui indiquera le déclenchement de l'irrigation.

- 2 - Utilisation de la formule de Lindsey et Bassuk (1992) :

La consommation journalière en eau CJ d'un arbre est fonction de la surface de la couronne CP projetée au sol, de l'indice foliaire LAI donnant la surface foliaire, de la demande climatique moyenne quotidienne ETPm, du taux TX de transpiration par rapport à une surface libre d'eau ; la relation est la suivante :

$$CJ = CP \times LAI \times ETPm \times TX$$

En accord avec les auteurs, les valeurs utilisées sont les suivantes :

- > LAI = 4
- > ETPm a été calculée par la méthode de Penman, pendant la période de référence. Elle est de 4,8 mm par jour entre le 13 et le 19 juin 1997
- > TX = 20 %

Le diamètre de la couronne permet le calcul de la projection de celle-ci sur le sol (CP).

Arbre	Diamètre de la couronne	Consommation journalière
1	4 m	49 litres
2	2,5 m	19 litres
3	1,9 m	11 litres

La comparaison entre les deux méthodes montre des valeurs identiques pour l'arbre 3 : de 11 à 14 litres par jour.

Mais d'autres données sont importantes à considérer comme par exemple le réservoir en eau du sol appelé RUM (réservoir utilisable maximum): celui-ci est calculé à partir des données analytiques par la formule :

$RUM = (HCC - HPF) \times da \times h \times F$ , Avec HCC, humidité à la capacité au champ et HPF, humidité au point de flétrissement en g/kg de terre ; da, densité apparente ; h, épaisseur de l'horizon ou du sol exploité par les racines en mètre, F rapport du volume de terre fine sur le volume total contenant des cailloux. RUM est exprimé en mm ou en ou litres/m<sup>3</sup>.

Par exemple dans l'Arboretum, les données analytiques sont les suivantes: HCC - HPF = 150g/kg ; da = 1,45; h = 1m et F = 1 ; pour une fosse de 8 m<sup>3</sup>, le RUM est de 1800 litres environ.

Pour une consommation journalière de 50 litres, la réserve de la fosse s'épuise en 36 jours ; pour une consommation journalière de 10 litres, elle s'épuise en 180 jours. Avec une ETP jour de 4,5 mm par jour en moyenne en été, la réserve se vide en 50 jours environ.

Les Frênes du boulevard urbain Charles de Gaulle ont le plus souvent perdu leurs feuilles à partir de la mi-août, lorsque l'irrigation a été arrêtée. L'encaissant de la fosse de plantation est un remblai constitué de gros galets rhodaniens, il ne participe absolument pas à l'alimentation hydrique des arbres. Une solution a été proposée de creuser des puits verticaux remplis de terre pour conduire les racines vers la nappe phréatique. A défaut de prospection en profondeur des racines, les remontées d'eau capillaire ne peuvent être importante en hauteur et en quantité. Des expérimentations pourraient être mises en place sur cette application.

Ces calculs de consommation hydrique sont valables pour les Frênes de la CIL. Ils donnent des ordres de grandeur des quantités nécessaires à des arbres transplantés.

## 5 L'ÉVOLUTION DE LA CROISSANCE DES ARBRES : ÉTUDE DES PARTIES AÉRIENNE ET RACINAIRE

Le troisième thème d'étude concerne les arbres eux-mêmes. Les plantations suivies se trouvent sur les 5 secteurs paysagers déjà évoqués précédemment, mais aussi sur 2 autres. Le suivi de la partie aérienne des arbres s'est effectué de 1997 à 1998 sur l'ensemble des arbres plantés sur les 7 secteurs, soit 638 sujets appartenant à 27 espèces et l'alignement de 248 frênes blancs (*Fraxinus americana*). Puis jusqu'en 2011, l'effectif des arbres suivis a été réduit. Il comporte 28 espèces d'arbres sous différentes formes : spécimen, tige, forme libre, cépée, jeune plant avec érable, tilleul, bouleau, merisier, chêne, amélanchier, charme, cèdre, noisetier, hêtre, pin sylvestre, sorbier intermédiaire, frêne blanc. Les espèces les plus représentées sont le frêne blanc, *Fraxinus americana* (248 tiges), le hêtre, *Fagus sylvatica* (89 sujets), le chêne pédonculé, *Quercus robur* (65 sujets). Les autres espèces sont moins représentées, de 4 à 10 sujets. A part les jeunes plants qui ont été plantés en racines nues, les autres sujets ont été fournis en mottes (Pousse Conseil, 2014).

### 5.1 LA PARTIE AÉRIENNE

La méthode utilisée est la méthode de lecture morphologique des arbres, analyse architecturale proposée par F. Hallé et C. Edelin (UMR AMAP Montpellier – botanAnique et bioinforMatique de l'Architecture des Plantes). Elle permet de mettre en évidence le développement passé de l'arbre et de pronostiquer son évolution future la plus probable. Le diagnostic réalisé avec cette méthode permet d'estimer la longévité potentielle d'un sujet, ses dimensions maximales attendues, sa capacité de réaction à des actions de taille, ses aptitudes de croissance et de développement, (Pousse Conseil, 2014). Les pronostics se font au travers de l'étude de deux propriétés : l'âge ontogénique appelé aussi stade de développement et l'évolution de la vigueur de l'arbre ou dynamique de croissance. Six stades de développement sont généralement définis : juvénile, jeune adulte, adulte, mature, vieillissant et sénéscent. Sur les différents secteurs de la CIL les jeunes plants sont juvéniles, les tiges 20-25 sont juvéniles ou jeunes adultes et les spécimens (très gros sujets, de force > 50) sont jeunes adultes.

