Plante&Cité
Ingénierie de la nature en ville
Center for landscape and urban horticulture

17/07/2017

SCIENCIL : OBSERVATOIRE DE L'ARBRE URBAIN SUR LA CITE INTERNATIONALE DE LYON : REPRISE DES ARBRES – RACINES ET TIGES

[Compte-rendu d'étude]

GRANDLYON communauté urbaine
Pousse conseil
Avec le soutien financier de Val'hor Les professionnels du végétal

Plante&Cité
Ingénierie de la nature en ville
Center for landscape and urban horticulture

TITRE :

Sciencil : Observatoire de l'arbre urbain sur la Cité Internationale de Lyon – Synthèse thématique : racines et partie aérienne

AUTEUR :

Claire ATGER, *Pousse Conseil*, Pascal GENOYER, *Pousse Conseil*

RELECTEUR :

Olivier DAMAS, Gilles GALOPIN, Thierry AMEGLIO, Caroline LOHOU

THEMATIQUES :

Agronomie - Sols urbains - Conduite des végétaux

MOTS-CLES :

Eau, arrosage, arbres, reconstitution des sols, agro-pédologie, diagnostic aérien, diagnostic racinaire, morphogénèse aérienne et racinaire, tensiométrie, pédogénèse, diagnostic

RESUME :

SCIENCIL est un programme de recherche-développement animé depuis 1993 par l'Unité VIAP de la Communauté Urbaine de Lyon avec l'aide des villes de Lyon et Villeurbanne et de la SEM de la Cité Internationale. SCIENCIL a réuni chercheurs, professionnels des secteurs public et privé avec l'objectif de créer des outils de maîtrise de la qualité de réalisation des aménagements paysagers. Les principaux contributeurs aux études sont des organismes publics de formation et de recherche (INH, INRA, CNRS, Université de Montpellier et des bureaux d'études d'ingénierie du paysage - Végétude, Sol Paysage, Hydrasol, Pousse-Conseil). Depuis 2000, les bureaux d'études complètent ponctuellement le corps des données et résultats obtenus de 1994 à 1998. Les études ont été conduites sur « l'Arboratoire » de la « Cité Internationale de Lyon » nouvellement créée sur les berges du Rhône à Lyon.

La recherche-développement a porté sur 3 thématiques principales :

- les sols reconstitués,
- les transferts hydriques sol/plante pour rationaliser l'arrosage,
- le développement et la croissance des arbres avant et après plantation sur site.

Plante&Cité
Ingénierie de la nature en ville
Center for landscape and urban horticulture

SOMMAIRE

1 CONTEXTE 6

1.1 SCIENCIL 6

1.2 CONTEXTE ET QUESTIONS POSÉES EN ARCHITECTURE VÉGÉTALE AU DÉMARRAGE DE SCIENCIL 6

2 MATÉRIEL, SITES, MÉTHODE ET LIMITE DES ÉTUDES 7

2.1 SITE D'ÉTUDE 7

2.2 MATÉRIEL VÉGÉTAL 8

2.3 MÉTHODE D'ÉCHANTILLONNAGE RACINAIRE 8

2.4 METHODE DE DIAGNOSTIC DE LA REPRISE DES ARBRES 9

2.4.1 Principe méthodologique 9

2.4.2 Age ontogénique et séquence des architectures de référence de l'espèce 9

2.4.3 La dynamique de croissance de l'arbre 10

2.5 LES CRITÈRES D'ÉVALUATION DE L'ÉTAT DE LA REPRISE MIS AU POINT SUR LA CITÉ INTERNATIONALE 10

2.5.1 Les indicateurs de la reprise aérienne 10

2.5.2 Les indicateurs de la reprise racinaire 11

2.5.3 Les indicateurs de la reprise d'ensemble 11

2.6 LES PARTICULARITÉS DES ARBRES SORTANT DE PÉPINIÈRE 13

2.6.1 Partie aérienne 13

2.6.2 Partie racinaire 13

2.6.3 Particularités d'ensemble du plant 14

2.7 LIMITES ET PROLONGEMENT DES ÉTUDES 14

2.7.1 Limite de l'échantillon végétal 14

2.7.2 Indicateurs de la reprise : limites et test en cours 15

3 RÉSULTATS : PARTICULARITÉS DE LA REPRISE SUR LA CITÉ INTERNATIONALE 17

3.1 ETAT DE LA REPRISE EN 1998 17

3.2 FACTEURS DE VARIATIONS DE LA REPRISE EN 1998 17

3.2.1 Effet site 17

3.2.2 Effet de la force à la plantation 17

3.2.3 Effet de la forme horticole à la plantation 18

3.3 PÉRENNITÉ DE LA REPRISE 18

3.3.1 Evolution des arbres initialement en défaut de reprise 18

3.3.2 Evolution des arbres considérés comme repris initialement 19

3.4 ETAT DE LA REPRISE RACINAIRE 20

3.4.1 Etat de la reprise racinaire des arbres observés 20

3.5 PERFORMANCE DE LA REPRISE ET CONTRAINTES DE L'ENVIRONNEMENT DE PLANTATION 24

3.5.1 Variabilité des volumes de sol reconstitué et exploitable par les racines. 25

3.5.2 Diversité des profondeurs réelles au regard des préconisations initiales (150 cm de profondeur) 26

3.5.3 Stratification des sols reconstitués 26

3.6 CORRÉLATION ENTRE REPRISE RACINAIRE ET REPRISE AÉRIENNE 26

3.6.1 Culture dans un environnement favorable 27

3.6.2 Culture dans un environnement contraignant 27

3.6.3 Hypothèse sur les corrélations entre reprise aérienne et reprise racinaire de sujets transplantés 28

4 BILAN DE L'ÉTUDE : CARACTÉRISATION DU PROCESSUS DE REPRISE DES ARBRES 29

4.1 LA REPRISE APRÈS TRANSPLANTATION : PROPOSITION DE DÉFINITION 29

4.2 LES COMPOSANTES DE LA REPRISE 29

4.2.1 La phase d'altération (planche 1 fig2A ; planche 2) 29

4.2.2 La phase de réaction (planche 1 fig 4A , 6B et 3B ; planche 2) 30

4.2.3 La phase de régénération (planche 1 fig 2B, 2C, 3C, 5C1; planche 2) 30

4.3 QUALITÉS DES PLANTS ET DE L'ENVIRONNEMENT FAVORISANT LA REPRISE 31

4.3.1 Reprise aérienne 31

4.3.2 Reprise racinaire 31

4.4 VERS UNE TYPOLOGIE DES FORMES DE REPRISE 33
4.4.1 Forme de reprise aérienne 33
4.4.2 Forme de la reprise racinaire 33
4.5 UTILITÉ ET LIMITES DU DIAGNOSTIC DE LA REPRISE AÉRIENNE – AUTONOMIE HYDRIQUE ET CAPACITÉS DE GRANDISSEMENT 35
4.5.1 Limite n°1 au diagnostic de la reprise : autonomie hydrique 35
4.5.2 Limite n°2 au diagnostic de la reprise : espérance de grandissement et grossissement de l'arbre 35
4.6 RECOMMANDATIONS AUX MAITRES D'OUVRAGE ET MAITRES D'ŒUVRE D'UNE JEUNE PLANTATION 35

1 CONTEXTE

1.1 SCIENCIL

SCIENCIL est un programme de recherche-développement animé depuis 1993 par l'Unité VIAP de la Communauté Urbaine de Lyon avec l'aide des villes de Lyon et Villeurbanne et de la SEM de la Cité Internationale. SCIENCIL a réuni chercheurs, professionnels des secteurs public et privé avec l'objectif de créer des outils de maîtrise de la qualité de réalisation des aménagements paysagers. Les principaux contributeurs aux études sont des organismes publics de formation et de recherche (INH, INRA, CNRS, Université de Montpellier et des bureaux d'études d'ingénierie du paysage - Végétude, Sol Paysage, Hydrasol, Pousse-Conseil). Depuis 2000, les bureaux d'études complètent ponctuellement le corps des données et résultats obtenus de 1994 à 1998. Les études ont été conduites sur « l'Arboratoire » de la « Cité Internationale de Lyon » nouvellement créée sur les berges du Rhône à Lyon.

La recherche-développement a porté sur 3 thématiques principales :

- les sols reconstitués,
- les transferts hydriques sol/plante pour rationaliser l'arrosage,
- le développement et la croissance des arbres avant et après plantation sur site.

1.2 CONTEXTE ET QUESTIONS POSÉES EN ARCHITECTURE VÉGÉTALE AU DÉMARRAGE DE SCIENCIL

Les difficultés de la culture d'arbres en milieu urbain tiennent aux contraintes culturales de l'environnement urbain et aux particularités acquises par les arbres au cours de leur multiplication puis de leur élevage en pépinière. Les objectifs de la Maitrise d'ouvrage à l'origine de SCIENCIL étaient d'améliorer les possibilités d'évaluer (i) la qualité de la fourniture végétale en pépinière, (ii) l'intensité de la crise de transplantation et (iii) la performance de la reprise.

Les interrogations sur la qualité de la fourniture végétale étaient les suivantes :

- **Sur les conséquences du parcours en pépinière**
  - › Quel est l'impact des pratiques culturales appliquées en pépinières (arrachage/replantation/taille de formation) sur la qualité de la fourniture végétale ? Certaines propriétés de l'arbre produit en pépinière sont-elles pérennes ou transitoires ? Quelles sont les conséquences de la succession des différentes étapes de production sur le potentiel de reprise des arbres ? Quels sont les paramètres à prendre en compte pour établir un diagnostic des qualités ou défauts qui en résultent ? Les critères utilisés sont-ils utiles, suffisants, spécifiques ou généralisables ?

- **Sur la transplantation et la crise de transplantation**
  - › Quelles sont les conséquences sur l'arbre de sa transplantation de la pépinière vers l'environnement urbain ? Comment caractériser la crise de transplantation ? Quels sont les évènements qui attestent de la sortie de cette crise ? Comment lire la reprise ? Qu'en attendre ?

- **Sur la reprise après transplantation**
  - › Qu'est-ce que la reprise ? Quels sont les critères d'évaluation de sa performance (étapes/amplitude de la croissance et du développement des tiges et racines à attendre) ? Quels sont les facteurs déterminant les variations de sa performance ? Quand et sur quels critères considérer qu'un arbre a repris ? Quand en exiger le changement ? Quelle reprise exiger à l'échelle d'un arbre, d'un ensemble arboré ?

- **Sur les paramètres modulant la performance de la reprise**
  - › Quel sont les impacts de l'environnement urbain et des pratiques culturales (qualité/volume des sols et des ressources hydriques) sur la qualité de la reprise (ampleur des processus de croissance et développement à attendre au cours des premières années après plantation selon l'association espèce - âge - parcours de production en pépinière - environnement et soins culturaux appliqués sur site) ?

Avant les années 1990 l'absence de signes manifestes de dégradation de la couronne était le principal indicateur pris en compte pour juger de la reprise. En Europe, les outils indicateurs précisément étalonnés étaient embryonnaires. La littérature scientifique fournissait des éléments de réponse limités et difficiles à exploiter lors de plantation de gros sujets en milieu urbain. Les travaux de morphologie végétale conduits au sein du programme SCIENCIL ont amélioré notre connaissance du phénomène de reprise et créé des outils d'évaluation et de contrôle qualité utilisés lors des opérations de plantations ornementales.

2 MATÉRIEL, SITES, MÉTHODE ET LIMITE DES ÉTUDES

2.1 SITE D'ÉTUDE

Les arbres étudiés sont répartis sur 7 ensembles paysagers parfois divisés en sous unités (banquettes, terre-plein central/trottoir ou pelouse/talus) (fig 1). Les plus grands sites sont la Bande Boisée (BB 302 sujets), le Triangle Interpol (TI 167 sujets dont 66 jeunes plants), le Parc Sud (PS 236 sujets dont 63 jeunes plants), le quai Charles de Gaulle et son alignement simple de frênes blancs. Les sites plus modestes sont le quai A. Lignon (AL 10 merisiers et hêtres hauts de tige et de forme libre), les Douves (DO), la Rue Intérieure (RI 9 et 18 cépées de bouleaux).

L'environnement des arbres et leur dispositif de culture sont très variés en raison de :

- la diversité des qualités, volumes et profondeurs des sols de plantation : fosse unitaire, fosse collective talus continu, terre-plein central (voir rapport sur les sols)
- la nature et les variations de profondeur des sols entourant les fosses de plantation (chaussée, trottoir minéralisé, parvis, pelouse sur 40 cm de sol, talus végétalisé de 70 à 140 cm de profondeur etc.)
- la présence non généralisée d'une couverture végétale basse amortissant les variations de température, d'hygrométrie, mais concurrençant aussi les arbres
- des défauts d'irrigation subis par certains sujets dans les premières années de culture ou a contrario la persistance de l'arrosage des couvre-sol jusqu'à ce jour.

