

RAPPORT FINAL DU PROJET
SIMULATION DE L'ÉVOLUTION DU SYSTÈME RACINAIRE
DE SEMIS D'ÉPINETTE NOIRE (*Picea mariana* (Mill.) BSP)
LIVRABLES CULTIVÉS EN RÉCIPIENTS AU CENTRE
SYLVICOLE DE FORESTVILLE INC.:

PARTIE I: INTRODUCTION ET REVUE DE LITTÉRATURE

PAR

Daniel Lord, professeur
Jean-François Boucher, étudiant en biologie
Denis Walsh, biologiste
Jacques Allaire, agronome
Daniel Gagnon, tech. horticole

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À CHICOUTIMI
555 Boul. de l'Université
Chicoutimi (Québec)
G7H 5Y1

COMPAGNIE DEMANDERESSE:
CENTRE SYLVICOLE FORESTVILLE INC.

Responsable: Hugues McNicoll, directeur général,

ORGANISME PARTICIPANT:
LE CNRC, PROGRAMME PARI-L

Chicoutimi , le 5 juin 1992

INTRODUCTION

Les conditions climatiques particulières qui prévalent au Centre Sylvicole Forestville Inc. (CSF) ne permettent pas de toujours rencontrer les exigences du Ministère des Forêts du Québec (MFO) concernant les critères de qualité du système racinaire (McNicoll, communication personnelle). L'arrivée tardive du printemps liée à un climat plus maritime qu'ailleurs au Québec explique en bonne partie les retards des plants lorsque la date de livraison prévue au contrat est atteinte. Par exemple, une partie de la production d'épinette noire du CSF livrable en 1990 a été refusée par le MFO sur la base d'un développement inadéquat du système racinaire des semis. L'équipe du centre de production a tout de même continué d'entretenir les semis afin de les livrer l'année suivante. Cependant, le MFO refusa à nouveau ces plants prétextant cette fois-ci que la formation d'un trop grand volume racinaire durant l'année supplémentaire augmentait de façon importante les risques de choc au reboisement et la possibilité de nanisme lors des années subséquentes à la plantation.

Cette décision en regard de l'évaluation de la qualité des lots de plants forestiers soulève les questions suivantes. Quel est le patron théorique de développement du système racinaire de l'épinette noire? Est-ce que le mode de culture utilisé permet de se conformer à ce patron? Comment évaluer la viabilité et le potentiel de reprise des semis?

L'équipe de recherche en sericulture de l'Université du Québec à Chicoutimi (UQAC) a donc reçu du CSF le mandat de répondre à ces questions. Les objectifs du travail sont les suivants:

- 1) Décrire le patron théorique de développement du système racinaire de l'épinette noire (*Picea mariana* (Mill.)BSP) à partir d'une revue de la littérature scientifique.

- 2) Estimer la viabilité et le potentiel de reprise de la population de semis non-livrables suite à la fonte des neiges au printemps 1991.
- 3) Évaluer l'état du système racinaire avant et après le début de la période de croissance de la pousse annuelle de l'année 1991.
- 4) Fournir une opinion quant à la pertinence de refuser des semis au volume racinaire trop important selon les allégations du MFO.

L'hypothèse retenue est la suivante:

"Le fait que le volume racinaire des semis d'épinette noire soit très élevé avant reboisement n'influence pas significativement le futur du plant."

L'équipe de l'UQAC avance cette hypothèse pour un certain nombre de raisons. Premièrement, elle travaille depuis plusieurs années en recherche en production de semis en récipients pour le reboisement. Des semis avec des masses racinaires proportionnellement plus élevées que celles retrouvées sur les semis non-livrables du CSF ont déjà été produits dans les serres de recherche de l'UQAC. Après plantation sur les terrains de l'institution, ces semis se sont très bien comportés. De plus, selon les membres de l'équipe, le développement après plantation du système racinaire de l'épinette noire dépend beaucoup plus des racines adventives qui se formeront à la base de l'hypocotyle et de la tige. Ces racines ont d'ailleurs déjà commencé leur développement au moment de la plantation, étant présentes à l'intérieur des carottes de tourbe supportant les semis en récipients. Enfin,

certaines travaux menés sur des plants adultes dont le système racinaire a été déterré démontrent que ce système se développe surtout autour de plusieurs racines adventives, et non pas de la racine pivotante comme dans le cas du pin gris par exemple.