La dynamique de croissance est l'évolution dans le temps de la vigueur d'ensemble de l'arbre : la croissance de l'arbre estimée par le nombre et la longueur des pousses annuelles des rameaux ainsi que par leur distribution permet d'estimer si l'arbre pousse normalement ou si des contraintes s'exercent plus ou moins fortement. Des mesures de hauteur de l'arbre et de circonférence de tronc ont été effectuées ponctuellement. Sur les différents secteurs de la CIL, cette dynamique de croissance a été caractérisée par une évaluation visuelle de l'observateur contrôlée par des mesures directes.



Après un certain nombre de tests méthodologiques, des indicateurs pour évaluer la reprise aérienne des jeunes plantations ont été utilisés :

- la vigueur de l'allongement d'ensemble de la couronne et de son évolution, caractérisée par la longueur des pousses annuelles des tiges principales, le nombre de pousses allongées dans l'année, les dimensions du feuillage, l'importance de la ramification, l'intensité de la défeuillaison estivale, le grossissement des troncs.
- l'étendue et l'intensité de la dégradation des tiges de la couronne.
- les anomalies du feuillage : défaut de dimension, défeuillaison.
- la capacité des tiges maitresses à organiser la couronne.

La figure 12 (planche 1) montre les différentes voies de la reprise aérienne d'un arbre tige après arrachage et plantation (Pousse conseil, 2014).

Plusieurs facteurs de variation de la reprise ont été étudiés en 1998. L'étude des parties aériennes a montré que la reprise était en bonne voie pour 56% des sujets analysés et en mauvaise voie pour les autres. Il est à remarquer que sur la pelouse du triangle Interpol les arbres ont dépéri, alors que dans le Parc sud la reprise a été bonne. Les arbres de la pelouse du triangle Interpol sont plantés dans les fosses individuelles, alors que dans le parc Sud ce sont des fosses collectives.

La force de plantation initiale a été généralement un facteur défavorisant la reprise. En effet les baliveaux et les jeunes plants ont présentés une forte vigueur alors que les très gros sujets du parvis ont végété. L'effet de la force de plantation sur la reprise dépendrait principalement du nombre d'étapes culturales pratiquées en pépinière : plus les actions sur l'enracinement sont nombreuses, plus la reprise est difficile.

Les sujets plantés présentaient plusieurs formes : tiges, formes libres, cépées, etc. La forme du sujet n'a pas été un facteur explicatif de la reprise.

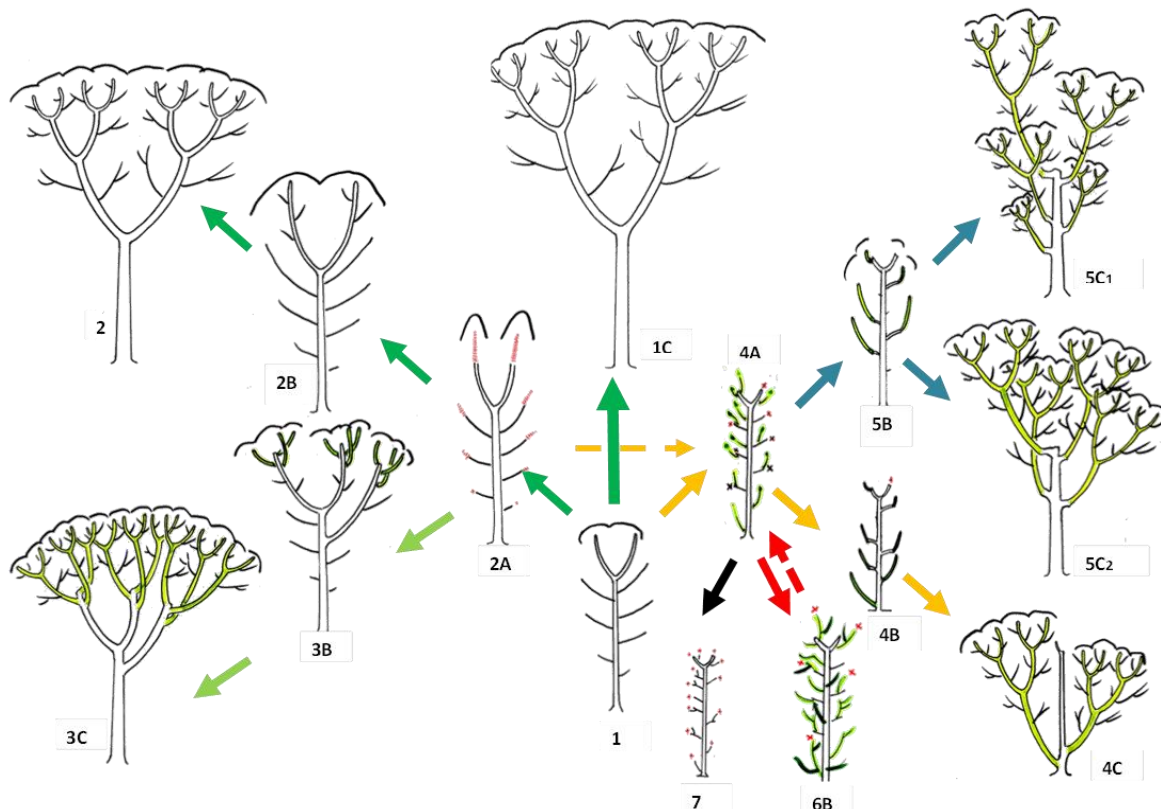


Figure 12: Les différentes voies de la reprise aérienne d'un arbre tige après arrachage et plantation. Les architectures des arbres à l'issue de ces voies. Les branches développées après arrachage sont surlignées en vert.