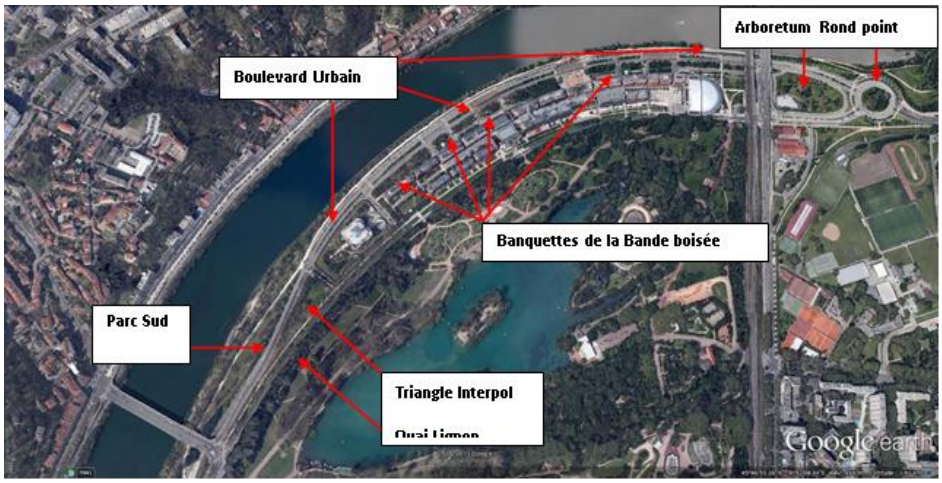


Fig 1 : Les ensembles paysagers de la Cité Internationale

2.2 MATÉRIEL VÉGÉTAL

L'étude de la reprise aérienne a couvert 638 sujets appartenant à 28 espèces d'arbres et différentes formes horticoles[1] : 8 érables, 4 tilleuls, 2 bouleaux, 2 merisiers, 2 chênes, l'Amélanchier de Lamarck[2], le charme, le cèdre de l'Atlas, le noisetier de Byzance, le hêtre, le charme houblon, l'arbre de fer, le pin sylvestre, le sorbier intermédiaire, le frêne blanc. Les espèces les mieux représentées sont le frêne blanc (248 tiges exclusivement représentées en alignement de bord de voirie sur le quai Charles de Gaulle), et hors quai Charles de Gaulle, le hêtre (89 sujets) planté sur les 3 grands sites sous 4 formes différentes puis le chêne pédonculé (65 sujets). Les autres essences sont moins représentées (de 4 à 40 sujets environ) parfois sous une seule forme ou sur un seul site.

Les études racinaires ont couvert 11 espèces et 53 sujets. Les deux espèces les plus représentées et les plus analysées sont le Frêne américain (26 sujets) défini à l'origine du chantier comme l'objet privilégié d'étude racinaire puis le Hêtre (8 sujets) le mieux représenté sur l'ensemble du site. Sur ces 53 sujets :

- 21 ont été analysés en pépinière (dont 18 frênes américains), 32 sur site de plantation.
- 40 ont été excavés, 13 ont été observés sur profil.
- 16 analysés ont fait l'objet de diagnostics couplés (racine/tige et/ou racine/sol).

Exceptions faites du cas de 3 jeunes plants, tous les enracinements analysés étaient conditionnés à l'origine en motte.

Les études ont été conduites selon plusieurs phases :

- Une phase initiale de tests méthodologiques (1995-1997) en démarrage de chantier
- Une phase de mise en œuvre exhaustive du diagnostic architectural opérationnel sur l'ensemble du site (1998-2000) avec test de l'extension de la méthode à l'enracinement (2000)
- Une phase de collecte ponctuelle de données postérieure au terme du chantier (2002-2011).

2.3 MÉTHODE D'ÉCHANTILLONNAGE RACINAIRE

Trois méthodes d'approche des racines ont été utilisées :

- Le profil racinaire, partiellement destructeur, permet de caractériser sur une paroi creusée à la pelle mécanique la performance d'occupation du sol par les racines à différents niveaux de profondeur et distances du tronc. Cette étude est généralement conduite en parallèle du diagnostic pédologique. Elle permet de déceler les différentes catégories racinaires en présence sur le profil et les limites de colonisation des sols par les racines.
- L'excavation, destructrice, extrait la motte racinaire et ses rejets du sol à la pelle mécanique pour une analyse approfondie de l'état de l'enracinement et la définition du parcours cultural de l'arbre
- L'aspiration à l'aide d'une excavatrice ou camion aspirateur permet de retirer les particules de sol pour une observation des enracinements en place.

[1] Forme = Spécimens, tige, forme libre, cépée, jeune plant. Le dispositif comprenait à l'origine plus de 200 tiges, une centaine de formes libre et entre 100 et 200 cent cépées. Force = Circonférence de la tige à 1m de haut allant de plus de 40 cm pour les spécimens à moins de 1cm pour les jeunes plants.

[2] Cette espèce est un buisson arbustif plutôt qu'un arbre tige.

2.4 METHODE DE DIAGNOSTIC DE LA REPRISE DES ARBRES

2.4.1 PRINCIPE MÉTHODOLOGIQUE

En préalable des diagnostics de reprise par l'analyse architecturale, Filoque (1995) a éprouvé l'hypothèse de l'existence d'un « rameau de référence » indicateur de la reprise d'ensemble du houppier. Parallèlement, en complément du suivi tensiométrique des transferts hydriques (voir rapport Hydrasol), Fayet (1994) et Filoque (1995) ont approché l'état de développement de l'enracinement avant et après plantation sur site par l'observation :

- des racines laissées dans le sol par les arbres après leur arrachage en pépinière (Fayet 1994)
- des profils d'enracinement développé par les arbres suivis en tensiométrie sur site (Filoque 1995).

Non fructueuses pour caractériser la reprise, ces deux approches ont été abandonnées pour privilégier la prise en compte de l'arbre dans son intégralité (ensemble du houppier et l'enracinement). A partir de 1997 SCIENCIL a testé les possibilités d'étendre l'analyse architecturale[3], méthode scientifique de lecture morphologique du développement des arbres, au diagnostic de reprise de l'arbre d'ornement. Ce test a été étendu à l'enracinement à partir des années 2000.

Le diagnostic architectural permet d'estimer la longévité potentielle du sujet, ses dimensions maximales attendues, sa capacité de réaction à des actions de taille, ses aptitudes de croissance et de développement à partir de deux données primordiales pour le pronostic : (i) le stade de développement ou âge ontogénique du sujet (ii) la dynamique de croissance ou évolution de la vigueur d'ensemble de l'arbre au cours du temps.

C'est la totalité des tiges de la couronne et les gammes de variation de vigueur de chacune des catégories qu'elles représentent qui ont été prises en compte pour retracer l'histoire du développement antérieur de l'arbre et pronostiquer son évolution future la plus probable[4].

2.4.2 AGE ONTOGÉNIQUE ET SÉQUENCE DES ARCHITECTURES DE RÉFÉRENCE DE L'ESPÈCE

Les travaux de l'école d'architecture de Montpellier ont démontré que l'architecture d'ensemble de l'arbre, résultat de son développement depuis sa germination, reflète son âge ontogénique.

Ainsi chaque sujet peut être placé au sein d'une série ordonnée d'architectures ou d'états structuraux successifs aussi bien aériens que racinaires. Cette série d'états constitue la séquence de développement de référence de l'espèce généralement divisée en 6 phases, soit 6 états structuraux spécifiques correspondants : juvénile, jeune adulte, adulte, mature, vieillissant et sénescent.

Sur le site de la CIL, les sujets ont été plantés à 2 phases de leur développement ou états ontogénique aérien :

- la phase « juvénile » pour l'ensemble des jeunes plants et une partie des tiges 20-25
- la phase « jeune adulte » pour le reste des tiges et l'ensemble des spécimens.

En raison de l'approche racinaire initialement choisie, les stades de développement racinaires n'ont pas été caractérisés avant plantation.

---

[3] L'analyse architecturale a été initiée à l'Université de Montpellier 2 par F. Hallé et C. Edelin.

2.4.3 LA DYNAMIQUE DE CROISSANCE DE L'ARBRE.

Les tests méthodologiques conduits sur la CIL ont montré que les évolutions de la vigueur et de sa répartition dans la couronne sont des critères fiables, fidèles et performants pour caractériser la reprise aérienne :

- **La vigueur de l'allongement d'ensemble** est caractérisée par le nombre et la longueur des pousses annuelles des tiges principales et des rejets éventuels.
- **La répartition spatiale de la vigueur** est la distribution des différentes longueurs des pousses et leurs hétérogénéités éventuelles dans le houppier.
- **La dynamique de croissance de l'arbre** est l'évolution de cette vigueur d'ensemble du houppier dans le temps. Elle indique si l'arbre pousse normalement ou non, s'il a subi des accidents ou est soumis à des contraintes limitantes, si ces dernières sont durables ou transitoires, si le sujet y réagit beaucoup ou faiblement, etc.
  Quand les conditions de culture sont stables la connaissance de la dynamique de croissance de l'arbre permet de pronostiquer le développement et la croissance à venir.

2.5 LES CRITÈRES D'ÉVALUATION DE L'ÉTAT DE LA REPRISE MIS AU POINT SUR LA CITÉ INTERNATIONALE

2.5.1 LES INDICATEURS DE LA REPRISE AÉRIENNE

La dynamique de croissance de l'arbre (soit l'évolution dans le temps de la vigueur d'ensemble du houppier) a été le principal critère utilisé pour caractériser la performance de la reprise.

Au terme des tests méthodologiques conduits sur la cité internationale, les indicateurs actuellement pris en compte pour évaluer la reprise aérienne des jeunes plantations sont :

- La vigueur de l'allongement d'ensemble de la couronne et son évolution dans le temps caractérisées par :
  - la longueur des pousses annuelles des tiges principales,
  - le nombre de pousses allongées dans l'année par le tronc et les branches maîtresses,
  - les dimensions du feuillage,
  - la quantité de tiges principales et secondaires en allongement dans la couronne et l'importance de la ramification,
  - l'intensité de la défeuillaison estivale éventuelle, la durée de vie des feuilles des espèces caducifoliées au cours de la saison,
  - le grossissement du tronc,
- L'étendue et l'intensité de la dégradation éventuelle des tiges de la couronne : nombre et proportion de tiges mortes/vivantes ; longueur cumulée de parties mortes/parties vivantes
- Les anomalies du feuillage : défaut de dimension, défeuillaison
- La capacité des tiges maitresses à organiser la couronne[5].

Les données (longueur des pousses et répartition dans le houppier) sont relevées sur le terrain, par une évaluation visuelle périodiquement contrôlée par des mesures directes (non systématisées). En 1998 ces données ont été saisies sous tableur pour classer les arbres en différents lots de reprise et de vigueur. Elles ont été partiellement complétées par des mesures de hauteur et circonférence.

[5] Les branches maîtresses et le tronc sont considérés comme d'autant plus capables d'organiser la couronne que leur croissance est forte, régulière, en progression après la transplantation, et supérieure à celle des branches latérales de la couronne

2.5.2 LES INDICATEURS DE LA REPRISE RACINAIRE

En l'absence de marqueurs morphologiques permettant d'identifier les pousses racinaires annuelles et l'évolution de leur longueur dans l'espace et le temps, le diagnostic s'adresse à la racine dans son ensemble sans repère chronologique précis. Il prend en compte:

- la nature, le nombre, la localisation des racines et leur performance de croissance évaluée par leur longueur et leur diamètre pour définir la composition de l'enracinement présent avant puis après plantation sur site,
- le stade de développement atteint à ces différentes étapes,
- la qualité initiale puis la performance de reprise de la fourniture
- l'impact de l'histoire de l'arbre, de son parcours de production et de plantation, du nombre et des différentes tailles racinaires subies sur l'efficacité de la régénération après contre-plantation puis plantation.

A l'échelle de la plaie racinaire,

L'indicateur majeur de l'amorce de la reprise d'une racine est la présence d'un nombre restreint de rejets (1 à 3) dominant tous les autres du point de vue de leur longueur, leur épaisseur, leur développement et compensant de ce point de vue la fraction racinaire supprimée. L'élagage précoce de la majorité des rejets de taille et la différenciation d'un petit nombre d'entre eux traduit l'initiation du processus de régénération, sa pleine expression étant conditionnée par leur nutrition. Le développement de leur base assurera la fermeture des plaies.

A l'échelle de l'enracinement,

Le diagnostic de reprise caractérise l'ampleur de l'écart entre l'état structural observé et celui qu'aurait un sujet de même âge et même force laissé intact dans le même environnement. La performance de la reprise est donc évaluée par la nature des différents types racinaires régénérés, leur nombre, leur distribution dans l'ensemble ramifié au regard de la fraction d'enracinement manifestant encore des symptômes d'altération ou de réaction après taille.

2.5.3 LES INDICATEURS DE LA REPRISE D'ENSEMBLE

L'arbre est considéré comme ayant repris lorsqu'il a recouvré durablement une vigueur représentative de son milieu de culture et se développe conformément aux patrons de l'espèce. L'arbre a restauré ses potentialités de développement lorsque les états suivants sont réalisés (planche n°1 fig 2C, 3C et $5C_1$) :

- des tiges et racines charpentières sont à nouveau clairement identifiables comme organisatrices de l'architecture de la couronne (houppier ou enracinement),
- les différences morphologiques entre tiges ou racines apparues ou transformées au cours de la crise de transplantation sont conformes à celles caractéristiques de l'essence (décrites dans l'Unité Architecturale),
- le gradient vertical d'allongement, décroissant du sommet du houppier au collet, est rétabli ; le potentiel racinaire initial de croissance en longueur et diamètre est restauré au niveau des points de taille en faveur de la périphérie de la couronne racinaire,
- les modalités de développement de tiges et racines sont à nouveau et durablement conformes aux modalités de référence de l'espèce.