Le rapport final est divisé en deux parties distinctes mais complémentaires. La première partie présente une revue de littérature exhaustive sur le sujet (objectif 1) et complète le premier cahier. La seconde fournit les résultats des différentes expériences réalisées pour atteindre les trois autres objectifs et constitue le second cahier.

REVUE DE LITTÉRATURE

L'objectif de cette partie du travail est de produire une revue de études produites concernant le système racinaire de l'épinette noire cultivée en récipients. Afin de se faire une idée plus globale du sujet, le document est divisé en quatre sections. Un bref rappel des normes de qualité exigées par le MFO constitue la première partie. Elle est suivie par une revue de littérature portant sur les 3 thèmes suivants: la caractérisation de la croissance racinaire chez les conifères; la dynamique de la croissance racinaire dans la production en récipient; les méthodes d'évaluation de la qualité des plants.

Qu'est ce qu'un plant forestier de qualité?

Le Ministère des Forêts du Québec (MFO, anciennement Ministère de l'Énergie et des Ressources) a entrepris depuis 1984 un ambitieux programme de reboisement pour regarnir les aires forestières perturbées non régénérées naturellement. Ainsi, le nombre de semis reboisés est passé de 13 millions en 1983 à 250 millions en 1988 (Drapeau 1987). La culture des semis en récipients s'est rapidement imposée comme mode de régénération; des 242 millions de semis reboisés en 1989, 172,8 millions ont été produits en récipients, dont 86,2 millions d'épinette noire. (MFO 1991).

En 1983, le MFO a entrepris de confier à l'entreprise privée des contrats pour la production des semis en récipients. Les semis en récipients sont produits en tunnels l'été ou en serres chauffées et équipées d'un éclairage d'appoint et de ventilation forcée lorsque la période de croissance débute l'hiver. Dans le premier cas, la production débute à la mi-mai ou début

juin et la saison de croissance se poursuit jusqu'en septembre. Une deuxième année de croissance est nécessaire pour atteindre la taille requise et les plants doivent passer un deuxième hiver sur les parterres extérieurs avant d'être livrés (Margolis 1987).

Les semis sont évalués lors d'un inventaire qui est réalisé au cours des deux semaines qui précèdent l'envoi des plants sur les sites de reboisement. Le MFO utilise 15 normes et critères de qualité lors des inventaires de qualification des semis au moment de la livraison (Brouillette 1987). Ces normes sont basées sur le taux d'occupation et des critères morphologiques comme la hauteur, le diamètre de la tige, l'enracinement et la forme générale de la tige. Le système racinaire doit être suffisamment bien développé pour permettre l'extraction complète de la carotte de tourbe. Les semis ne doivent pas présenter des déformations racinaires ou une mauvaise répartition se traduisant par une masse racinaire située sur le côté de la carotte de tourbe; les semis doivent être bien ancrés et ne pas présenter des signes de faiblesses, des coudes, des racines entortillées ou spiralées; les racines qui se développent sous le récipients ne doivent pas être trop longues pour nuire à l'extraction de la carotte; des racines qui passent d'une cavité à l'autre sur le récipient, causant ainsi le bris de la carottes de tourbe, entraînent le rejet de ces semis.

Si les plants sont refusés parce qu'ils ne rencontrent pas les normes de qualité, le producteur peut toujours retarder la livraison d'une autre année en espérant que le gain de croissance permettra d'améliorer la qualité générale des plants. Cette situation c'est présentée à la Pépinière de Sainte-Luce au printemps de 1987 (Allard *et al.* 1988). La livraison de 375 000 plants d'épinette noire 2-0 cultivés en récipient IPL 45-110 a été retardée puisque ceux-ci ne rencontraient pas le critère de hauteur minimale (norme de 15 cm). Après la troisième année de croissance, l'équipe technique a procédé à des essais comparatifs (dosage des sucres

solubles et mesure du potentiel de croissance racinaire) sur les plants 2-0 et 3-0. Les dirigeants de l'entreprise ont alors décidé de détruire les plants 3-0 puisque ceux-ci avaient des réserves en carbohydrates et un potentiel de croissance racinaire plus bas que les plants 2-0.