*Le jeune arbre (1) non arraché devient 1C. Arraché le jeune arbre (1) peut prendre 7 voies de développement possibles. Voies 2 et 3 : l'arrachage ne dégrade que très peu le sujet son architecture est normale (2) ou presque normale (3C) (Régénération conforme ou presque conforme). Voies 6 et 7 : l'arrachage dégrade fortement et durablement le sujet qui ne régénère pas. (6 : Alternance de réaction/dégradation – 7 mort) Voies 4 et 5 : les sujets sont coloniaux (BC, 5C2) ou presque (5C1), leurs nouvelles branches se développent comme des sujets indépendants, de manière non coordonnée (Régénération coloniale).*

Les observations effectuées jusqu'en 2011 ont permis de caractériser la pérennité de la reprise :

- les arbres qui étaient en difficultés de reprise en 1998 n'ont jamais récupéré ; suivant l'espèce et leur force, ils ont continué à se dégrader et pour certains cette dégradation a entraîné la mort. Les jeunes plants n'ont généralement pas survécu, les spécimens ont vivoté, les arbres de force moyenne après une phase de dégradation ont repris très lentement et incomplètement. La plupart de ces arbres en difficulté ont survécu jusqu'en 2011 malgré la canicule de 2003 et la sécheresse de 2004. Ces surfaces recouvertes de pelouses et de couvre-sol étaient arrosées et les arbres en ont profité.

Les diagnostics de non-reprise en 1998 étaient fiables.

- les arbres considérés comme repris en 1998 étaient vivants et non dépérissants en 2011, sauf erreurs culturales ou accidents.

Les diagnostics de reprise de la partie aérienne en 1998 étaient fiables.

Certains arbres d'une même espèce dans des conditions édaphiques identiques (fosse individuelle ou collective, sol continu) ont été suivis en 1998, 2011 et 2012. Les sujets ont été classés en fonction de la vigueur de l'allongement. Le classement varie d'une année sur l'autre :

- des merisiers, installés en fosse individuelle ont vu leur vigueur moyenne diminuer de 30% : par exemple, les deux sujets les plus vigoureux en 1998 sont devenus les moins vigoureux en 2011, et ceux de vigueur moyenne sont devenus plus vigoureux que les autres.
- des hêtres installés en sol continu sur un talus montrent en 2011 une couronne non déformée sans dépérissement et des tiges saines de vigueur normale. Les classements de vigueur des individus varient d'une année sur l'autre : les plus vigoureux en 1998 deviennent les moins vigoureux en 2011, certains conservent leur classement et d'autres deviennent les plus vigoureux.

Ces évolutions divergentes ont aussi été observées sur des chênes chevelus et sur des chênes pédonculés.

- des jeunes plants de hêtre et d'érable ont en moins de 10 ans rattrapés en diamètres, les tiges les moins vigoureuses de la même espèce.

Le diagnostic de reprise établi en 1998 trois ou quatre années après la transplantation a bien indiqué la poursuite ou la reprise du développement des arbres observés, mais sans pouvoir pronostiquer l'évolution de leur vigueur, de leur croissance et de leur grossissement.

## 5.2 LA PARTIE SOUTERRAINE

### ETAT DE LA REPRISE RACINAIRE

Les études racinaires sont nécessairement destructrices par l'ouverture d'excavation. Elles sont souvent liées à des besoins de gestion de l'espace vert (éclaircie de la population, aménagement varié) parfois elles ont été couplées aux descriptions pédologiques. Entre 1994 et 2011, 53 sujets appartenant à 11 espèces ont été étudiés. Trois méthodes d'étude des racines ont été utilisées.

- le comptage des racines sur des parois verticales situées à différentes distances du tronc (évaluation quantitative de la colonisation racinaire du sol, sa répartition et des obstacles à son développement). Il est couplé à une étude pédologique. Cette méthode ne détruit qu'une partie du système racinaire.
- l'excavation permet une étude sur la totalité du système racinaire.
- un test d'aspiration de la terre a été tenté, pour libérer le système racinaire ; il permet de remettre la terre après observation en conservant les racines en place.

Des comptages racinaires sur parois verticales grillagées de maille 10 cm ont été effectués en 1997 par V. Fradin sur deux frênes blancs (plantés en 1994 et 1996) et un érable plane (planté en 1995). Si le nombre de racines est peu important en profondeur, l'accroissement moyen des racines est de l'ordre de 40 cm par an. Les racines ont tendance à coloniser les horizons superficiels riches en compost. Ces observations ont été faites entre un et trois ans après la plantation ; les observations postérieures faites sur des excavations ont permis d'affiner ces premiers résultats.

Comme aucune marque ne permet d'identifier la croissance racinaire annuelle, les indicateurs de la reprise racinaire s'adressent à l'ensemble de la racine :

- la nature, la localisation, le nombre, la longueur et le diamètre
- le système racinaire à la plantation et son évolution
- les différentes tailles racinaires subies avant la plantation.