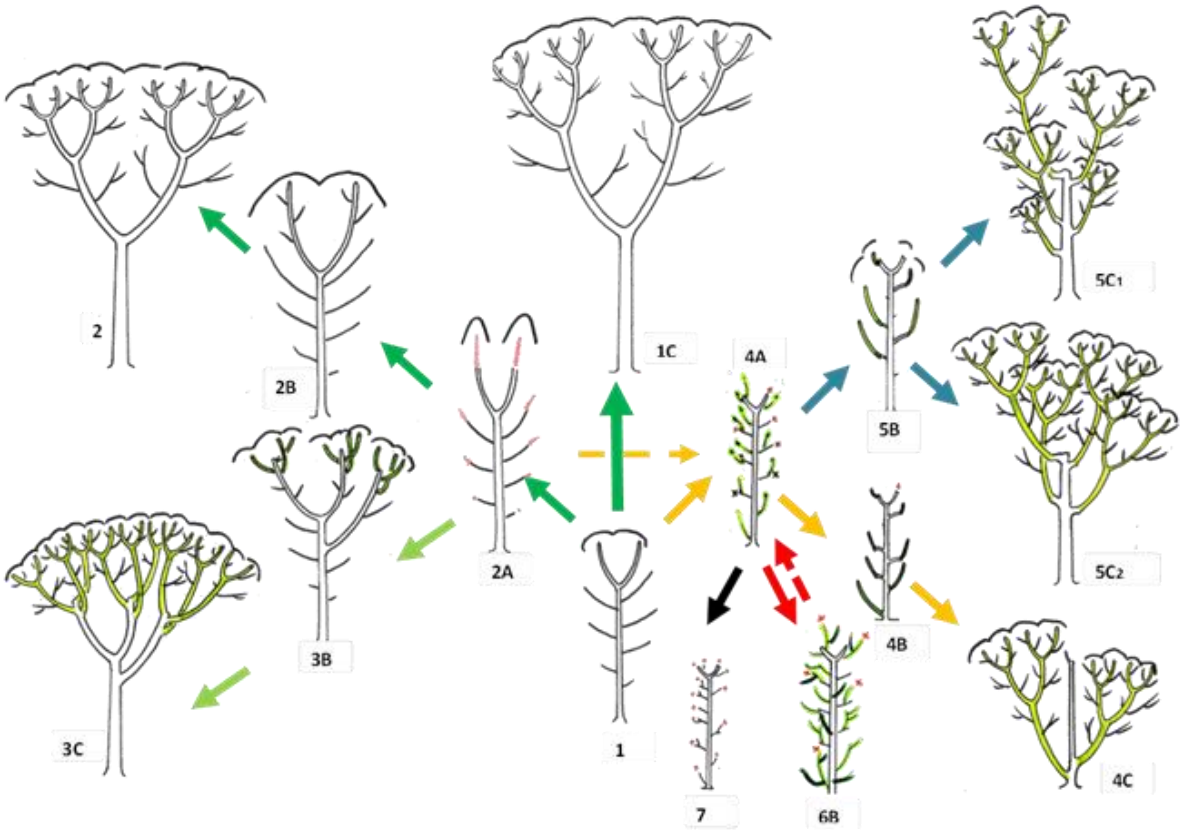


Planche 1 : Les différentes voies de la reprise aérienne d'un arbre tige après arrachage et plantation. Les Architectures des arbres à l'issue de ces voies. Les branches développées après arrachage sont surlignées en vert.

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 coloniaires (BC, 5C2) ou presque (5C1), leurs nouvelles branches se développent comme des sujets indépendants, de manière non coordonnées (Régénération coloniaire).

Au terme de la première étape de test de l'outil-diagnostic sur la Cité Internationale, celui-ci est devenu opérationnel pour :

- Evaluer la qualité initiale de la fourniture végétale
- Caractériser la performance de reprise
- En définir l'origine des défauts de reprise
- Définir le développement racinaire de sujets anciens et l'origine éventuelle de leur dépérissement
- Evaluer l'impact de divers travaux de voirie ou d'aménagement urbain sur l'enracinement d'arbres (en phase avant-projet ou en phase travaux).

2.6 LES PARTICULARITÉS DES ARBRES SORTANT DE PÉPINIÈRE

Au-delà du stade baliveau, les sujets tiges présentent des singularités morphologiques et des particularités de fonctionnement induites par les pratiques culturales en pépinière. Ces caractères les différencient de sujets intacts et rendent leur conduite ultérieure souvent délicate.

Dans un souci de connaissance approfondie des particularités du matériel végétal à diagnostiquer et de maitrise de l'outil diagnostic, ces différences ont été décrites, cette étape étant le préalable nécessaire à la définition des qualités des plants favorisant ou *a contrario* limitant leur reprise.

2.6.1 PARTIE AÉRIENNE

La réaction des houppiers aux tailles récurrentes s'exprime selon plusieurs modalités dont trois sont particulièrement gênantes pour la suite de la conduite :

- l'apparition de rejets (ou gourmands) et la transformation des tiges encore en place dans la couronne,
- l'affaiblissement des capacités des tiges charpentières à organiser la couronne comme un ensemble intégré,
- l'amenuisement des différences morphologiques et fonctionnelles entre les catégories de tiges (tronc, branches latérales, rameaux).

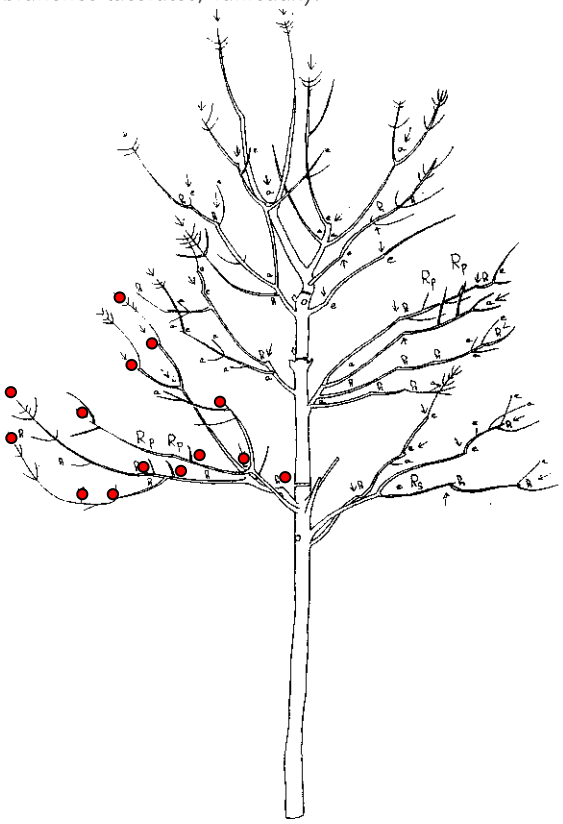


Fig 2 Fayet 1994 : sur deux branches basses de ce frêne blanc les points rouges marquent les points de taille ou la présence de rejets dus à la taille.

2.6.2 PARTIE RACINAIRE

La réaction des enracinements à la taille et l'arrachage est extrêmement variable. A une forte variabilité individuelle naturelle vient s'ajouter de grandes difficultés de régénérations des racines et de maitrise de leurs réactions à la taille.

La variabilité d'un lot se manifeste dès la phase de multiplication et ne cesse de se renforcer avec les contre-plantations suivantes. Elle s'exprime au niveau de :

- l'état de la charpente racinaire (nombre et nature de ses composants) avec absence, sous représentations ou déformations importantes d'éléments majeurs de l'ancrage et du développement (pivot et/ou racines plongeantes et/ou charpentières horizontales),
- déséquilibres éventuels profonds des effectifs et de la répartition spatiale des différentes catégories de racines (ex : charpente « nue » sans racines d'exploitation ni chevelus) allant jusqu'au blocage du développement voire à l'amorce d'un dépérissement racinaire,
- plaies ou déformations des racines ou de l'enracinement induisant une forte dissymétrie, la production de chignon, de pourritures remontant dans le tronc, etc.

Le conditionnement en motte et la maitrise de la réaction des houppiers[6] par la taille masquent l'ampleur des défauts racinaires qui peuvent s'intensifier à chaque contre-plantation.

2.6.3 PARTICULARITÉS D'ENSEMBLE DU PLANT

Les deux couronnes, aérienne et racinaire, réagissent chacune en permanence (i) aux tailles et interventions anciennes et récentes qu'elles subissent directement, (ii) et à celles que l'autre couronne traverse. Chaque arrachage ou taille racinaire est directement la cause d'un décalage durable entre les « besoins » en eau des tiges et les capacités effectives des racines à les approvisionner. Un décalage excessif ne peut être corrigé par les soins à la plantation. Il provoque le dépérissement puis à court ou moyen terme jusqu'à la mort du sujet arraché.

2.7 LIMITES ET PROLONGEMENT DES ÉTUDES

2.7.1 LIMITE DE L'ÉCHANTILLON VÉGÉTAL

Le nombre de sujets suivis et de critères pris en compte dans ces suivis jusqu'en 1999 étaient très largement supérieurs à ceux analysés par la suite, les moyens investis et les objectifs visés étant différents à la création du chantier et ultérieurement. Après 1999 le choix des individus objets de diagnostic a toujours été conditionné par :

- Des problématiques d'aménagement du site (réaménagement de la Bande Boisée nécessitant d'arracher ou déplacer certains sujets ; impératif de gestion des peuplements requérant des éclaircies, l'élimination de sujets en déficit de croissance, dominés par leurs voisins)
- Des contraintes internes aux peuplements : l'augmentation du volume des arbres et les bouleversements profonds de leur environnement immédiat qui s'en suivent limitent de plus en plus la prise des données donc leur validité et les possibilités de les comparer à celles collectées sur la toute jeune plantation en 1998. Ainsi l'effectif des sujets pris en compte dans la deuxième période des études a été réduit pour se focaliser sur la comparaison de différents sujets d'un groupe a priori homogène (même espèce, même forme, même site et force de plantation à l'origine). En conséquence, les sujets excavés sur site étaient en grande partie des sujets mal repris.

Parce qu'elles sont destructrices, les études de reprise racinaire sont déficitaires en nombre au regard de celles conduites sur les parties aériennes. Elles touchent le plus souvent des arbres voués à disparaitre (en défaut de reprise pour beaucoup). Elles sont cependant essentielles pour valider les hypothèses de reprise aérienne et les données collectées lors des diagnostics pédologiques et des suivis tensiométriques.

Des observations complémentaires sont conduites sur d'autres territoires. Elles renforcent chaque année la validité des résultats acquis sur la Cité Internationale et constituent les prolongements des études de SCIENCIL : site du Transport en Commun en Site Propre (TCSP) du SAN de Saint Quentin en Yvelines ainsi que le site expérimental l'ayant précédé, différents sites de plantation de collectivités (Grand Lyon, Département de l'Hérault, Canal du Midi, etc.) dont Pousse conseil caractérise précisément la reprise.

[6] Les conséquences de ces défauts majeurs sur la croissance et le développement des houppiers sont en grande partie masquées par la taille des parties aériennes et l'abondance des ressources hydriques et minérales.

2.7.2 INDICATEURS DE LA REPRISE : LIMITES ET TEST EN COURS

Les limites actuelles d'utilisation des indicateurs de la reprise en usage sont les suivantes :

- Quelques essences montreraient spontanément une alternance irrégulière de l'allongement de leurs tiges d'une année sur l'autre qui rendrait l'indicateur « vigueur d'ensemble annuelle » ou bisannuelle caduc dans leur cas.
- Le grandissement important de la couronne (augmentation en hauteur et/ou diamètre) peut induire l'observateur en erreur : quand ce grandissement repose sur l'allongement important d'un petit nombre de tiges alors la vigueur d'ensemble peut être modeste à faible (longueur cumulée de toutes les pousses de la même année).

Cinq indicateurs complémentaires de la reprise aérienne sont encore en phase de test, leur évaluation et leur interprétation n'étant pas encore maitrisées :

La quantité de feuillage que comprend une couronne, ou sa surface cumulée.

Il est possible de l'estimer par le degré d'opacité de la couronne en pleine feuillaison. C'est une autre forme d'évaluation de la vigueur d'ensemble des tiges et de leur quantité.

La cinétique de croissance en épaisseur du tronc depuis l'arrachage.

L'évolution du grossissement dans le temps peut certainement donner une idée assez fidèle de l'évolution de la vigueur d'ensemble des tiges. Mais il manque encore des références rigoureuses de croissance en diamètre des différentes essences en différentes forces pour permettre son usage.

L'hétérogénéité de la vigueur des principales tiges de la couronne.

Une distribution apparemment aléatoire de la vigueur est révélatrice de l'état d'altération ou de réaction de couronne (voire de l'enracinement).

L'altération du gradient vertical d'allongement des tiges.

Les branches les plus hautes d'un sujet fléché en « libre croissance » poussent bien mieux que les basses selon un gradient vertical. L'altération de ce gradient révèle l'état de réaction de l'arbre à une contrainte (fig 3). Mais les modalités de rétablissement du gradient, très variables, sont encore trop peu connues.