Il n'est pas exceptionnel qu'un producteur de semis forestiers ne puisse rencontrer certains critères de qualité décrits dans le contrat d'approvisionnement. D'après Miron (1988), les difficultés des producteurs privés à rencontrer les normes d'acceptation des plants depuis 1980 sont dues pour une bonne partie à l'irréalisme de celles-ci. Les producteurs de plants ont comme argument que la qualité du semis dépend de facteurs qui échappent à leur contrôle: la qualité du semis est en partie liée à sa génétique alors que la qualité des semences fournies varie d'un lot à l'autre; le mode de culture en tunnel ou en serre ne met pas les semis complètement à l'abri des intempéries et des accidents climatiques puisqu'ils hivernent à l'extérieur; le type de récipient utilisé fixe des limites à la croissance du semis et le rapport entre le diamètre et la hauteur de la cavité serait inadéquat pour atteindre les dimensions exigées (Gauthier 1988). D'ailleurs, le MFO a corrigé certaines normes pour les rendre plus conformes à la réalité après consultation auprès des producteurs par le biais d'un comité consultatif (Miron 1988). Ce type de comité existe aussi au Nouveau-Brunswick et les participants de l'atelier sur la qualité des lots de plants forestiers qui s'est tenu à Frédéricton en mai 1983 en sont venus à la conclusion qu'il faut (1) resserrer les norme et inclure des écarts légitimes; (2) nommer un arbitre pour traiter des problèmes de qualité des lots; (3) établir des méthodes standards d'évaluation pour la qualité des lots et des plantations; (4) revoir et corriger périodiquement ces standards (Hallett et Cameron 1983).

Il n'en reste pas moins qu'il est difficile de définir ce qu'est un plant de qualité ce qui fait que les critères utilisés quelqu'ils soient sont souvent sujets à interprétation. La qualification des semis est basée le plus souvent sur des critères morphologiques. Ainsi, Langlois (1988) considère qu'il est illogique de produire dans des récipients IPL 45-110 des populations de plants avec des moyenne de masse racinaire supérieure à 550 mg pour l'épinette noire et de 700 mg pour l'épinette blanche. La hauteur moyenne des plants d'épinette noire à la fin de 2-0 devrait se situer entre 20 et 24 cm et le rapport tige:racine autour de 4,5. D'après Sutton et Tinus (1983), la qualité d'un lot de plants correspond au degré atteint par celui-ci dans l'échelle des objectifs de gestion forestière; de ce fait, une expression claire des objectifs à atteindre est un prérequis à la détermination de la qualité des lots. Pour Navratil *et al.* (1986), le terme qualité devrait être utilisé dans le sens de potentiel de survie et de croissance du semis après la plantation, lesquelles sont fonction des caractéristiques morphologiques ou physiologiques du semis. Cependant, les auteurs sont conscients qu'il n'y a pas unanimité sur le choix d'un caractère spécifique à évaluer; plusieurs procédures d'évaluation qui décrivent différents aspects du plants devraient donc être utilisées. Pour sa part, Langerud (1991) considère que le terme *viabilité* devrait remplacer les différents adjectifs servant à évaluer les semis. Selon lui, un test ne peut quantifier le niveau de qualité d'un semis en fonction des performances ultérieures sur le terrain puisque le succès de la plantation ne dépend pas uniquement du semis. L'établissement du semis peut échouer pour bien d'autres raisons que sa piètre qualité. Cet échec peut aussi résulter de sa viabilité trop basse pour le site où se fait la plantation. L'auteur conclue qu'il est nécessaire de changer le terme de qualité en viabilité avant que trop d'énergie soit investie dans des tests qui sont parfois corrélés parfois non corrélés à la performance en plantation. En plus des critères morphologiques, un test mesurant le potentiel de croissance racinaire est quelquefois effectué sur les lots de plants pour *quantifier* leur potentiel de survie et de reprise après plantation.