La figure 13 montre les différentes voies possibles de la reprise racinaire (Pousse conseil, 2014).

*1 Etat initial : Altération liée à l'arrachage ; 2a b Réaction ; 3 -4 Régénération plus ou moins complète.*

*Au centre (1, 2, 4a) la régénération conforme d'un enracinement après son arrachage.*

*En bas l'essentiel de la motte dépérit en profondeur (3b) et cet aléa peut être éventuellement compensé par la production de rejets remplaçant les parties manquantes sur le tronc (développement retardé).*

*En haut l'enracinement dépérit en surface et réagit partiellement en profondeur (3a). Ce dépérissement peut être compensé (4b) par la naissance de rejets remplaçant les parties manquantes sur le tronc (développement retardé).*

*L'enracinement reste totalement bloqué en réaction (2b) ou transitoirement après le dépérissement partiel (3c). Beaucoup d'enracinements (3c) montrent des états de reprise intermédiaire entre ces différentes voies.*

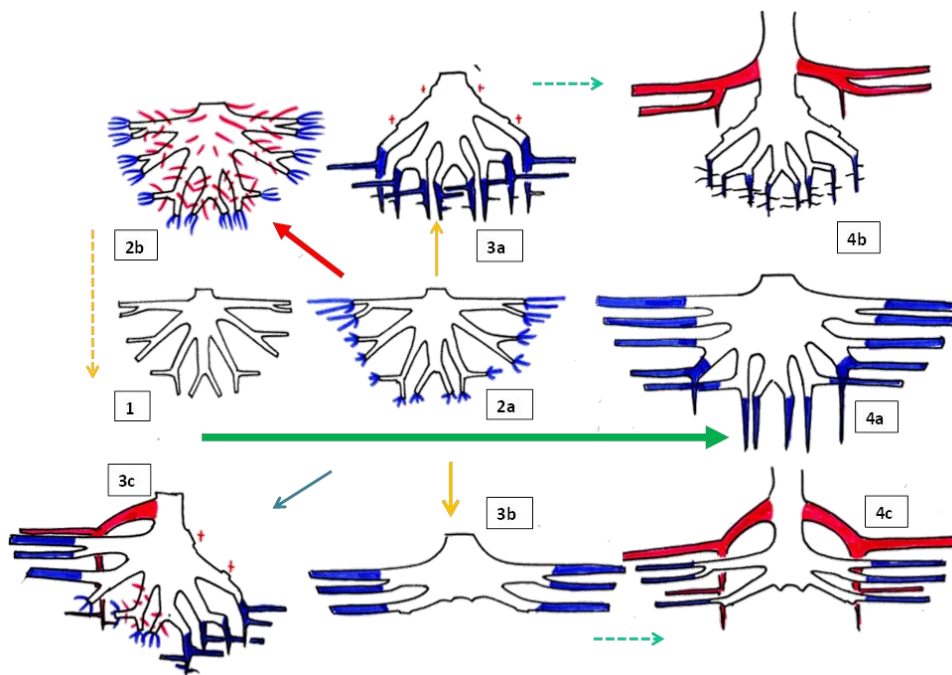


Figure 13 : Les différentes voies possibles de la reprise racinaire.

L'enracinement des 3 frênes suivis par tensiométrie pendant 2 ans a été observé en 2000 (Pousse Conseil, 2014). Celui planté en 10-12 montrait une amorce de régénération de l'enracinement (figure 14), par contre les 2 autres plantés en 20-25 montraient des défauts majeurs de reprise racinaire (figure 15) ainsi que des déficits de reprise aérienne ; en effet le développement ultérieur de nombreux rejets racinaires ne s'est pas produit (Pousse conseil 2014).

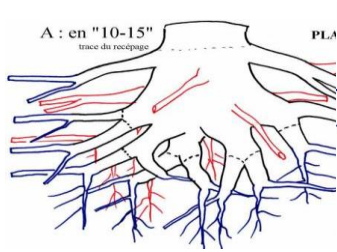


Figure 14 : Etat de la reprise racinaire en 2000 d'une tige plantée en 10-12 sur l'Arboretum

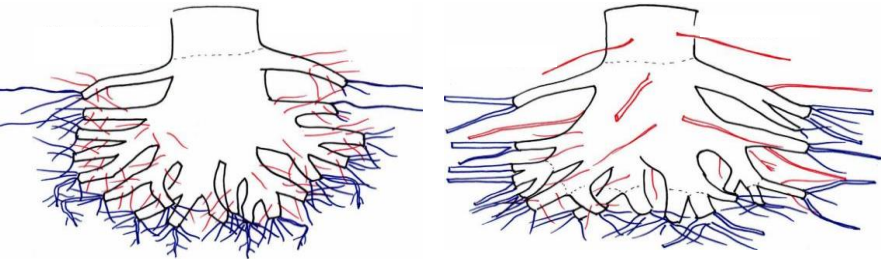


Figure 15 : Etat de la reprise racinaire en 2000 de tiges plantées en 20-25 sur la cité Internationale et suivi en tensiométrie (à gauche un sujet planté sur l'Arboretum à droite un sujet planté sur le Boulevard urbain)

Ces sujets ont une contre-plantation de plus que ceux analysés en pépinière. Noter le défaut de régénération de pivot sur le sujet du boulevard urbain et le déficit de reprise de l'enracinement en profondeur. La tige de l'arboretum présente des défauts inverses (déficit de reprise en surface et présence de pivots peu développés en profondeur). Seule la tige plantée en 10-12 sur l'Arboretum a été capable de régénérer efficacement les différents éléments de sa charpente en quantité (racine charpentière horizontale et pivots) à partir de ses plaies de tailles et de développer en quantité en amont de ces dernières des rejets venant renforcer l'enracinement.