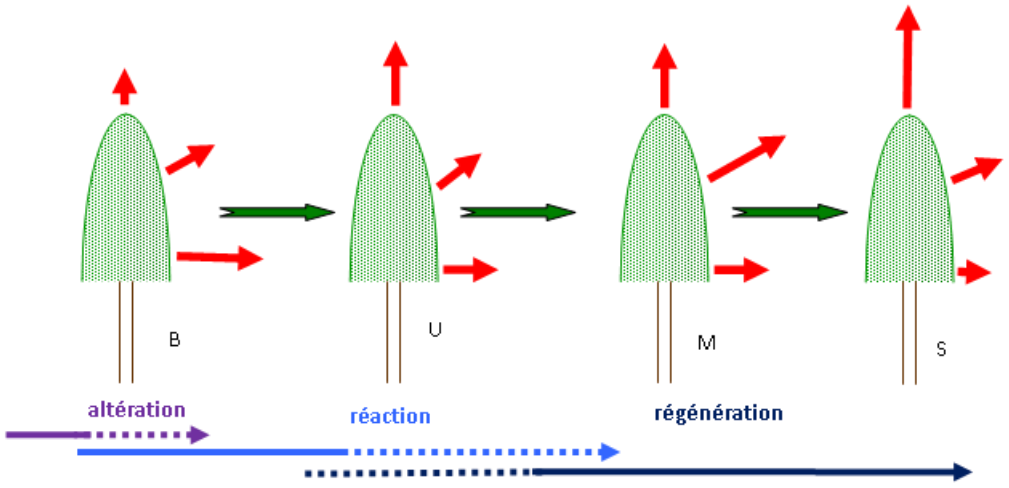
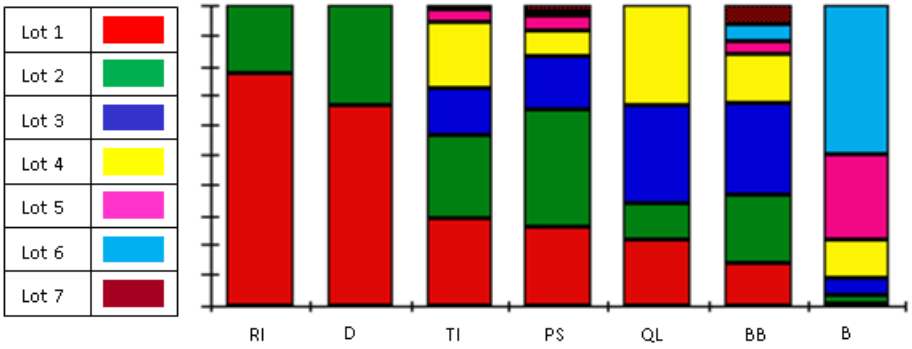


Fig 3 : Répartition de la vigueur de l'allongement dans le houppier au cours des différentes étapes de la reprise

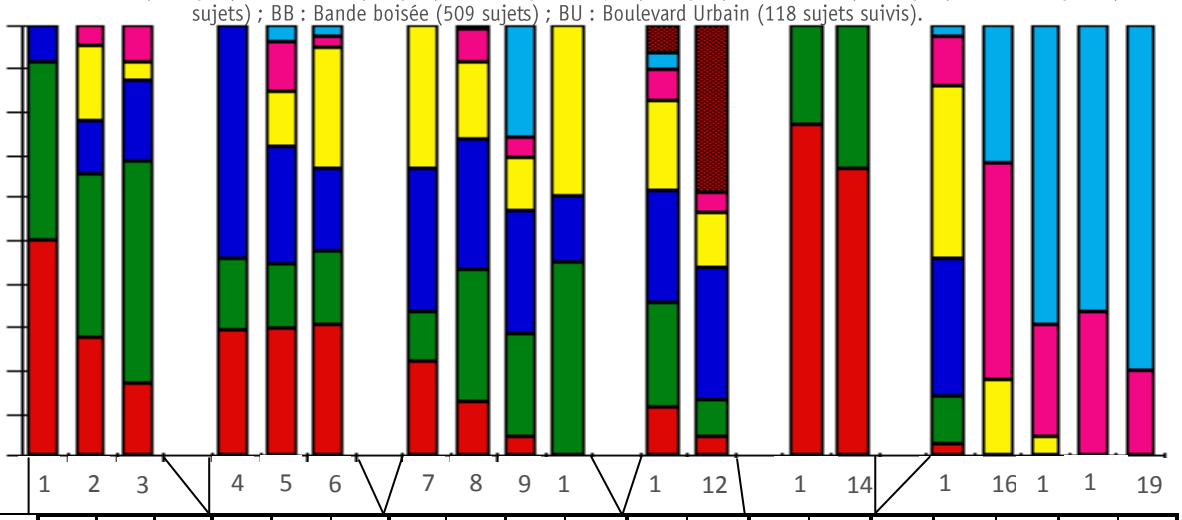
Le polycyclisme de l'allongement des tiges.

Les tiges maîtresses de certaines espèces allongent plusieurs pousses successives dans l'année. Ce phénomène spontané est souvent associé à une forte vigueur des sujets installés. Or il a aussi été observé au cours des deux premières années de reprise, lorsque la vigueur est modérée à faible (par exemple sur micocoulier de Provence, sophora du Japon, frêne blanc, pommier, abricotier, etc.).

Les essences concernées par ce polycyclisme de contrainte sont à identifier. L'origine, la diversité et les particularités de ce phénomène, le déterminisme de sa disparition progressive dans le temps restent à caractériser : une hypothèse à tester est celle d'une contrainte d'origine racinaire déterminant un défaut d'alimentation des tiges et l'arrêt de leur croissance jusqu'à ce que la croissance de l'enracinement autorise celle des tiges.



A : Distribution des différents lots d'allongement dans chacun des grands sites (du lot 1 au lot 7 la qualité de la reprise est décroissante en 1998.
RI Rue Intérieure (13 sujets) ; DO : Douve (9 sujets) ; TI Triangle Interpol (94 sujets); PS Parc sud (138 sujets) ; QL Quai Lignon (9 sujets) ; BB : Bande boisée (509 sujets) ; BU : Boulevard Urbain (118 sujets suivis).



N°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
Site	PS	TI	PS	BB	BB	TI	AL	BB	BB	BB	PS	BB	RI	DO	BU	BU	BU	BU	BU
Sous unités	pa	t	t	2	3	pe		4	1	5	pe	pa			1	4	2	3	5
Effectif	12	58	60	24	78	36	7	79	42	20	78	23	13	9	35	28	23	27	5

B : Distribution des différents lots d'allongement dans chacune des sous unités des grands sites (du lot 1 au lot 7 la qualité de la reprise est décroissante) en 1998.
RI : Rue Intérieure ; DO : Douve; TI Triangle Interpol ; PS Parc sud; QL Quai Lignon ; BB : Bande boisée; BU : Boulevard Urbain.
pa : parvis ; t : talus ; pe : pelouse ; BB1 à BB5 ou BU5: banquette 1 à 5 de la Bande boisée ou du Boulevard Urbain.

Fig 4 : Distribution en 1998 des différents lots d'allongement dans les différents sites étudiés

3 RÉSULTATS : PARTICULARITÉS DE LA REPRISE SUR LA CITÉ INTERNATIONALE

3.1 ETAT DE LA REPRISE EN 1998

En 1998, sur la base du diagnostic des parties aériennes exclusivement, la reprise des arbres était en bonne voie pour environ 56% des sujets analysés et en mauvaise voie pour les 44% restants (fig 4). Depuis, quelques essences peu représentées dès l'origine ont fini par disparaitre intégralement ou presque, après avoir dépéri (sorbier intermédiaire, noisetier de Byzance, érable champêtre, érable saccharinum) ou subi un accident brutal de culture (bouleaux verruqueux des douves).

3.2 FACTEURS DE VARIATIONS DE LA REPRISE EN 1998

3.2.1 EFFET SITE

En 1998, la plupart des sites et leurs sous-unités (fig 4) accueillaient des plants de tous les lots d'allongement dans la limite de ce qu'autorise leur composition floristique[7]. La localisation initiale des plants sur la Cité Internationale et la diversité relative des terres ayant servi à reconstituer chacun des sites de plantation n'étaient pas des facteurs déterminant de la reprise. Quatre sites ont fait exception à cette règle car presque tous les plants y ont bien ou mal poussé indépendamment de l'espèce : le boulevard urbain, les parvis de la bande boisée et la pelouse du triangle Interpol où le dépérissement a été la règle ; les talus du triangle Interpol et du parc sud où la reprise a été bonne au cours des premières années.

3.2.2 EFFET DE LA FORCE À LA PLANTATION

Dans chaque site, toutes espèces et formes confondues, la force des sujets à la plantation a joué en défaveur de leur reprise :

- Plus la force initiale était élevée moins la vigueur des tiges était forte, plus le dépérissement a été long et intense. Les jeunes plants et baliveaux ont montré la vigueur la plus élevée observée sur la Cité Internationale alors que la difficulté à reprendre des très gros sujets des parvis a été systématique et spectaculaire. Ces résultats ont été confirmés par les diagnostics d'opérations de plantation de spécimen sur voirie de la Communauté Urbaine de Lyon (Avenue Tony Garnier, Boulevard Vivier-Merle etc.) et par les études de transplantation de gros sujets conduites par la ville de Paris (voir fiche Plante et Cité).
- Deux exceptions ont été observées : sur le parc sud les spécimens de Cèdre de l'Atlas ont poussé aussi bien que les jeunes plants voisins. Sur le triangle Interpol, les spécimens de tilleuls argentés (force supérieure à 40) ont mieux poussé que bien des tiges de force 20-25 plantées sur d'autres sites.

Au sein de chaque classe de force de plantation (20-25 cm, 25-30, 30-35 etc. .) aucune étude n'a été menée pour préciser si les sujets les plus grêles de la classe avaient repris généralement plus ou moins bien que les plus gros. Il semble que l'état du plant (des points de vue morphologique, architectural, physiologique ou de vigueur), et surtout de son appareil racinaire au moment de l'arrachage soit un facteur primordial de succès de sa reprise, plus que sa force absolue. L'effet de la force à la plantation sur la performance de la reprise reflèterait essentiellement le nombre des étapes culturales traversées en pépinière, autant dire le cumul des altérations subies par l'enracinement à chacune d'entre elles.

[7] En conditions de régénération naturelle et d'environnement non limitant, certaines essences ont intrinsèquement des allongements de faible amplitude alors que d'autres peuvent développer des pousses annuelles de 70 à plus de 100 cm de longueur. Il est donc important de tenir compte du potentiel de l'essence et de celui que lui offre l'environnement pour évaluer la performance de la reprise.

3.2.3 EFFET DE LA FORME HORTICOLE À LA PLANTATION

Trois formes horticoles différentes ont été plantées (tiges, formes naturelles et cépées), parfois pour des couples espèce-force semblables (20-25 cm en tige). Une étude rigoureuse de l'influence de la forme horticole sur la reprise ne pouvait cependant pas être conduite pour les raisons suivantes :

- Pour la même espèce, ces trois formes horticoles sont presque toujours issues de parcours d'élevage différents, les couronnes aériennes étant donc issues de souches racinaires élevées différemment,
- Rares sont les espèces plantées dans le même site, dans les mêmes conditions de plantation, sous chacune de ces différentes formes horticoles et en effectif suffisant pour autoriser une comparaison
- Dans l'échantillon disponible, l'étude de l'effet de la forme ne peut être dissociée de celle de la force à la plantation.

Ainsi, même si le dispositif de la Cité Internationale comprend environ 150 tiges, 200 formes libres, 250 cépées, 70 futaies, et plus d'une centaine de jeunes plants ou baliveaux aucun avantage d'une forme sur l'autre n'a été remarqué du point de vue de la reprise aérienne sur l'ensemble des sites et dans aucun site pris individuellement. A titre d'anecdote les hêtres de forme libre n'ont pas souffert d'échaudures au contraire des hêtres tige, le hêtre étant particulièrement sensible aux échaudures.

3.3 PÉRENNITÉ DE LA REPRISE

Quand peut-on considérer que la reprise d'un arbre récemment planté est définitive ? Cette question est de première importance lors de la réception des jeunes plantations. Peut-on y répondre ? Et si oui, comment ?

3.3.1 EVOLUTION DES ARBRES INITIALEMENT EN DÉFAUT DE REPRISE

Sur la Cité internationale, les arbres dont la reprise aérienne était considérée comme indiscutablement défectueuse en 1998 peu après leur plantation n'ont jamais montré une véritable reprise ultérieure. Selon l'espèce et la force de plantation considérées, ces sujets défaillants ont évolué de façons suivantes :

- Dégradation lente et progressive de la couronne se terminant par la mort.
- Survie dans un état de développement erratique stabilisé, alternant entre dégradation et réaction.
- Régénération partielle de la couronne associée à une faible vigueur installée durablement.

Si l'on classe le développement des plants initialement mal repris selon leur force initiale, les tendances suivantes se dégagent :

- Les plants de force faible (« jeunes plants ») n'ont généralement pas survécu à la dégradation importante et relativement prolongée de leur couronne souvent aggravée par de mauvais traitements sur ce site.
- Les plants de force élevée (« spécimen » de force supérieure à 40) même fortement blessés et dégradés ont toujours survécu, se sont dégradés puis ont régénéré très lentement et incomplètement.
- Les plants de force « moyenne » (20-25cm) ont montré des capacités de survie et de reprise tardive intermédiaires et variables selon les essences.

Le résultat le plus original est que la plupart des arbres ayant mal repris initialement sont encore vivants 16 années après leur plantation. Ils ont survécu à la canicule et la sécheresse de 2003 et 2004. Il est probable que le maintien à leur pied d'un arrosage des pelouses et couvre-sol en soit partiellement responsable.

Les diagnostics de non-reprise de 1998 étaient donc fiables et les sujets ont évolué selon leur robustesse : les plus fragiles (jeunes plants) n'ont pas survécu alors que les plus robustes (spécimens) l'ont fait sans pour autant régénérer vraiment.

3.3.2 EVOLUTION DES ARBRES CONSIDÉRÉS COMME REPRIS INITIALEMENT

Tous les arbres considérés comme repris en 1998 étaient vivants et non dépérissants en 2013, à l'exception des suivants morts accidentellement ou en raison d'erreurs culturales :

- 3 chênes pédonculés tige plantés sur la pelouse du Parc sud devenus fortement dépérissants,
- les 9 pins sylvestres spécimens de la pelouse du triangle Interpol, morts après un dépérissement long et progressif probablement facilité par l'arrosage de la pelouse et une pathologie racinaire fongique,
- un hêtre mort par empoisonnement sur le quai Lignon,
- plusieurs dizaines de sujets de différentes essences supprimés lors de travaux sur la bande boisée et le Triangle Interpol.

Le diagnostic de reprise aérienne a donc été fiable comme pronostic de la survie des arbres et de la reprise durable de leur développement.

Ce diagnostic pouvait-il aussi indiquer l'espérance de grandissement et grossissement de ces arbres considérés comme « repris » ?