Cependant, l'interprétation des résultats n'est pas toujours évidente et ce type de test n'est utile en sylviculture que pour détecter des lots de plants qui sont soit moribonds, soit vigoureux (Sutton 1990). Par exemple, l'analyse des résultats préliminaires sur des plantations (sapin Douglas, pin lodgepole, épinette Engelmannii) de la région de Kamloops en Colombie Britannique ne montre pas de corrélation claire entre la capacité de croissance racinaire (exprimé en nombre de nouvelles racines de 10 mm ou plus) et le taux de survie et la condition des semis (Simpson 1987).

Caractérisation du système racinaire

Il n'existe pas de système de classification universel du système racinaire de plus, son étude est compliquée du fait qu'il est moins accessible que la partie épigée de l'arbre. Le système racinaire a une grande plasticité et son développement est influencé tant par des facteurs endogènes et exogènes que par l'interaction de la croissance des racines les unes sur les autres. Les facteurs exogènes sont surtout reliés aux caractéristiques du sol, comme sa densité, son degré de compaction, son taux d'oxygène, sa teneur hydrique, sa fertilité, etc. (Sutton 1991). La morphologie du système racinaire est conditionnée par la constitution génétique du plant, le niveau de concentration des régulateurs de croissance et l'apport de produit photosynthétiques. On reconnaît cependant un certain patron de développement qui peut être appliqué à la majorité des espèces ligneuses. Ainsi, Wilcox (1964 dans Kramer et Kozlowski 1979) parle de système racinaire hétérorhizique lorsqu'il est composé de longues et de courtes racines. Les longues racines comprennent la racine principale et les latérales du premier et deuxième ordre qui forment l'ossature permanente du système racinaire; elles peuvent augmenter de diamètre grâce au cambium secondaire. Par contre, les courtes racines

sont éphémères et leur durée de vie ne dépassent pas un à deux ans. Lyford et Wilson (1964 dans Kramer et Kozlowski 1979) préfèrent parler de racines ligneuses et non ligneuses. Le système racinaire est ainsi constitué d'un patron de racines ligneuses permanentes supportant un faisceau de racines non ligneuses de courte vie. Ordinairement, les racines sont classifiées en quelques types généraux: la racine pivotante qui croît rapidement vers le bas et pénètre profondément dans le sol; les racines primaires de surface; les racines latérales à croissance rapide (Kramer et Kozlowski 1979). Les racines sont dites adventives lorsqu'elles prennent leur origine sur un organe autre qu'une racine ou si elles se forment à l'extérieur du développement séquentiel normal du système racinaire (Sutton et Tinus 1983).

Chez les arbres, la racine pivotante est la première à émerger de la graine. La racine pivotante ne se développe pas chez toutes les espèces mais est surtout présente chez le genre *Pinus* ou chez les arbres qui ont des graines de grande taille comme le chêne (*Quercus*) ou le noyer (*Juglans*). Si elle est présente, la racine pivotante est très large juste sous le collet puis décroît rapidement de diamètre en profondeur. Les racines latérales peuvent venir de la racine primaire ou se développent de façon adventive à la base du tronc. Elles demeurent dominantes très longtemps. Les radicelles sont de courtes racines blanchâtres dont la durée de vie est très brève. Elles proviennent du réseau racinaire de base formant des embranchement en éventail (Gilman 1990a).

L'eau et les éléments minéraux sont absorbés par les radicelles. Dans les écosystèmes forestiers, 30 à 86% des radicelles sont recyclées annuellement et ces pertes représentent entre 63 et 77% de la production primaire nette des forêts de conifères (Fogel 1983). Ce recyclage constant des radicelles permet l'exploration de nouvelles zones de sol non encore exploitées par l'arbre, puisque l'absorption des sels minéraux et de l'eau se fait

immédiatement à l'arrière de l'apex des racines. La densité des racelles dans le sol dépend du potentiel hydrique du sol et de sa productivité. Dans les peuplements adultes de sapin Douglas étudiés en Hollande, la majorité des racelles meurent lorsque la pression hydrique du sol atteint -0,08 MPa. Dans les stations les moins productives, une plus grande quantité de carbone par surface terrière est allouée aux racelles comparativement aux stations plus productives. Dans ces dernières stations, la croissance des grosses racines est favorisée (Olsthoorn et Tiktak 1991a; 1991b). Si les racelles ($d < 1$ mm) ne représentent qu'une faible proportion de la biomasse, elles comptent pour 86 à 99% de la longueur totale du système racinaire. La longévité de celle-ci varie de un jour à quelques semaines (Lyr et Hoffmann 1967).