L'enracinement des 2 frênes observés en 2011, 15 ans après la plantation, a montré un état stationnaire par rapport à ceux observé en 2000. Les plaies de taille sont nettement identifiables. Les rejets montrent un développement très limité (figure 16).

Des enracinements de jeunes plants de hêtre et d'érable, en sol continu sur un talus, ont été observés en 2011. Ils présentent de bonnes performances de reprise racinaire, de même qu'une tige de charme (figure 17).

Les sujets observés plantés en mottes présentaient 7 à 15 ans après la plantation des traces plus ou moins importantes des tailles racinaires de pépinière et des défauts de régénération dus aux contre-plantations.



Figure 16 : Reprise des Frênes en 2011 (photos Pousse conseil)

Les sujets dont les enracinement ont le mieux repris sont ceux des espèces comme le charme et l'érable qui sont connus pour leur enracinement superficiel.



Figure 17 : A gauche une tige de Charme et à droite un jeune plant d'érable parfaitement repris. (photos Pousse conseil)

Ces 2 sujets ont été prélevés sur le talus du triangle interpol.

En général, les observations ont montré que la régénération racinaire est meilleure dans la partie supérieure de la motte ; par contre dans la partie inférieure, elle est nulle à très faible, sans donner de véritables racines ligneuses.

Les principales difficultés de reprise du système racinaire sont :

- la régénération racinaire ne se fait pratiquement pas suivant le modèle naturel, les rejets sont de faible diamètre et colonisent un petit volume de sol,
- les contre-plantations en pépinières en créant des plaies peuvent permettre le développement de pourritures entraînant la mort des racines.
- le développement de rejets sur les racines superficielles de la motte, recréant une couronne racinaire de surface.

Sur le site de la cité internationale, les enracinements de 29 sujets plantés en motte ont été observés ; seuls 3 sujets montraient une véritable charpente racinaire de grand diamètre (5 à 11 cm) pouvant explorer un grand volume de sol. Les 26 autres présentaient une régénération racinaire très incomplète. Ils ont reconstitués des racines de faible diamètre (< 4 cm) et de croissance faible.

### **REPRISE RACINAIRE ET CONTRAINTES DE L'ENVIRONNEMENT**

La principale contrainte à la colonisation racinaire est la taille de la fosse de plantation et les caractéristiques physiques de l'encaissant. Les fosses unitaires de 8 m<sup>3</sup> et un encaissant composé de gros galets drainant sont des milieux qui restreignent le développement des racines. De même, dans les fosses collectives et les sols continus, des variations de profondeur peuvent intervenir sur le volume de sol disponible à l'enracinement.

## **5.3 CARACTÉRISATION DU PROCESSUS DE REPRISE DES ARBRES**

Les observations sur la cité internationale de Lyon, mais aussi sur d'autres sites, ont permis la caractérisation des composantes de la reprise. Elle se développe en trois phases successives : l'altération, la réaction et la régénération (Pousse conseil 2014).

### **LA PHASE D'ALTÉRATION**

Elle suit l'arrachage des sujets en pépinière par la destruction d'une partie de l'enracinement et par l'altération du houppier. Elle affecte la croissance des tiges et des racines, la quantité et la surface du feuillage, l'absorption par le chevelu racinaire. Sa durée est de quelques mois à quelques années après la transplantation selon l'état physiologique, les conditions de culture en pépinière, la quantité et la qualité de l'enracinement conservé.

### **LA PHASE DE RÉACTION**

Elle se développe lorsque l'altération est relativement forte et que le sujet est capable de réagir. Elle se traduit par le développement de rejets, la transformation morphologique de certaines tiges et racines, et le bouleversement des hiérarchies au niveau du houppier et de l'enracinement. Elle se manifeste généralement durant 1 à 5 ans et parfois 15 ans.

### **LA PHASE DE RÉGÉNÉRATION**

Pour se produire, le plant doit avoir récupéré ces capacités de croissance pendant la phase de réaction. Le développement et la croissance de l'arbre se réalise suivant le mode naturel de l'espèce. La flèche du houppier reprend son rôle dominant. Des racines charpentières se restaurent. La vigueur se porte dans les parties périphériques. Une différenciation morphologique et fonctionnelle des tiges et racines selon leur position structure l'individu. Sa durée est très variable de quelques mois à quelques années, ou peut ne jamais s'installer.

## 5.4 FACTEURS FAVORISANT LA REPRISE

### REPRISE AÉRIENNE

L'intensité de la reprise de la partie aérienne de l'arbre est reliée :

- à ses caractéristiques génétiques
- à son âge : un plant jeune a une forte capacité de reprise
- à la vigueur d'ensemble du plant acquise en pépinière

Le développement normal du plant est activé lorsque son architecture est hiérarchisée et lorsque les traces de la taille de formation peu importante.