Parmi les sujets observés en 1998 puis 2011 et 2012 faisant partie d'un groupe d'individus de la même espèce plantés dans un sol très semblable (fosse individuelle ou collective ou sol continu du même site), le classement établi initialement entre les différentes unités d'un même groupe sur un critère de vigueur de l'allongement a parfois été profondément bouleversé :

- En fosse unitaire du Quai Achille Lignon, la vigueur d'ensemble des merisiers a diminué de 30% chez tous les arbres. Le classement initial de vigueur de 1998 a été modifié. Les deux sujets les plus vigoureux de 1998 font partie des 3 individus les moins vigoureux de 2011. Les deux individus de vigueurs moyennes en 1998 sont actuellement légèrement plus vigoureux que les autres.
- Sur sol continu du talus du Triangle Interpol tous les hêtres en place au moment de l'observation en 2011 montrent une couronne non déformée, sans dépérissement, des tiges saines de vigueur normale. Les jeunes plants mesurent 9 à 10 m de haut. Les changements de classes de vigueur sont importants, le sujet classé au premier rang de la vigueur en 1998, rétrograde au dernier rang en 2011 et l'évolution inverse est également observée sur un sujet alors que six voisins conservent leur classement ou ne bougent que très faiblement. Des résultats semblables ont été obtenus sur les nombreux chênes chevelus et les chênes pédonculés du Parc Sud.

Le diagnostic de reprise établi en 1998 après 3 à 4 années de culture a bien indiqué la poursuite ou la reprise du développement des sujets en question mais n'a pu évaluer avec précision l'évolution de leur vigueur et leur espérance de grandissement ou grossissement.

La reprise aérienne observée les premières années sur d'autres sites expérimentaux n'a pas toujours été durable (Tilleul du TCSP, Erable du Site pilote du TCSP de Saint Quentin en Yvelines, Alignement de Frênes du Boulevard urbain sur la CIL, Platanes et autres alignements fortement taillés à la plantation, présentant de fortes mutilations racinaires).

Sur la Cité Internationale, quels sont les facteurs qui ont limité la pérennité de la reprise ou modulé les performances de croissance à moyen terme ? Une partie des réponses à ces questions peut être donnée en étudiant la performance de la reprise racinaire.

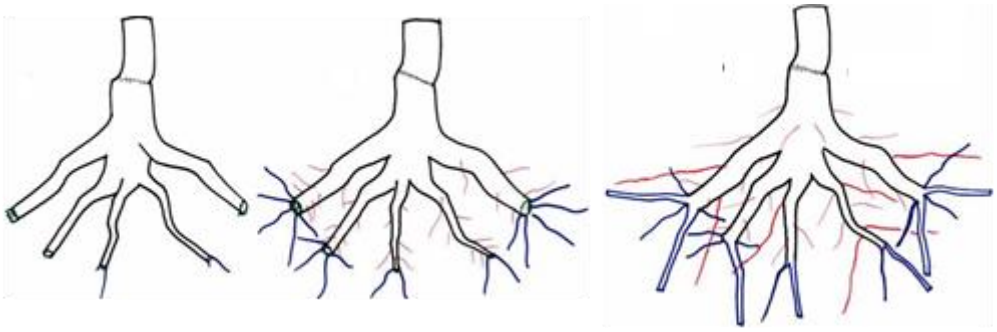
3.4 ETAT DE LA REPRISE RACINAIRE

3.4.1 ETAT DE LA REPRISE RACINAIRE DES ARBRES OBSERVÉS

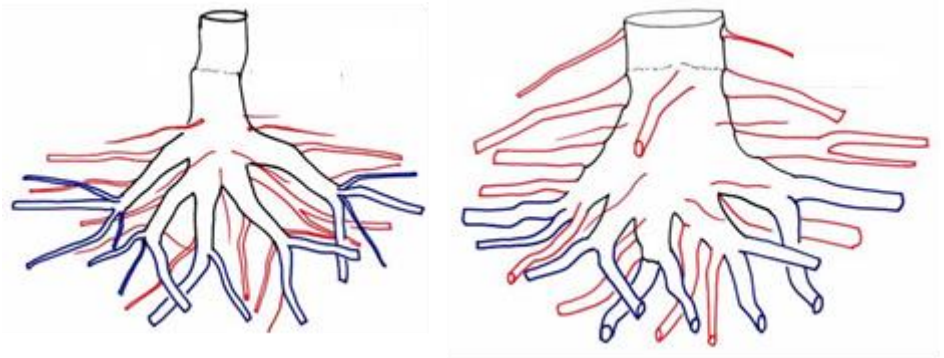
Les frênes suivis en tensiométrie

En 2000, sur les 3 frênes suivis en tensiométrie durant deux années après plantation, seul le plus jeune (force 10-12 à la plantation en 1996 sur l'Arboretum (fig 5) montrait l'amorce d'une régénération de l'enracinement. Les 2 autres individus (force 20-25 à la plantation en 1995 et 1996 sur le Boulevard et l'Arboretum) montraient des défauts majeurs de reprise racinaire en accord avec les déficits de reprise aérienne observés sur l'ensemble des frênes du site. L'enracinement de ces sujets a abondamment réagi et rejeté au niveau des plaies racinaires. Cependant il a été bloqué en phase de réaction, la sélection et le développement ultérieur des nombreux rejets racinaires produits n'ayant pas opéré.

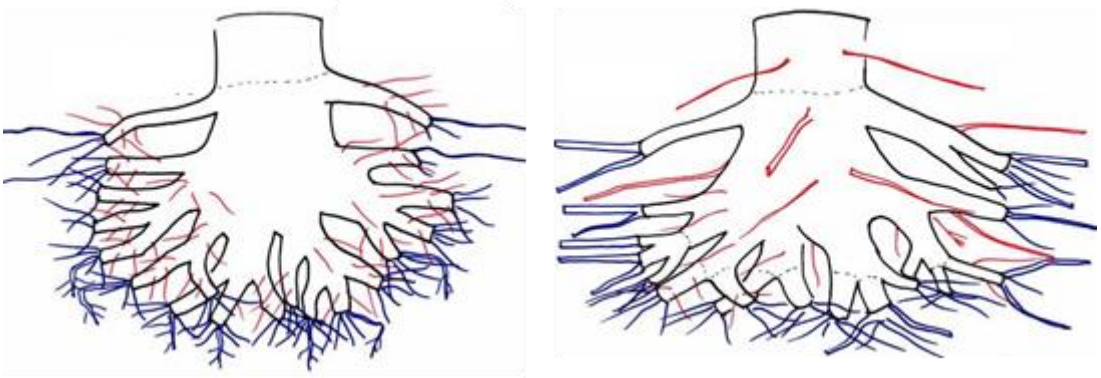
En 2011 les 2 frênes prélevés sur le Boulevard urbain 15 après plantation et suivis par tensiométrie à l'origine ont révélé un état stationnaire par rapport à celui observé en 2000 (fig 6). Les plaies de taille sont encore nettement identifiables. La production de rejets se poursuit sur la charpente racinaire et remonte jusqu'à la base du tronc. Les rejets montrent un développement extrêmement limité (leur diamètre maximal au point d'origine est inférieur à 2.5 cm pour la très grande majorité d'entre eux).



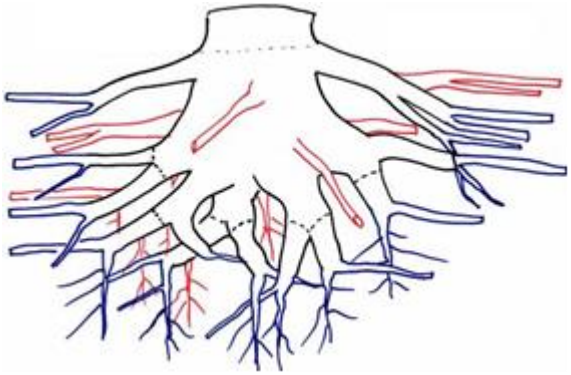
Ci-dessus : 3 stades successifs de la reprise racinaire de jeunes tiges après 1 année de culture en pépinière



Ci-dessus : Etat de la reprise racinaire de jeunes tiges après 3 (à gauche) et 5 (à droite) années de culture en pépinière



Ci-dessus : 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).



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

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.

Fig 5 : Parcours de production en pépinière et reprise racinaire des Frênes sur le boulevard Urbain en 2000. En trait noir la portion d'enracinement mise en culture ; en trait bleu les rejets issus de la réaction des plaies de tailles racinaire. En rouge les rejets développés en amont des plaies de taille et jusque sur la base du tronc (issus du développement dit « retardé »).

Ci-dessus vue d'ensemble et détail du Frêne du boulevard urbain au niveau du rond-point Poincaré planté en 20-25 en 1995, suivi en tensiométrie et analysé en 2011. Le cliché en haut à droite montre un détail d'une des sondes tensiométriques et les racines présentes dans son environnement immédiat. Noter la faiblesse du diamètre des racines de régénération 15 ans après plantation à l'extérieur de la motte initiale (le drain jaune en donne les contours).

Ci-dessus le deuxième Frêne analysé en 2011 sur le boulevard urbain en volume plus contraignant.

Fig 6 : reprise des Frênes en 2011

Dans les deux années suivant la plantation, le suivi tensiométrique révèle l'amorce du processus de reprise racinaire, le début de la phase de réaction avec la percée de nombreux rejets constituant le volume absorbant en périphérie de motte. Néanmoins le suivi de la progression de ce front racinaire desséchant le sol de la fosse jusqu'à 70 cm de la motte n'a pas permis de déceler le blocage du développement des rejets et l'échec des étapes majeures de la reprise racinaire que sont la sélection des rejets et la régénération des parties amputées par l'arrachage (phase de sélection des rejets et de reconstruction des parties supprimées).

Les autres sujets

En 2011 les sujets montrant les meilleures performances de reprise racinaire (fig 7) sont :

- Les jeunes plants de hêtre et d'érable (contre-plantés une unique fois et protégé par le couvert des sujets les plus gros). En moins de 10 ans ils ont rattrapé en diamètre les tiges les moins vigoureuses de la même espèce.
- Les sujets (jeunes plants et tige) cultivés sur sols continus (talus ou banquette) ET bénéficiant d'un microclimat protecteur dû à l'alignement de platanes du quai Achille Lignon, les bâtiments déjà présents à la plantation. En effet les hêtres cultivés sur les fractions non protégées du talus du Parc sud ou de la bande boisée ont montré de grande difficulté de reprise et ne sont pas sortis de cette crise alors que leurs homologues du talus du triangle Interpol montraient un état nettement plus satisfaisant.
- Les sujets appartenant aux essences réputées les plus plastiques par rapport à la taille en pépinière (érable) ou les plus aptes à s'adapter aux contraintes culturales sur site (érable et charmes) à enracinement superficiel.

Nature des défauts de reprise racinaire observés

Fig 7 : En haut à gauche une tige de Charme parfaitement reprise, un jeune plant d'érable et en bas un jeune plant de hêtre. Ces 3 sujets ont été prélevés sur le talus du triangle interpol.

Dans la limite fixée par le protocole de sélection du matériel végétal[8],, tous les sujets plantés en motte montraient encore 7 à 15 ans après la plantation des traces plus moins importantes des tailles racinaires antérieures et des défauts de régénération conséquents aux différentes contre-plantations.

Les enracinements les mieux repris sont ceux d'espèces réputées pour leurs développements racinaires superficiels (charme, érable). Quelles que soient l'espèce et l'individu concernés, la régénération et la croissance ont toujours été :

- les meilleures dans la partie superficielle de la couronne racinaire

[8] Les sujets excavés n'ont pas été choisis pour être représentatifs de l'ensemble de variabilité de reprise aérienne du site. Leur choix a été dicté par les contraintes de chantier et les besoins de gestions des peuplements arborés.

- mises en échec dans les parties profondes des mottes : A plus de 50 cm de profondeur les enracinements n'ont pu déployer de véritables racines ligneuses de diamètre supérieur à 0,5 cm.

Ce constat est valable pour l'ensemble des sujets ayant fait l'objet d'étude racinaire sur le site (frênes, sujets de la bande boisée voués à être transplantés, sujets du parc sud et du triangle Interpol étudiés en 2011). Les principaux défauts de reprise racinaire recensés sur la Cité Internationale sont :

- Le déficit important de régénération conforme, l'abondance de rejets de développement restreint (de faible diamètre et colonisant une partie du volume de la fosse voire au mieux de sa proche périphérie), la persistance de plaies de taille non refermées 7 à 15 ans après plantation
- En conséquence, l'absence ou la rareté 7 puis 15 ans après plantation de la régénération des charpentes mutilées à la sortie de la pépinière voire antérieurement (racines de plus de 3 à 5 cm de diamètre selon les espèces)
- L'absence ou la très faible réaction des plaies en fond de motte quel que soit le diamètre racinaire concerné
- La mort d'une partie parfois importante de la motte initiale résultant éventuellement des contre-plantations antérieures à la plantation sur site. Les plus grosses plaies non cicatrisées en pépinière ont permis l'installation de pourriture remontant progressivement dans le cœur des racines puis dans le tronc
- Le cumul de ces défauts débouchant éventuellement sur une grande faiblesse voire une absence totale de régénération de la motte initiale dans son ensemble
- La suprématie de développement des rejets perçant bien en amont des plaies ET dans la partie superficielle de l'enracinement au dépend de la croissance des rejets nés autour des plaies de taille. Cet avantage a permis dans les meilleurs des cas non pas la régénération de la couronne initiale par sa périphérie mais l'installation d'une nouvelle couronne racinaire superficielle dont le développement a été vraisemblablement fortement conditionné par les qualités agronomiques de la couche supérieure du sol.

Le cumul éventuel des différents défauts recensés a pu engendrer des potentialités de reprise très différentes des racines sur l'ensemble de la circonférence de la motte. Sur la totalité des sujets conditionnés en motte et observés sur la Cité Internationale (29) et dans la limite des motivations de leur choix, seuls 3 d'entre eux (le charme du triangle Interpol (fig7), un hêtre de la bande boisée et le jeune frêne planté en 10-12 (fig5)) ont régénéré une véritable charpente racinaire composée de racines de 5 à 11 cm de diamètre explorant le sol en surface[9]. Tous les autres individus observés plantés en motte ne sont pas parvenus au terme de la régénération racinaire. Ils ont reconstitué au mieux des racines de colonisation de diamètre inférieur à 4 cm à la base, inapte à explorer efficacement le sol à distance de la fosse de plantation.