Les racines principales assurent l'ancrage de l'arbre. D'après Coutts (1987), un arbre ne requiert pour son support que quelques racines de gros diamètre à la base du tronc. Celles-ci se développent par la croissance secondaire d'un nombre limité de racines primaires présentes sur le semis. Leur formation résulte du développement de méristèmes apicaux racinaires d'un diamètre supérieur à la normale, lesquels constituent alors les axes principaux de développement suite à l'épaississement secondaire; puis ces axes se transforment en membres permanents du système racinaire ligneux. La formation de ces méristèmes apicaux protubérants est provoquée par des blessures infligées à l'axe racinaire principal de sustentation et par la proximité de la tige. La base de la racine pivotante et des racines latérales est considérée comme une partie fortement influencée par l'activité de la tige, ce qui produit des méristèmes racinaires apicaux de forte dimension et un épaississement secondaire accru. Les principaux axes racinaires compétitionnent entre eux pour les produits carbonés, d'où l'établissement rapide d'une dominance entre eux.

L'étude de Wagg (1967) montre que les systèmes racinaires des jeunes épinettes blanches qui croissent sur différents types de sol n'ont pas tous la même forme générale. Les variations morphogéniques résultent des différences dans l'orientation des racines individuelles, des variations texturales et structurales du sol, du nombre et de l'organisation des racines sur la souche et du taux de croissance relatif des racines entre elles. Le développement de racines multifasciculées, soit la superposition de différents faisceaux de racines secondaires se superposant les uns sur les autres lors de l'enfouissement de la tige par la tourbe ou des dépôts alluvionnaires, est fréquent.

Les espèces du genre *Picea* ont un système racinaire superficiel typique qui est très efficace pour l'absorption de l'eau sur les sols peu profonds et rocailleux. Le système racinaire de l'épinette noire a été étudié par Strong et La Roi (1983) qui ont excavé des spécimens d'arbres adultes. Le système racinaire de l'épinette noire est fait de racines latérales de surface distribuées radialement. Contrairement au pin gris, les spécimens d'épinette noire ne possédaient peu ou pas de racines fonctionnelles verticales. La plupart des racines étaient situées dans les 7 à 10 premiers cm de sol, la pénétration maximale ne dépassant pas 30 cm. Les radicelles forment la classe de racine la plus nombreuse et sont situées principalement dans la portion distale du système racinaire; elles comptent pour 4% de la biomasse totale de l'arbre. Le rapport biomasse épigée:racine est en moyenne de 0,45.

La distribution en surface des racines d'épinette noire se vérifie aussi dans le cas de plants provenant d'une plantation. La distribution des racines de semis 3+0 d'épinette noire plantés sur un loam sablonneux forme une hyperbole, le maximum de racines se retrouvant dans les premiers cm de sol puis décroissant rapidement en profondeur; les radicelles comptent pour 72% de la biomasse racinaire totale (Armson 1972). McLain (1981) a étudié le système

racinaire 10 ans après la plantation. Les semis d'épinette noire établis en tube Ontario avaient développé un système racinaire radial de surface où le développement de racines à la base du conteneur était virtuellement nul. Les deux tiers supérieurs étaient constitués de racines adventives et le tiers inférieur du système original. L'âge des racines variant de 3 à 8 ans, l'épinette noire développerait donc un système racinaire entièrement nouveau. C'est le développement de ces nouvelles racines adventives qui permet, à long terme l'ancrage et l'absorption de l'eau et des minéraux; les racines présentes au moment de la plantation cessent éventuellement de fonctionner comme composante majeure du système racinaire. McLain (1981) suppose que les conditions au moment de la plantation auraient favorisé l'émergence et le développement de ces racines adventives. L'enfouissement de la tige aurait pu être causé par une plantation trop profonde. La plantation aurait aussi pu être effectuée sur un terrain en pente où les débris organiques autour de la tige auraient maintenu des conditions d'humidité suffisantes au développement des racines adventives. L'auteur suggère que cette caractéristique de l'épinette noire (formation de racines adventives) devrait être favorisée lors de la plantation pour que le développement de l'arbre suive son cours normal.