### REPRISE RACINAIRE

Elle est conditionnée principalement par le diamètre de la section de la racine :

- **diamètre < 2 cm** : la plaie de coupe se referme rapidement ; le développement des rejets est rapide
- **diamètre > 5 cm** : des rejets nombreux apparaissent et se concurrencent, leur développement est bloqué, l'absorption étant leur seule fonction.
- **diamètre de 2 à 5 cm** : de nombreux rejets apparaissent, mais ils ne retrouvent pas les formes et fonction des portions amputées. Les traces de plaies restent visibles. Ceci se traduit en particulier par la perte des aptitudes d'ancrage et d'exploration des couches profondes du sol.

Les systèmes racinaires jeunes, équilibrés et peu mutilés se régénèrent rapidement et permettent une exploration verticale et horizontale d'un milieu favorable. Par contre un système racinaire mutilé présente un fort manque d'exploration et d'ancrage de l'arbre.

Le développement de nombreuses racines de petit diamètre avec une fonction d'absorption, en sortie de motte et dans la fosse de plantation n'est donc pas un critère fiable de reprise racinaire en mode normal et de développement des charpentières.

### RELATIONS ENTRE LA PARTIE AÉRIENNE ET L'ENRACINEMENT

La reprise de la croissance de l'arbre est en relation avec une reprise de la fonction d'absorption par des racines fines. Ces racines absorbantes permettent dans un premier temps l'alimentation hydro-minérale de l'arbre et le développement des rameaux et du feuillage. Les premiers rejets racinaires suffisent à alimenter les premières étapes de la croissance aérienne. La mauvaise régénération racinaire se fera sentir de façon différée sur la partie aérienne après la suppression de l'arrosage.

Le diagnostic de la partie aérienne devrait être capable de différencier le sujet en phase de réaction racinaire de celui en phase de régénération racinaire. Pour cela, le suivi des arbres est donc à réaliser sur plusieurs années et d'autant plus que la force de plantation est élevée.

## 5.5 ALIMENTATION HYDRIQUE

La transplantation des arbres s'accompagne d'un arrosage régulier, d'abord au niveau de la motte, puis dans la fosse de plantation. Les suivis tensiométriques l'ont montré et ont permis le déclenchement de l'irrigation avant que l'arbre entre en stress hydrique. Ils ont permis aussi de suivre la croissance des racines absorbantes et leur colonisation de la fosse. Cette méthode de suivi met en évidence le développement et la croissance des racines absorbantes, par contre elle ne renseigne pas sur l'organisation et l'architecture des racines charpentières. Cet arrosage est généralement limité à 3 ans et suppose ensuite que l'arbre soit capable de puiser l'eau nécessaire en dehors de la fosse. L'observation de la partie aérienne pendant au moins trois ans sans irrigation peut montrer que l'autonomie hydrique est acquise.

## 5.6 RECOMMANDATIONS POUR L'AMÉNAGEMENT ET LE SUIVI D'UNE PLANTATION

En conclusion, le facteur principal de reprise des sujets est leur état morphologique, physiologique, de vigueur, architectural au moment de l'arrachage et principalement celui du système racinaire. Si la reprise de l'enracinement est satisfaisante, la correction des houppiers est réalisable grâce à des tailles appropriées.

Le facteur principal de choix d'un sujet est la qualité de l'enracinement. Le conditionnement en motte ou en conteneurs ne permet plus d'appréhender le système racinaire et ses défauts éventuels et de pratiquer des tailles de correction. La demande de sujets en racines nues présente de nombreux avantages :

- enracinement plus important à l'arrachage
- appréciation visuelle de la qualité
- utilisation de végétaux plus jeunes reprenant plus facilement.

L'utilisation de gros sujets (force > 20) livrés en motte demande une technicité de plantation et de suivi plus rigoureuse. Ces arbres plusieurs fois contreplantés sont vulnérables au niveau de leur enracinement, qui plus est enfermé dans la motte.

Le système motte-fosse-encaissant présente des discontinuités entre les compartiments qui sont autant de points de blocage de la colonisation racinaire qu'il est nécessaire de prendre en compte et si possible mettre en cohérence lors de la mise en place du sol.

L'observation de la vigueur de la partie aérienne pour évaluer la reprise et en particulier celle du système racinaire est liée d'une part aux conditions édaphiques de la fosse et d'autre part au parcours cultural en pépinière.

## 6 CONCLUSIONS

Le programme Sciencil a permis des avancées techniques sur les trois thèmes de départ :

- le sol et ses qualités agronomiques
- l'alimentation hydrique
- la reprise des arbres transplantés

### 6.1 LE SOL

Les conditions de mise en place des sols reconstitués et le contrôle de leur qualité ont été précisées. Les propriétés agronomiques d'un sol fertile assurant un bon enracinement sont mieux caractérisées.

Le suivi des sols reconstitués et la caractérisation de leurs propriétés a permis de proposer un sol fertile pour accueillir des gros sujets.

### 6.2 L'ALIMENTATION HYDRIQUE

Les suivis tensiométriques permettent de distribuer à l'arbre transplanté l'eau nécessaire aux premières étapes de la reprise. Ceux-ci allient confort hydrique de l'arbre et économie de l'eau apportée.