3.5 PERFORMANCE DE LA REPRISE ET CONTRAINTES DE L'ENVIRONNEMENT DE PLANTATION

La diversité de l'état actuel des plantations traduit certainement la gamme des performances de reprise racinaire et la variabilité des fractions d'enracinement régénérés au regard du volume initial de la motte (planche 2). La variabilité des caractéristiques de l'environnement souterrain est pour partie responsable de cet état. En effet, les paramètres clés de la performance de la reprise racinaire sont :

- L'état initial de la fourniture végétale, particulièrement les aptitudes de son enracinement à sortir au plus tôt de la crise de transplantation pour remplacer au plus vite les portions qui lui ont été enlevées à l'arrachage
- Le volume de sol disponible, colonisable par les racines, et le volume des ressources hydriques et minérales qu'il offre pour assurer la croissance de l'arbre.

[9] A titre indicatif le charme possédait en 2011 des racines charpentières dont le diamètre basal était celui de son tronc à la plantation en 1996.

Sur la Cité Internationale, différents paramètres de l'environnement sont venus moduler le succès de la reprise.

3.5.1 VARIABILITÉ DES VOLUMES DE SOL RECONSTITUÉ ET EXPLOITABLE PAR LES RACINES.

Selon les prescriptions, les volumes de plantations étaient les suivants :

- le volume d'une fosse unitaire (10 m3) cernée à partir de 40 cm de profondeur d'un encaissant qui s'est révélé le plus souvent très drainant.
- le volume plus large de fosse collective (nx10m3) conformée sur le même principe mais accueillant de trois à une quinzaine d'individus,
- le volume d'un sol continu constituant un talus ou une banquette de la bande boisée regroupant plusieurs dizaines de sujets.

Les frênes du boulevard urbain plantés en fosse unitaire de volume parfois très inférieur au 10m3 préconisés ont été fortement contraints par la proximité et l'inhospitalité de leur encaissant.

Malgré sa faiblesse, l'échantillon excavé montre que les hêtres tiges du Triangle Interpol plantés en fosse ont moins bien repris que leurs homologues tout proches plantés sur le sol continu du talus du même site.

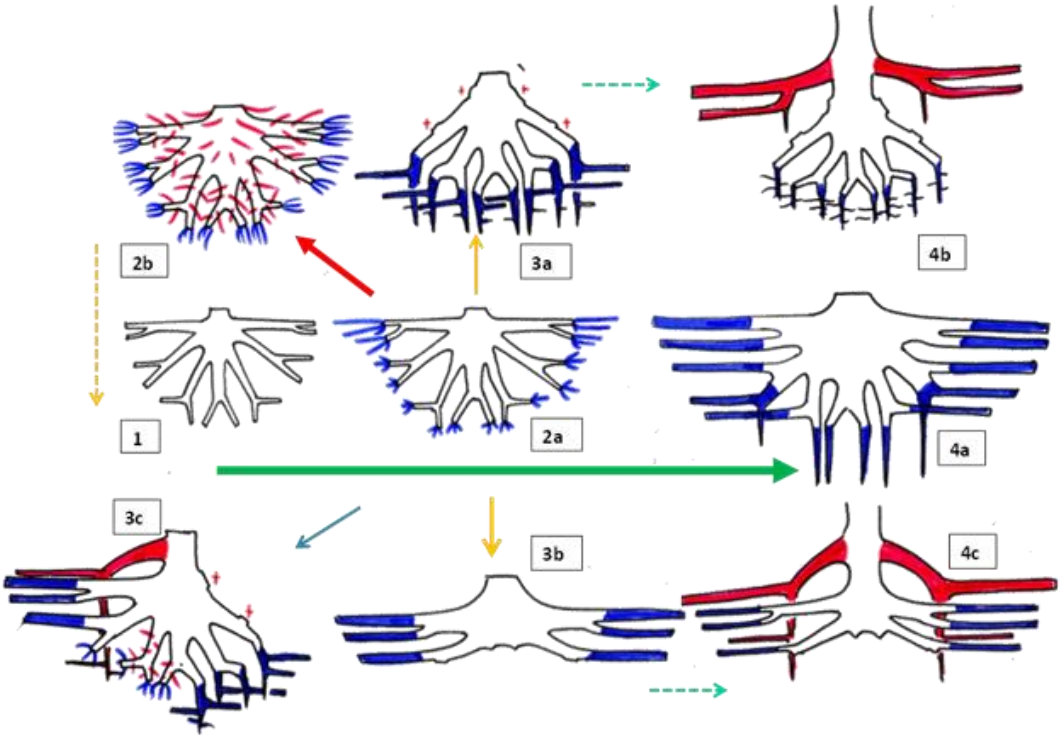


Planche 2 : Les voies de la reprise racinaire
1 Etat initial : Altération liée à l'arrachage ; 2a b Réaction ; 3 -4 Régénération plus ou moins complète.
Au centre (1, 2, 4a) la régénération conforme d'un enracinement après son arrachage.
En bas l'essentiel de la motte dépérit en profondeur (3b) et cet 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.

3.5.2 DIVERSITÉ DES PROFONDEURS RÉELLES AU REGARD DES PRÉCONISATIONS INITIALES (150 CM DE PROFONDEUR)

Dans les faits, bien qu'elle n'ait pu être décrite en détail, il existe une variabilité non négligeable de la profondeur des sols plantés d'arbres (50 cm à plus de 180 cm) selon les sites étudiés et sur chaque site selon les points de sondages considérés. Couplée aux différents volumes de plantation préconisés dès l'origine du projet, cette variabilité de profondeur des sols reconstitués détermine des offres de réserves hydriques et minérales différentes. Ainsi parmi les hêtres tiges du triangle Interpol le sujet excavé ayant le moins bien repris était planté en fosse de 80 cm de profondeur seulement, et a moins bien repris que la tige plantée sur sol continue de la bande boisée.

3.5.3 STRATIFICATION DES SOLS RECONSTITUÉS

La différenciation des horizons de sol et de leurs propriétés physicochimiques a privilégié la reprise en surface au dépend de la colonisation des horizons de profondeur:

- L'horizon de surface (0-30 cm en moyenne) très favorable, recevant l'irrigation, poreux, enrichi en matière organique, a été abondamment colonisé par les racines
- Les deux horizons terreux sous-jacents sont moins propices à la colonisation racinaire car moins alimentés en eau, moins poreux, plus compact (moins pourvus en matière organique). Sur l'ensemble des sites étudiés, l'horizon terreux de profondeur (50-100 en moyenne) situé sur l'encaissant, même s'il est investi par des racines d'exploitation ou des extrémités racinaires de 2mm de diamètre reste très faiblement colonisé par la partie pérenne des enracinements. Cette inaptitude des racines ligneuses à se développer au-delà de 50 cm de profondeur limite d'autant la performance de la reprise générale des arbres.
- Les encaissants de différentes formes et qualités cernent les zones de plantation (quel que soit leur volume) latéralement (à partir de -35 à 40 cm) et en profondeur (entre -50 et -180 cm). Sur les zones arborées de la bande boisée, du parc sud et du triangle Interpol ils sont perméables et drainants. Leur présence a certainement eu un effet desséchant sur la frange de sol située en périphérie des fosses
- L'excès de contraintes mécaniques exercées dans la partie profonde de la motte par le poids de l'arbre lui-même et la résistance des matériaux portant la motte (sol compact voire galets de l'encaissant) a limité la reprise des racines de profondeur
- Dans de nombreux sites, le couvre sol ou la pelouse ont été arrosés jusqu'en 2011, favorisant les enracinements superficiels.

Sur d'autres sites expérimentaux de conformation similaire (Site Pilote de Saint Quentin en Yvelines), l'arrêt de l'irrigation s'est soldé par le dépérissement de l'espèce présentant à l'origine l'une des meilleures performances de reprise mais l'enracinement le plus superficiel. Sur la Cité Internationale la croissance en diamètre du tronc des arbres révèle une chute brutale suite à la sècheresse de 2003 et l'absence de restauration du potentiel initial jusqu'en 2011.

Chez les sujets présentant un enracinement homogène sans défauts majeurs sur l'ensemble de la motte, la différenciation des propriétés physicochimiques des horizons du sol a stimulé la régénération racinaire en surface et accrus les déficits de reprise en profondeur par des effets de concurrence entre rejets racinaires pour l'alimentation.

3.6 CORRÉLATION ENTRE REPRISE RACINAIRE ET REPRISE AÉRIENNE

La survie d'un arbre peut être le simple fait d'un enracinement réduit à sa plus simple expression (quelques chevelus et racines d'exploitation présents sur une charpente très massive fortement mutilée (fig 5 et 6, planche 2 fig 2b)). Des arbres plantés en force 18-20 ou 20-25 peuvent survivre grâce à des rejets d'appareil absorbant mais lentement dépérir pendant 15 ans sans parvenir à régénérer leur enracinement. Chez le sujet

conditionné en motte, rien ne permet a priori de soupçonner au sortir de la pépinière l'ampleur des défauts de structuration de l'enracinement et ses difficultés de reprise à venir.

La structure du houppier, la longueur de ses dernières pousses ne laissent pas toujours entrevoir ses défauts racinaires quand les conditions culturales ont été particulièrement bénéfiques (sol riche et largement pourvu en eau). Deux scenarii sont alors possibles selon la qualité de l'environnement de plantation.

3.6.1 CULTURE DANS UN ENVIRONNEMENT FAVORABLE

Un environnement très favorable (ressources hydriques et minérales) permet une réaction très vigoureuse de l'enracinement dans la première année suivant la plantation. Son efficacité est directement conditionnée par la qualité initiale de la charpente. La quantité de rejets racinaires produits, leur croissance en longueur et diamètre sont importants et manifestement supérieurs à ce qui est nécessaire à la survie et à la croissance de l'arbre. Une altération de faible ampleur de la qualité de la charpente racinaire induit de manière transitoire un déficit d'allongement des tiges. Le développement est orienté dès les premières années de culture vers la construction et le déploiement en parallèle des charpentes racinaires et caulinaires.

Un accident cultural (arrêt brutal de la disponibilité des ressources hydriques) peut induire un dépérissement tout aussi brutal d'un sujet en cours de reprise. La reprise sera accomplie d'autant plus rapidement que le sujet sera jeune et son enracinement faiblement altéré par son parcours de production en pépinière (fig 5 ; fig 7 ; planche 2-1-2a4a).

3.6.2 CULTURE DANS UN ENVIRONNEMENT CONTRAIGNANT

Un environnement contraignant agit d'emblée en limitant le volume et la croissance du système régénératif souterrain. L'évolution peut être opposée à celle attendue à la vue de l'état initial de l'enracinement.

Comportement d'une charpente massive dans un environnement contraignant

Lorsque l'environnement est contraignant, la profusion de rejets racinaires produits par une charpente très vigoureuse ne peut être alimentée. Le système régénératif n'évolue que très lentement ou pas du tout car tous les rejets sont en concurrence du point de vue nutritionnel, aucun ne parvenant à dominer l'ensemble. La persistance de nombreux rejets faiblement développés autorise temporairement des allongements parfois importants des tiges.

Le système racinaire se limite à un complexe absorbant qui nourrit les tiges déjà en place (planche 2-2b). L'investissement dans la régénération d'une véritable charpente racinaire est faible voire nul, celui pour la croissance aérienne est maximal. L'arbre est en déséquilibre physiologique et mécanique sans que ce dernier ne soit apparent au niveau aérien dans les premières années suivant la plantation.

Comportement d'une charpente grêle dans un environnement contraignant

Dans un environnement limitant une petite charpente produit un petit nombre de rejets : la présence d'une petite quantité de rejets est en adéquation avec les faibles potentialités qu'offre le milieu. La sélection entre rejets est rapide, leur développement est moins exigeant, leur croissance plus faible et plus progressive.

Sur une charpente faible ou partiellement vivante (planche 2-3abc), dans un milieu contraignant la régénération racinaire pourra être pleinement accomplie et conforme en peu de temps. Le système racinaire sera nanifié, sa charpente faible, peu étalée, mais parallèlement les allongements caulinaires et le déploiement du houppier pourront être à l'image de la faiblesse de l'enracinement quand les quantités de tiges et racines en place sont en équilibre.

3.6.3 HYPOTHÈSE SUR LES CORRÉLATIONS ENTRE REPRISE AÉRIENNE ET REPRISE RACINAIRE DE SUJETS TRANSPLANTÉS

Il existerait plusieurs formes d'équilibres dans la régénération des deux sous unités de la plante conditionnés par la qualité de l'enracinement et de l'environnement cultural :

L'équilibre de survie

La survie de la plante serait autorisée par un premier état d'équilibre minimaliste permettant l'allongement des tiges dans les premières années suivant la plantation sans que la régénération racinaire ne soit pour autant performante. La conséquence d'un tel état est la persistance d'une croissance aérienne jugée efficace pour les premières années de culture en parallèle d'un déploiement souterrain faible. Cet équilibre instable est favorisé par l'accompagnement des arbres dans les années suivant la plantation (taille et arrosage). Il parait en effet improbable que de tels individus révélant une déficience manifeste de l'enracinement résisteraient à quatre années de culture sans arrosage. L'observation d'arbres cultivés dans des conditions similaires sur d'autres sites nous démontre que l'arrêt brutal de l'arrosage peut stopper définitivement la croissance d'individus ayant manifesté une bonne dynamique de reprise dans les quatre premières années après plantation.

Le premier risque encouru par un sujet en équilibre de survie est l'apparition d'une crise de transplantation différée et non interprétée en tant que telle. Le deuxième risque est le maintien d'une plantation dont les allongements aériens vont progressivement s'altérer et dont la tenue mécanique, elle, restera douteuse.

L'équilibre de reprise

La survie et le développement harmonieux et parallèle des deux sous unités de la plante (enracinement et houppier) requièrent une fourniture végétale de bonne qualité à fort potentiel, donc peu travaillée en pépinière, et dont l'évolution sera dictée par l'environnement.