Chez les autres espèces et genres, le patron de développement du système racinaire peut être fort différent. Par exemple, le système racinaire des pins se développe en profondeur; sur les sols profonds, son extension peut atteindre 3 m sous la surface du sol (Fayle 1975b). L'extension du système racinaire du pin rouge en plantation montre que la profondeur maximale est atteinte dans la première décennie et que l'extension horizontale maximum des racines était virtuellement complétée entre 15-20 ans (Fayle 1975a). L'analyse d'une plantation de 16 ans d'épinette de Sitka montre que la croissance racinaire est naturellement régulière et que cette espèce possède des mécanismes qui assurent que la structure du système racinaire soit plus ou moins étendue et étalée plutôt que résultat d'une croissance

aléatoire. Cependant, la croissance racinaire prend place dans un environnement hétérogène, ce dernier facteur étant la véritable cause de la variabilité finale du patron racinaire (Henderson *et al.* 1983).

La dernière information complémentaire qui sera discutée à propos du développement du système racinaire chez les conifères concerne l'existence d'une forte corrélation entre l'accroissement de la biomasse hypogée et celle de la biomasse épigée. En effet, le volume de sol occupé par les racines de semis de sapin Douglas 5 ans après la plantation est directement proportionnel à la biomasse épigée, alors que le rapport de la biomasse tige:racine est en moyenne de quatre (Newton et Cole 1991). En général, les arbres possèdent 20% de leur biomasse sous le sol à l'automne et un rapport tige:racine constant quelque soit leur taille. Durant une période de suppression prolongée, le ratio tige:racine a tendance à demeurer constant et à se maintenir au même niveau qu'à l'installation. Enfin, la compétition pour la lumière a pour effet de diminuer la biomasse totale sans influencer la répartition de celle-ci entre la partie épigée et la partie hypogée.

La culture des semis en récipients et la dynamique de la croissance racinaire

La culture de semis forestiers est très exigeante par rapport à d'autre type de culture car le producteur ne livre pas un produit final mais la matière première qui servira à ériger la forêt de demain (Langlois et Carrier 1984). Le producteur doit donc produire des semis qui rencontrent des critères de dimensions minimales tout en possédant des qualités intrinsèques leur permettant de survivre au choc de transplantation et de croître rapidement face à la compétition de la végétation concurrente.

Pour atteindre ces objectifs, le producteur doit connaître la dynamique de croissance de l'espèce et adopter des conditions culturales qui sont appropriées. L'expérience pratique enseigne qu'une croissance racinaire vigoureuse est nécessaire pour maintenir une croissance érigée soutenue et que les perturbations de la croissance racinaire se répercutent négativement sur la croissance de la tige. Il est très difficile de mesurer le développement du système racinaire puisque, contrairement à la tige, les racines ne sont pas directement accessibles. De plus, la dynamique de la croissance racinaire n'est pas en phase avec celle de la partie érigée.

Différentes études ont montré qu'il existe une relation entre la croissance érigée et la croissance racinaire. Chez le pin sylvestre par exemple, la croissance racinaire suit le même rythme de croissance que la tige la première année mais, durant la deuxième année, l'élongation intensive de la tige correspond à un ralentissement de la croissance racinaire (Mattsson 1986). Ceci suggère une compétition entre la tige et les racines pour les ressources carbonées disponibles. Les résultats sur la capacité de croissance racinaire de l'épinette blanche cultivé en récipient montre une relation entre la diminution de l'allongement racinaire et l'augmentation de l'allongement de la tige au printemps (Johnson-Flanagan et Owens 1985b). Pour l'épinette noire, sans être antagonistes, la masse racinaire s'accroît à un rythme élevé seulement lorsque la croissance en hauteur de la tige est pratiquement nulle pendant et après la phase d'aoûtement du semis (Langlois et Carrier 1984).