## 6.3 LA REPRISE APRÈS TRANSPLANTATION

Les études réalisées ont montré la complexité de la reprise. Celle-ci dépend principalement de la qualité de l'enracinement au moment de l'arrachage en pépinière. Les conditions adéquates de sols et d'apport d'eau sont des conditions nécessaires à une bonne reprise. Mais cette dernière ne s'effectuera que si l'arbre est en mesure de développer la phase de régénération des parties racinaires et aériennes. La durée de la régénération peut être longue et souvent supérieure aux trois années qui actuellement sont prévues pour une aide à l'alimentation hydrique. En règle générale, la végétation jeune montre une reprise rapide alors que les gros sujets stagnent. Ces jeunes sujets rattrapent rapidement en taille les gros sujets.

## 6.4 LES OBJECTIFS RECHERCHÉS

Les aménageurs paysagers peuvent avoir divers objectifs qui demandent différents niveaux de reprise des arbres :

- Une reprise complète où l'arbre devient autonome en particulier pour l'eau. Son développement est conforme à celui de l'espèce. L'arbre planté pourra atteindre des dimensions et une longévité comparables à celles des sujets de son espèce.
- Une reprise partielle où l'arbre peut survivre et devenir autonome pour l'eau mais ses dimensions et sa longévité seront bien inférieures à celles de son espèce.
- Une reprise minimale lorsque l'arbre est un décor pour faire bon effet pendant quelques mois à quelques années.

## 6.5 LE BILAN ET LA VISION DU GESTIONNAIRE DES ARBRES DU GRAND LYON, FRÉDÉRIC SÉGUR

L'organisation du suivi scientifique de ces aménagements a rassemblé autour des objectifs d'acquisition de connaissances l'ensemble des acteurs du projet : collectivités et aménageurs, équipes de maîtrise d'œuvre, entreprises et pépinières, enseignants et chercheurs. C'est la somme des investissements individuels de l'ensemble de ces acteurs, la mutualisation de moyens et d'énergies, qui ont permis le démarrage de ce projet d'observation scientifique et un suivi sur plus de 15 ans.

Si la médiatisation des résultats de ce programme expérimental n'a pas vraiment pu être organisée par manque de moyens financiers et de soutien politique, les retombées directes pour les participants à la démarche ont été considérables. En matière de conception des plantations urbaines, l'analyse critique des innovations techniques du projet ont permis de faire sensiblement évoluer les exigences techniques et les cahiers de charges opérationnels (reconstitution de sols fertiles, critères de qualités des végétaux de pépinière, etc.). En matière de gestion, les apports pratiques ont permis dès la fin des années 90 de faire évoluer des pratiques : notamment en réalisation et suivi de l'arrosage avec généralisation de l'utilisation des techniques de tensiométrie, ou pour la taille des végétaux à la plantation puis en formation. Enfin des sessions de tout au long de cette période d'observations, des séminaires d'orientation et d'échanges, des sessions de formation en direction du personnel de terrain, des entreprises comme des collectivités, ont permis d'associer largement les acteurs locaux à la démarche, de faciliter le partage des connaissances. Ces actions ont abouti à une véritable évolution des pratiques sur les projets de l'agglomération lyonnaise.

Plus de 20 ans après le lancement du programme Sciencil, on peut légitimement considérer que les connaissances acquises n'ont rien de révolutionnaire ! Mais justement, ces connaissances sont depuis passées de manière directe ou indirecte dans la pratique. C'était précisément l'objectif initial de ce projet : créer une dynamique de capitalisation et de diffusion de connaissances et de bonnes pratiques en matière de paysage urbain. Cette dynamique ne peut s'accompagner que de beaucoup d'humilité, car ce n'est pas d'une révolution instantanée des savoirs dont il s'agit, mais d'une lente construction, brique par brique d'une connaissance en évolution

permanente. Ce n'est pas d'un savoir au bénéfice d'une petite élite dont il s'agit, mais d'une connaissance partagée et mise en œuvre par le plus grand nombre. Et je suis heureux de constater que cette mutualisation des connaissances - philosophie à l'origine du projet Sciencil - se poursuit vers le plus grand nombre par un rayonnement national et même international au travers de l'action menée par Plante & Cité.

## 7 DOCUMENTS PRODUITS DANS LE CADRE DE SCIENCIL

### MÉMOIRES ET RAPPORTS ÉTUDIANTS

Fayet H. – 1994 – les plantations des espaces verts de la cité internationale de Lyon : caractérisation des arbres de pépinières, mémoire fin d'étude ENITHP

Michez M. - 1994 - Caractérisation et évolution des sols et des plantations de la cité internationale de Lyon, mémoire fin d'étude ENITHP.

Combescot I., 1995. Les plantations des espaces verts de la Cité Internationale de Lyon : le pénétromètre. Rapport de stage de deuxième année, ENITHP-Angers, 27p.

Filoque J. – 1995 – caractérisation de la crise de transplantation des arbres, mémoire fin d'étude ENITHP.

Maarouf A., 1995. Les plantations des espaces verts de la Cité Internationale de Lyon: essai de caractérisation du fonctionnement et de l'alimentation hydrique des arbres après transplantation. Mémoire de fin d'étude, Université du Liban, Beyrouth, 46p.

Pailloux H., 1995. Caractérisations physiques, mécaniques et hydriques des Anthrosols reconstitués de la Cité Internationale de Lyon. Stage de maîtrise des Sciences et Techniques, Université Bordeaux III, 37p.

Barre S., 1996. Observatoire scientifique Sciencil, des plantations des espaces verts de la cité internationale de Lyon, Rapport de stage de 2ème année ENITHP, Angers.