A l'équilibre de reprise (deuxième état d'équilibre), la crise ne sera différée que si le choix de l'espèce est inadaptée au site de culture, c'est-à-dire si l'environnement cultural extérieur s'avère à terme limitant de la croissance en nombre et diamètre des racines qui auront à s'y développer.

Ces différents états d'équilibre n'assurent pas à terme la même forme d'autonomie pour les arbres. La sortie de la crise de plantation n'est pas forcément accomplie quatre années après l'installation d'une fourniture végétale plantée en 18-20 si cette dernière bénéficie d'irrigation. Même quand la survie peut être assurée, le développement et la tenue mécanique peuvent être mis en défaut. Le suivi de croissance des plantations doit être conduit au-delà de la période d'irrigation.

La prise en compte des allongements de la partie aérienne ne permet pas à elle seule de rendre compte des différents états d'équilibre décrits ci-dessus quatre années après la plantation des arbres. Le diagnostic d'une reprise véritablement performante, d'une croissance efficace et parallèle des deux sous unités de la plante, requiert certainement la mise en œuvre d'outils de diagnose plus élaborés intégrant une partie des indicateurs de reprise toujours en cours de tests pour validation. En effet la prise de données biométriques (effectif des axes, masse, surface, diamètre, surface assimilatrice etc.) permettrait certainement de quantifier ces états d'équilibre.

4 BILAN DE L'ÉTUDE : CARACTÉRISATION DU PROCESSUS DE REPRISE DES ARBRES

La reprise est une anomalie, une déstructuration du développement, consécutive à l'arrachage et pour cette raison doit être évaluée en terme aussi bien qualitatif que quantitatif : catégories de tiges ou racines régénérées, quantité, position, longueur, diamètre, cinétique de croissance etc.

4.1 LA REPRISE APRÈS TRANSPLANTATION : PROPOSITION DE DÉFINITION

La reprise d'un arbre transplanté est une anomalie dans le développement provoquée par un évènement particulier, l'arrachage. Cette anomalie se traduit par l'arrêt puis le redémarrage du développement pour restaurer à terme le potentiel de croissance et de développement initial, soit les 2 capacités suivantes :

- **La capacité à croitre**, grandir, grossir, et exprimer une vigueur d'ensemble rendant compte de la fertilité de la station de culture. La vigueur est estimée par la longueur des pousses annuelles et le diamètre des tiges d'une part et par le nombre et le diamètre des racines en croissance.
- **La capacité à construire et à organiser** l'ensemble des tiges et racines régénérées en un appareil végétatif complet conforme aux patrons de développement de l'espèce, apte à s'étendre et exploiter au mieux les ressources du site.

La « crise de transplantation » commence à l'arrachage et se termine lorsque le développement du plant est redevenu conforme au patron de l'espèce: elle comprend deux phénomènes distincts, la dégradation (planche 1 fig2A) et la réaction à la dégradation (planche 1 fig4A, 6B ; planche 2).

Ce n'est que lorsque ces deux phénomènes d'altération puis de réaction sont terminés, les tiges et racines nées ou transformées par la réaction s'organisant pour régénérer une architecture conforme aux patrons de l'essence, que l'arbre a complètement « repris ».

4.2 LES COMPOSANTES DE LA REPRISE

Les évènements de la reprise couvrent 3 phases successives susceptibles de se chevaucher partiellement dans le temps : l'altération, la réaction, la régénération.

4.2.1 LA PHASE D'ALTÉRATION (PLANCHE 1 FIG2A ; PLANCHE 2)

C'est la dégradation physique de la structure initiale et l'altération de son développement. Dans l'enracinement la destruction est immédiate, à l'arrachage. Dans le houppier elle est souvent progressive, d'origine indirecte et concerne des tiges insuffisamment alimentées en eau.

L'altération affecte:

- la croissance, le grandissement, le grossissement des tiges et racines en place et leur rythme d'allongement,
- le développement, le potentiel de construction ultérieure de la plante et éventuellement son état initial, par mort de certaines fractions périphériques du houppier ou de l'enracinement,
- la feuillaison soit la quantité, la surface et la pérennité du feuillage,
- l'absorption soit la quantité des chevelus racinaires produits.

Elle peut être chiffrée en termes de proportion de tige ou racine altérée ou de fonctions perdues (exploitation, absorption, photosynthèse par exemple). Ce sont généralement les parties périphériques, les plus éloignées du

collet, qui sont les plus affectées par l'altération, les tiges ou racines les plus centrales proches du collet ou situées en position médiane sur la charpente poussant le plus.

Sa durée varie de quelques mois à plusieurs années après la plantation selon l'état initial du sujet, ses conditions de culture, et surtout l'intensité de la « taille » racinaire réalisée par l'arrachage. Elle est plus importante en volume et durée dans l'enracinement que dans le houppier. L'impact des mutilations racinaires est d'autant plus élevé que la force du sujet et le nombre des contre-plantations subies sont élevés.

4.2.2 LA PHASE DE RÉACTION (PLANCHE 1 FIG 4A , 6B ET 3B ; PLANCHE 2)

Elle se produit si l'intensité de l'altération dépasse une valeur seuil et si le sujet a conservé, malgré l'arrachage, des capacités de croissance suffisantes pour réagir. Toujours manifeste dans l'enracinement arraché (sauf mortalité de l'ensemble), elle peut être inexistante ou très peu perceptible dans le houppier si :

- l'altération a été très faible
- A contrario l'altération a été si forte que les capacités de croissance de l'ensemble des tiges de la couronne ont été très fortement réduites.

La réaction se traduit par :

- le développement de rejets (tige et racine) parfois jusqu'à la base du tronc au niveau du collet,
- la transformation morphologique des tiges ou racines intactes qui tendent à remplacer celles détruites,
- le bouleversement des hiérarchies en vigueur avant l'arrachage, à l'échelle de l'axe blessé, du système ramifié ou de l'ensemble de la couronne (houppier ou enracinement)
- un regain de vigueur de l'allongement et de l'épaississement en comparaison de ceux en cours lors de l'altération, tendant à compenser la perte de volume et masse des fractions amputées ou altérées.

La durée de la phase de réaction est fonction (i) de la durée et (ii) de l'intensité de la phase d'altération qui la précède. Elle se manifeste le plus souvent durant 1 à 5 ans, et peut se prolonger sur 15 ans voire plus aussi bien au niveau du houppier que de l'enracinement en cas de contraintes culturales (ex. défaut de taille d'accompagnement, d'arrosage, maladie, etc.).

4.2.3 LA PHASE DE RÉGÉNÉRATION (PLANCHE 1 FIG 2B, 2C, 3C, 5C1; PLANCHE 2)

C'est la suite de la phase de réaction. Elle n'a lieu que si le plant accidenté a recouvré l'essentiel de ses capacités de croissance pendant la phase de réaction. Elle se caractérise par l'amorce de la construction de la couronne définitive de l'arbre (houppier enracinement), conformément aux patrons de son espèce avec :

- une redistribution de la vigueur d'ensemble du plant en faveur des parties périphériques et aux dépens des parties basales les plus proches du collet,
- une restauration du rôle organisateur de la/des-flèche(s) dans le houppier et des racines charpentières dans l'enracinement,
- une sélection forte parmi l'ensemble des tiges et racines en croissance : une fraction infime d'entre elles deviennent pérennes à long terme et restaurent la charpente
- une différenciation morphologique et fonctionnelle nette et ordonnée des tiges et racines, selon leur position dans l'ensemble ramifié,
- la restauration de la croissance et du plan de développement de référence de l'espèce.

La régénération sera d'autant plus tardive que la réaction a été importante et durable. Elle peut durer de quelques mois à plusieurs années ou ne jamais s'installer.

4.3 QUALITÉS DES PLANTS ET DE L'ENVIRONNEMENT FAVORISANT LA REPRISE

4.3.1 REPRISE AÉRIENNE

Trois qualités principales ont un effet favorable sur la restauration de la vigueur après transplantation :

- le patrimoine génétique du plant, certaines espèces « reprenant » facilement au contraire d'autres,
- l'âge ontogénique-ou phase de développement : plus un plant est juvénile, plus sa reprise est complète, rapide, directe et durable,
- le caractère élevé de la vigueur d'ensemble du plant et le fait qu'elle ait augmenté d'une saison à l'autre avant l'arrachage.

Trois propriétés structurales favorisent le rétablissement des modalités normales de développement :

- la tendance de l'espèce à ne pas former de fourches récurrentes favorise le rétablissement d'une hiérarchie centrale,
- le caractère unitaire de l'architecture du plant lors de l'arrachage, soit l'existence d'un nombre réduit de tiges maîtresses et l'état intact-non taillé, abîmé ou desséché des sommets des tiges maîtresses,
- l'absence de « mémoire » des tailles de formation passées qui tendent à augmenter le nombre de rejets à apparaître en phase de réaction.

4.3.2 REPRISE RACINAIRE

A l'échelle de la racine

Au niveau de la racine, la performance de la régénération est avant tout conditionnée au diamètre de la section racinaire[10].

Sur sections inférieures à 2 cm de diamètre.

La fermeture de la plaie est généralement rapide, optimale si le milieu est non limitant. Les processus de cicatrisation, régénération des plaies et développement de rejets débutent successivement puis se chevauchent ponctuellement dans le temps.

Sur plaies de diamètres supérieurs à 5 cm

La régénération est souvent mise en échec total. Les phases d'altération et réaction s'expriment simultanément, de manière prolongée dans le temps, sans aboutissement. L'abondance de rejets n'est pas la manifestation de l'accomplissement de la régénération. Elle révèle au contraire :

- une concurrence forte entre rejets pour le partage des ressources carbonées provenant de la photosynthèse,
- un blocage de leur développement et leur différenciation
- l'accomplissement de la seule fonction d'absorption.

---

[10] Les valeurs moyennes des diamètres de plaies données ci-dessus sont à moduler selon l'essence et la vigueur de la croissance racinaire :

- Elles peuvent être plus faibles chez des espèces réputées difficiles à la reprise racinaire.
- La valeur 2 cm peut être légèrement plus élevée chez des essences à développement racinaire très vigoureux chez lesquelles les racines naissent d'emblée avec des diamètres primaires importants avant de commencer à s'épaissir, les frênes faisant partie de ces essences.
- Ces valeurs sont également à moduler selon la catégorie racinaire ou la fraction d'enracinement concernée, les pivots perdant nettement plus précocement leurs aptitudes de régénération que les charpentières horizontales

Dans une telle situation la sélection des rejets est inopérante et leur production peut être renouvelée durant de nombreuses années sans que la racine ne se reconstruise.

Entre ces deux extrêmes, sur sections de diamètre intermédiaire (2-5cm)

La régénération peut être amorcée sans parvenir à son plein terme. Les rejets débutent leur développement mais demeurent inaptes à remplacer en volume, forme et fonction la portion amputée. Les plaies peuvent rester partiellement ouvertes et les traces de contre-plantations perceptibles 15 ans après la plantation. Cette inaptitude débouche le plus souvent sur :

- le développement de racines incomplètement différenciées, constituant au mieux des racines hybrides entre deux classes morphologiques et fonctionnelles (régénération oblique à horizontale sur plaie de pivots initialement verticaux)
- l'absence de régénération d'une véritable charpente horizontale et verticale, l'inexistence de rejets sur les pivots et la perte correspondante des aptitudes d'ancrage et d'exploration des couches profondes du sol.

A l'échelle de l'enracinement

A l'échelle de la couronne racinaire dans son ensemble, trois paramètres majeurs conditionnent la performance de la reprise:

L'état initial de la charpente et l'ampleur de sa dégradation

La reprise est d'autant plus rapide et efficace que l'enracinement est jeune, bien équilibré, peu mutilé (peu de plaies et de petit diamètre). De bonne qualité, elle permet alors une exploration horizontale et verticale importante et rapide du milieu si ce dernier n'est pas contraignant. Si la charpente est fortement mutilée (nombreuses plaies de gros diamètre), la reprise est moindre, avec un déficit d'exploration et parfois d'ancrage de l'arbre.

L'adéquation entre la force de la charpente racinaire et la disponibilité des ressources du milieu

En condition contraignante et à force de plantation équivalente, une charpente menue, produisant moins de rejets, moins vigoureux peut permettre à l'arbre de limiter la concurrence entre ses rejets et de sortir plus rapidement de la « crise de transplantation», là où une charpente massive réagit plus vigoureusement en développant beaucoup de rejets dont l'évolution sera bloquée sous la contrainte du milieu.

En conséquence, la multiplicité des racines absorbantes en sortie de motte puis dans la fosse de plantation n'est pas un critère de qualité de la reprise et peut être révélatrice d'une situation de blocage précoce en phase de réaction.

L'équilibre entre partie aérienne et enracinement

Un déficit de régénération de l'enracinement peut ne pas se traduire extérieurement par un déficit immédiat de la croissance dans le houppier si la quantité de rejets racinaires suffit à alimenter les premières étapes de la croissance des tiges. Le déficit de régénération racinaire peut se manifester de manière différée et compromettre le développement futur de l'arbre à moyen terme (ex : production de rejets racinaires en grand nombre, qui voient leur développement ultérieur bloqué).

Il est essentiel de parvenir à différencier par le diagnostic aérien le sujet en phase de réaction racinaire de celui ayant quitté cet état et déjà en phase de régénération racinaire. Pour cela, l'accompagnement des arbres et le diagnostic de leur reprise devraient s'étaler sur une période d'autant plus longue que la force des arbres à la plantation est importante et couvrir plusieurs saisons de croissance après l'arrêt des apports d'eau. Ces durées sont à ajuster à chaque couple espèce -force de plantation.