Dans un calendrier de production, il est important de tenir compte des phases de croissance entre les différentes parties du semis si l'on désire produire des plants équilibrés. Il semble que des mécanismes hormonaux régularisent le rapport racine:tige, probablement en

déterminant la distribution des nutriments. Les racines étant hétérotrophes, elles dépendent de la tige pour leur approvisionnement en carbohydrates (Lyr et Hoffmann 1967).

Le patron de différenciation du système racinaire a été étudié en détail chez quelques espèces de conifères, mais rarement sur des semis d'épinette noire produits en récipients. Le développement des racines chez l'épinette noire suit le patron suivant: les racines latérales de premier ordre se développent à partir du pivot, puis la prolifération de radicelles sur ces mêmes latérales coïncide plus ou moins avec l'émergence de racines latérales d'ordre plus élevé et à l'augmentation en diamètre des racines latérales du premier ordre (Langlois *et al.* 1983). Johnson-Flanagan et Owens (1985a) ont étudié en détail la morphologie du système racinaire de l'épinette blanche. Ces informations peuvent s'appliquer en partie à l'épinette noire. Le système racinaire des semis d'épinette blanche cultivées en récipients est formé d'un pivot et de plusieurs racines latérales. Le pivot possède une forte réponse géotropique et croît verticalement jusqu'à la base du récipient. L'élongation des latérales est horizontale jusqu'à ce que les parois du récipient n'entravent leur croissance, la croissance se continuant alors vers le bas. L'air à la base du récipient cause la mort des apex et ces racines cessent leur allongement. On distingue 3 classes de racines; (i) les racines allongeantes de couleur blanche et dépourvues de poils absorbants; (ii) les racines absorbantes qui initient des poils absorbants à proximité de la zone d'allongement; (iii) les racines brunâtres qui sont enveloppées d'une couche nécrotique et dont la coiffe est réduite et arrondie. La croissance des racines individuelles est cyclique, l'allongement se poursuivant pendant 2 à 3 semaines. Il y a alors arrêt puis brunissement acropétal de la racine. Ainsi, durant la saison de croissance, plusieurs stades de développement peuvent être observées. Les racines individuelles de l'épinette blanche ont un cycle de croissance indépendant opérant à l'intérieur d'une tendance globale de la croissance du système racinaire.

Le fructose, le glucose, le sucrose, l'amidon et le raffinose s'accumulent dans les racines dès le début de septembre. Ce phénomène d'accumulation permet de diminuer la formation de glace au cours de l'hiver par effet osmotique et par l'initiation de substances cryo-protectrices (ex. acides aminés) dans les cellules et biomembranes (Lambany et Langlois 1988). Simultanément, le brunissement des racines résultant de la formation d'une couche métacutinisée est observé (Johnson-Flanagan et Owens 1985b). Le brunissement des racines durant la phase d'aoûtement est un signe de la dormance des racines chez l'épinette blanche, quoique ce signe est insuffisant pour distinguer l'état de dormance de l'état de quiescence. La métacutinisation des racines accompagne ces deux processus; seul un test de capacité de croissance racinaire permet de distinguer les semis dormants des semis quiescents.

Chez l'épinette de sitka, les réserves d'amidon dans les racines sont la principale source d'énergie pour la formation de nouvelles racines après la plantation; la photosynthèse joue aussi un rôle mais à un moindre niveau. Par contre, chez le sapin Douglas, les produits photosynthétiques courants sont nécessaires pour la formation et la croissance de nouvelles racines, ce qui expliquerait que la première espèce est plus facile à établir en plantation (Philipson 1988). Lorsque les semis sont stressés suite à une manipulation vigoureuse au moment de la plantation, la capacité de croissance racinaire est beaucoup plus réduite chez le sapin Douglas, lequel montre alors un taux de survie très faible. Les dommages occasionnés au système racinaire causeraient la fermeture des stomates et, de ce fait, réduiraient la capacité photosynthétique et la formation de produits carbonés translocables. Chez le sapin Douglas, ces manipulations inhibent la croissance racinaire et l'établissement du semis, tandis que chez l'épinette de sitka les nouvelles racines peuvent être alimentées par les réserves d'amidon stockées préalablement dans les racines, ce qui permet l'établissement du plant et sa