Delcambre A., 1996. Les plantations des espaces verts de la cité internationale: suivi et contrôle des conditions hydriques des anthrosols reconstitués et de l'alimentation hydrique après transplantation des gros sujets. Mémoire de fin d'étude ENITHP Angers, 52p

Fradin V., 1997. Les anthrosols reconstitués des espaces verts de la Cité Internationale de Lyon. Etude des propriétés physiques et de leurs corrélations. Mémoire de fin d'étude ENITHP. Angers, 53 p.

Madelaine O., 1997. Les plantations des espaces verts de la Cité Internationale de Lyon: Les transferts hydriques du sol à l'arbre après transplantation de jeunes frênes américains. Mémoire de fin d'étude ENITHP. Angers, 47p.

Debayle C., 1998. Relation entre les propriétés mécaniques et les sondages pénétrométriques sur les anthrosols reconstitués de la Cité Internationale de Lyon., Rapport de stage de 2ème année, IUP Bordeaux.

### ARTICLES

Maarouf A. & Rossignol JP., 1996. Control of hydric soil conditions and hydric supply for large tree transplantations in landscaped areas : the exemple of the international centre of Lyons (France). Acta Horticulturae, 449, pp 359-366.

Maarouf A. & Rossignol JP., 1996. Contrôle des conditions hydriques de sols et de l'alimentation en eau de gros sujets après transplantation dans les espaces verts de la cité internationale de LYON. Paysages Actualités, , 3 p.

Delcambre A. & Rossignol J.P., 1997. Caractérisation d'un stress hydrique ménagé sur des frênes blancs (*Fraxinus americana*) en espaces verts. Int. ISHS Symp. "La Santé de l'arbre urbain" 22-26 Sept. 1997, Paris. Acta Horticulturae 496, pp353-360

Beudet-Vidal L., Fradin V. & Rossignol J.P., 1998. Study of the macro-porosity of reconstituted anthropic soils by image analysis. *Soil & Tillage Research*. 47, 173-179.

Beudet-Vidal L., Fradin V. & Rossignol J.P., 1998. Etude de la macroporosité d'anthroposols reconstitués par analyse d'image. poster, 6ème Congrès Mondial de Science du Sol, 20-26 VIII 1998, Montpellier

Rossignol J.P., Rivière L.M., Sintès G., 1999, Water supply for large tree transplantation in landscaped areas, *Urban Greening and Landscape Architecture*, Copenhague, 23-25 juin 1999

Rossignol J.P., Vidal-Beudet L., Debayle C., 1999, control and follow up properties of reconstituted soils for urban trees in lines and in copses, poster in *Urban Greening and Landscape Architecture*, Copenhague, 23-25 juin 1999

Rossignol J.P., 1996. Contrôle et suivi de qualité des propriétés physiques des "Anthroposols reconstitués" dans les espaces verts des villes. Exemple de la cité internationale de Lyon, Actes des 5ème journées Nationales de l'Étude des Sols, Rennes 1996. Eds WALTER C. et CHEVERRY C, 2pp.

Rossignol J.P., 1999, caractérisation des sols reconstitués, colloque UNEP, le sol support de nos plantations, 2 juin 1999, Paris.

Rossignol J.P., 2001. The reconstituted Anthroposols for landscaped areas : morphological characteristics and physicals properties. *Soil Anthropization. Proceedings, VI international workshop Bratislava, Slovakia, Jaroslava Sobocká (ed).*

Rossignol J.P., 2000, Characterisation, control and follow up of the quality of the physical properties of reconstituted anthropogenic soils for green areas, poster présenté au international working group of urban, industrial, traffic and mining sites of IUSS-UISS, Essen 12-18 juillet 2000

Rossignol J.P., 2001. The reconstituted Anthroposols for landscaped areas : morphological characteristics and physicals properties. *Soil Anthropization. Proceedings, VI international workshop Bratislava, Slovakia, Jaroslava Sobocká (ed).* texte intégral)

Rossignol J.P., Debayle C, 2002 : relationships between mechanical properties, penetration resistance and bulk density in reconstituted Anthroposols, 8p. *Proceedings, 17th world congress of soil science, Bangkok, Thailand, CD-rom UISS.*

## AUTRES DOCUMENTS

Fradin V. & Rossignol J.P, 1997, cartes des sols, CIL, (profondeur, origine des matériaux et conditions de mise en place) carte des densités apparentes sur deux profondeurs (0-30 et 30-60)

Fradin V, 1997, interprétation des analyses chimiques et granulométriques réalisées en 1997

Fradin V., 1997, étude des profils racinaires décrits en 1997

Chatelain-Gibert A.F., 1997, système d'information et de documentation Sciencil

Végétude, 1994: Sciencil, rapport de synthèse

Sol Paysage, 1995 : Sciencil, rapport de synthèse

Sol Paysage, 1997 : Sciencil, rapport de synthèse 1996

Sol Paysage, 1998 : Sciencil 97, rapport de synthèse

Rosignol J.P., 2003 : Caractérisation de sols de la bande boisée de la cité internationale de Lyon en novembre 2002, 10p., INH Angers.

Sol Paysage, 2013 : Sciencil, synthèse thématique, les sols de la CIL, 32p., Plante & Cité.

Hydrasol, 2013 : Sciencil, synthèse thématique, l'eau et les transferts hydriques, 30p., Plante & Cité.

Pousse conseil : 2014 : Sciencil, synthèse thématique, la reprise des plantations de la Cité Internationale de Lyon, 28p., Plante & Cité.