4.4 VERS UNE TYPOLOGIE DES FORMES DE REPRISE

La reprise est simplement une forme particulière d'anomalie du développement causée par l'arrachage. A beaucoup d'égard les arbres arrachés se comportent comme des sujets accidentés par d'autres agents (creusement de tranchée, dessèchement ou ennoiement brutal et durable du sol, mise en lumière, foudroiement, etc.). L'intensité et la durée des anomalies de croissance et développement induites par l'arrachage sont très variées de sorte que la gamme des réponses de reprise est très large : de la simple réduction fugace de la vigueur jusqu'à la disparition complète de la couronne éventuellement suivie de la régénération d'un nouveau sujet rejetant de la souche d'origine. Les variations les plus importantes touchent la durée et l'intensité des phases d'altération et de réaction.

4.4.1 FORME DE REPRISE AÉRIENNE

Une altération intense de la partie aérienne causée par une forte dégradation fonctionnelle de l'appareil racinaire détruit presque complètement les relations hiérarchiques entre tiges (dominance, acrotonie, préséances diverses) organisant le houppier. C'est un nouveau développement qui commence. La réaction traduit cet état désordonné : les rejets semblent pousser indépendamment les uns des autres. Ce n'est alors que lentement et progressivement que les relations hiérarchiques normales se remettent en place : entre certains rejets seulement, puis entre groupes de rejets qui s'organisent en « cimettes », et finalement-mais pas toujours- entre les différentes « cimettes. »

Si l'altération fonctionnelle et physique est au contraire très modérée, la réaction est peu marquée et le développement ne s'arrête pratiquement pas : il se poursuit presque comme avant l'arrachage. L'architecture aérienne qui en résulte est très semblable à celle d'un sujet non arraché.

Quand l'altération est à la fois intense et prolongée, la dégradation des parties périphériques est forte (flèche et enracinement). Les rejets développent un houppier ou un enracinement de volume restreint, plus proche du collet que ne l'étaient la couronne ou l'enracinement d'origine. Cette réduction affecte donc les dimensions du sujet (hauteur de la couronne, déploiement latéral et profondeur de l'enracinement).

4.4.2 FORME DE LA REPRISE RACINAIRE

Les jeunes enracinements (sujets de force 6-8 à 12-14)

Les phases d'altération et de réaction sont fugaces et de faible intensité sur les enracinements de baliveaux ou de toutes jeunes tiges ayant subi un à deux arrachages après le repiquage du jeune plant. L'architecture d'origine est rapidement restaurée. Sur ces jeunes enracinements, peu étendus, peu volumineux, peu fournis en racines ligneuses, dont les plaies ont des diamètres variés et globalement faibles (<2 cm), la croissance vigoureuse d'un petit nombre de régénération détourne à son profit l'essentiel des ressources carbonées vers les plaies et participe activement à leur cicatrisation. Ainsi le développement reste privilégié au niveau des plaies et d'ampleur limitée en amont de ces dernières confortant alors la nutrition des rejets de taille. Parce qu'elles sont peu nombreuses, les quelques plaies de gros diamètres n'épuisent pas les ressources carbonées disponibles pour la croissance de nombreux rejets avant que ces derniers ne parviennent à restaurer la moindre hiérarchie entre eux.

Les enracinements plus âgés

On observe deux comportements extrêmes, correspondant à deux types de fournitures végétales produites en pépinières d'élevage selon deux itinéraires culturaux opposées:

Charpentes massives peu ramifiées

Cet état est celui de plants vigoureux laissés en libre croissance insuffisamment contre-plantés ou chez lesquels la taille de contre-plantation a été faite en même place que les précédentes (n-1 ; n-2), voire en amont de ces dernières (contreplantation remontante). Ces enracinements sont généralement dépourvus de racines de petits diamètres, et de fait déficitaires en racines absorbantes. Ils sont dotés d'un nombre

relativement restreint de grosses racines, portant des plaies de diamètres élevés (de 3 à plus de 5 cm), montrant les plus grandes difficultés de régénération. La phase d'altération est durable, de forte intensité et chevauche la phase de réaction, l'ensemble pouvant se prolonger sans que la phase de régénération ne s'accomplisse efficacement. La régénération des plaies est le plus souvent mise en échec (planche 2 -2b). Leur évolution est étroitement conditionnée à la quantité de rejets développés et à la disponibilité des ressources de l'environnement.

Enracinements composés d'une grande quantité de racines et plaies de diamètres tous équivalents

Cet état est celui de sujets très travaillés en pépinière. Leur enracinement s'apparente à une énorme « tête de chat » racinaire, conséquence de tailles racinaires rapprochées à la fois dans l'espace et le temps sur des sujets ne subissant pas de contraintes nutritionnelles en pépinière. La richesse de l'environnement de culture ne favorise pas la sélection entre rejets, ni la restauration d'une hiérarchie entre eux, ni l'expression d'une régénération conforme des parties mutilées. De tels enracinements, prématurément vieillis, s'apparentent à une plaie.

Sur ces enracinements âgés, l'abondance de la production de rejets bien en amont des plaies (développement retardé) vient souvent aggraver la concurrence entre rejets nés au niveau des plaies renforçant l'inaptitude de ces derniers à la sélection. Les rejets nés en amont des plaies détournent à leur profit les ressources métaboliques nécessaires à la régénération des plaies, plus périphériques, bloquant ainsi leur évolution. Incapable de régénérer sa charpente mutilée, l'arbre survit par le seul fait du développement retardé. Selon les aptitudes de l'espèce, le potentiel de croissance du sujet et les ressources qui lui sont offertes, la motte évolue soit vers un dépérissement soit a contrario vers la construction d'un nouvel enracinement à partir des rejets situés bien en amont des plaies (descente de cime racinaire).

Entre ces deux types, la majorité des enracinements

Entre ces deux extrêmes se situe une très grande partie des enracinements, particulièrement ceux chez lesquels les réponses aux tailles et contre-plantation successives n'ont pas toujours été parfaitement maitrisées. Ce sont des sujets cumulant le plus souvent les deux grands groupes de défauts précédemment énumérés dans des portions différentes de leurs enracinements.

La coexistence d'un petit nombre de racines de diamètres variés, réparties en effectif équilibré dans l'ensemble du volume racinaire est une garantie du potentiel régénératif de l'enracinement dans son ensemble et de sa sortie rapide de la crise de transplantation.

Cet état est celui d'enracinement jeune appartenant à des sujets de force inférieure à 18-20 le plus souvent.

La crise de transplantation se prolonge chez les sujets plus volumineux. L'avenir des rejets de régénération est fortement conditionné par la concurrence trophique et la hiérarchie qui s'installent entre eux pour la distribution des réserves carbonées fournies par l'arbre.

Particulièrement exacerbé sur les souches massives, le développement de rejets en amont des plaies peut venir aggraver cette concurrence entre rejets et favoriser le développement d'un système racinaire de « survie » inapte cependant à régénérer les parties amputées. Ce processus s'apparente à celui d'une descente de cime racinaire, accélère la dégradation de l'enracinement d'origine mais ne débouche que rarement sur la restauration d'une véritable nouvelle charpente.

4.5 UTILITÉ ET LIMITES DU DIAGNOSTIC DE LA REPRISE AÉRIENNE – AUTONOMIE HYDRIQUE ET CAPACITÉS DE GRANDISSEMENT

Poser le diagnostic de la reprise aérienne d'un sujet signifie que ce dernier a restauré ses potentialités de croissance et développement dans les conditions culturales qui sont les siennes sur la période d'observation (parachèvement et/ou confortement le plus souvent). Ce diagnostic ne présume pas des capacités ultérieures de l'arbre à croître et se développer en dehors de sa fosse de plantation. Il rencontrera alors des conditions de culture différentes et presque toujours moins favorables en terme de fertilité physico-chimique et hydrique par exemple.

4.5.1 LIMITE N°1 AU DIAGNOSTIC DE LA REPRISE : AUTONOMIE HYDRIQUE

Le diagnostic de reprise aérienne ne signifie donc pas toujours que l'arbre a acquis son autonomie hydrique, ni qu'il saura faire face à une prochaine sécheresse exceptionnellement marquée en durée ou intensité.

Seule une voire plusieurs années de culture sans arrosage peuvent apporter la preuve que l'arbre a restauré sa capacité à extraire suffisamment d'eau du sol pour poursuivre sa croissance « normalement ».

Pour une fourniture plantée en 18-20, une progression marquée de la vigueur des tiges durant un minimum de 3 saisons successives après plantation est un témoin fiable de la reprise, quand elle est accompagnée, sur cette période de la réduction puis de la disparition totale des apports d'eau par arrosage.

4.5.2 LIMITE N°2 AU DIAGNOSTIC DE LA REPRISE : ESPÉRANCE DE GRANDISSEMENT ET GROSSISSEMENT DE L'ARBRE

Le diagnostic de reprise aérienne réalisé à l'issue de la période de référence ne signifie pas non plus que le plant atteindra finalement les dimensions escomptées lors de la composition du paysage. Il signifie seulement que le plant est à nouveau capable d'exploiter les ressources du sol pour poursuivre sa croissance. C'est-à-dire :

- que sa croissance sera faible si les ressources le sont, auquel cas l'arbre sera nain
- que sa croissance pourra être forte si les ressources du sol sont abondantes, le plant pouvant éventuellement devenir un géant pour l'essence.

4.6 RECOMMANDATIONS AUX MAITRES D'OUVRAGE ET MAITRES D'ŒUVRE D'UNE JEUNE PLANTATION

L'étape clé de la reprise d'un végétal transplanté est sans conteste la reprise ou régénération de son enracinement. Si cette dernière est satisfaisante, les défauts de conformation des houppiers pourraient être corrigés par une taille appropriée, l'inverse étant rarement possible. En conséquence le choix de la fourniture devrait être basé en priorité sur des critères de qualités des enracinements.

Sur le choix de la fourniture végétale

Le conditionnement en motte ou conteneurs :

- limite le volume des enracinements
- empêche de sélectionner-refuser- individuellement les végétaux sur des critères de qualité racinaire,
- interdit la pratique d'une taille de correction des défauts racinaires induits par le parcours en pépinière,
- empêche de quantifier les besoins de rééquilibrage aérien/racinaire et de les satisfaire par une taille appropriée.

La fourniture conditionnée en racine nue est à privilégier en raison des avantages suivants :

- A force équivalente elle permet de récupérer un plus grand volume d'enracinement à l'arrachage que le conditionnement en motte
- Elle permet d'en apprécier de visu la qualité et le potentiel de reprise
- Elle donne l'occasion si besoin de pratiquer des tailles raisonnées de rattrapage de défauts ou de rééquilibrage de volume aérien/racinaire
- Elle permet d'éviter la problématique de gestion des interfaces motte-fosse et de ruptures de flux hydriques à ce niveau, source de nombreux défauts précoces de reprise racinaire
- Elle permet à la plantation de s'affranchir plus rapidement de l'irrigation (même si cette dernière requiert pour démarrer une plus grande attention pour éviter tout stress hydrique dans les toutes premières saisons de plantation).
- La jeunesse et la meilleure qualité des végétaux leur permettent de gagner rapidement en force et développement (même si la faiblesse de la force peut paraitre désavantageuse à court terme du point de vue paysager).

La banalisation de la plantation de gros sujets (force > 20) conditionnés en motte plusieurs fois contre-plantés a rendu le dispositif de plantation plus complexe à gérer en multipliant ses points de vulnérabilité, que sont :

- La réaction du système racinaire aux tailles de contre-plantation répétées, réaction cachée dans la « boite noire » que représente la motte
- La maitrise de la continuité hydrique entre les 3 compartiments de nature pédologique différente que sont la motte, la fosse et l'encaissant.

Sur l'évaluation de la reprise

L'évaluation indirecte de la performance de la reprise racinaire par l'observation de la quantité et de la vigueur des tiges ne peut être conduite de manière satisfaisante que dans les conditions suivantes :

- La fosse n'offre pas surabondance de ressources hydriques et minérales. Ainsi l'exploration de l'environnement externe à la fosse en sera d'autant stimulée et les capacités d'adaptation du végétal à ce nouveau milieu seront affichées au plus tôt,
- Les opérations de taille des tiges et racines ont été limitées en nombre et intensité au cours du parcours cultural jusqu'à la plantation et ne dégrèvent pas le potentiel de développement ultérieur. En effet, une taille trop sévère induit une réaction anormalement forte mobilisant, pour la croissance vigoureuse des rejets, une grande partie des réserves qui devraient normalement rester stockées dans la charpente de l'arbre. La vigueur est alors révélatrice de la violence de la taille et non de la performance de la reprise.

Ces diagnostics de reprise réalisés avant réception définitive sont provisoires : ils n'attestent pas que les arbres soient autonomes sur le plan hydrique ni qu'ils atteignent les dimensions de référence pour l'espèce plantée dans le site considéré. De tels diagnostics ne peuvent être établis que plus tard bien et après l'arrêt de l'arrosage.

Sur les exigences de reprise

Selon les objectifs recherchés par les aménageurs des niveaux différents de reprise peuvent être exigés lorsqu'on plante des arbres :

La « Reprise » minimale :

Elle est exigible si l'arbre planté doit survivre transitoirement mais surtout faire « bon effet » sur le site durant quelques mois à quelques années seulement en conservant ou renouvelant normalement son feuillage. Si nécessaire cet arbre doit être arrosé même fréquemment et abondamment. Elle s'apparente à la survie temporaire et non à la culture durable.

La Reprise partielle :

L'arbre planté doit survivre, devenir autonome à l'égard de l'eau, se développer et pousser. Mais il peut atteindre in fine des dimensions (hauteur, hauteur sous couronne, largeur de la couronne) et une longévité largement inférieures à ce qu'on peut attendre de sujets de cette essence sur le site de culture. La vitesse à laquelle ces dimensions doivent être atteintes compte peu.

La Reprise complète :

L'arbre planté doit devenir autonome à l'égard de l'eau, se développer et atteindre in fine des dimensions (hauteur, hauteur sous couronne) et une longévité conformes à ce qu'on peut attendre de sujets de cette essence sur le site de culture.