récupération. À notre connaissance, aucune étude n'a été publiée montrant la relation entre le stockage des sucres et la reprise de la croissance racinaire chez l'épinette noire après plantation.

Le volume du récipient influence aussi la croissance du semis. Lors d'une production d'épinette blanche de 20 semaines, l'augmentation du volume du récipient de 10 à 131 cm³ a entraîné une augmentation simultanée de la biomasse du système racinaire et du rapport biomasse tige:racine (Carlson et Endean 1976). En fait, l'accroissement de la biomasse racinaire subirait une restriction dès que le volume du récipient est plus petit que 131 cm³, correspondant à l'intensité d'enracinement atteignant 0,77 mg de poids anhydre de racine par cm³ dans ce type de récipient.

Le cernage racinaire est parfois utilisé pour forcer le développement d'un système racinaire plus fibreux et plus compact, augmentant ainsi le taux de survie après plantation. Des essais de cernage avec le CuCO₃ sur l'épinette noire cultivé en récipient IPL 45-110 ont amené une diminution importante des malformation racinaires chez les semis, alors que la plupart des racines traitées ont une reprise de croissance suffisante (Langlois et Gingras 1990). Cependant la biomasse des racines est considérablement réduite. Selon Gilman (1990b), le cernage racinaire peut causer une réduction de la croissance épigée résultant d'un stress hydrique et de l'absorption limitée de minéraux, de même que de la synthèse réduite de régulateurs de croissance.

La forme du système racinaire des semis qui seront plantés est un sujet qui est débattu régulièrement par les différents intervenants forestiers. Quelle doit être la forme normale ou naturelle du système racinaire de l'espèce qui sera replantée? La production de plants en

réipients engendrent souvent des déformations au niveau des racines. On reconnaît plusieurs types de déformations racinaires: absence de pivot, étranglement, formation de chignons formés par la spiralisation d'une ou plusieurs racines autour de la souche, racines qui s'étranglent mutuellement quand elles grossissent ou racines qui remontent suite à un défaut d'arrosage (Marquestaut 1978).

Même si la forme et la dimension du système racinaire peuvent être manipulées dans la production de racine nue ou en réipient, la nature de la déformation racinaire est essentiellement différente; la déformation racinaire des semis à racine nue est attribuable principalement à des déficiences dans le contrôle de la qualité lors de la production ou lors de la plantation suite à des erreurs humaines ou des contraintes imposées par le sol ou les conditions du site; dans une production en réipients, la forme des racines est gouvernée principalement par le design du réipient (Van Eerden 1981). Cependant, la forme du réipient a un effet important sur les déformations racinaires puisque les rainures réorientent les racines vers le bas où se produit un cernage naturel au contact de l'air ce qui limite les possibilités de stangulation racinaire (Hiatt et Tinus 1974). Ces auteurs concluent que les déformations racinaires n'ont souvent pas d'effet majeurs sur de nombreuses espèces, sauf chez certaines espèces de pin plus sensibles

D'après Girouard (1988), la culture de plants de pin gris en multipot québécois 67-50 et 45-110 produit des déformations racinaires et bon nombre de racines se greffent pour former des chignons. Une étude morphologique des racines de plants cultivés 3 ans en réipient et 3 ans en plantation permet de déceler un manque de croissance en diamètre des racines latérales principales et une réduction de la croissance des mêmes plants.

Selon certains chercheurs, les déformations racinaires peuvent influencer négativement la reprise et la croissance des semis plantés. Par exemple, suite à une expérience où les racines de jeunes arbres forestiers (épicéa, Douglas, pin laricio de Corse) ont été déformées expérimentalement, les résultats montrent que les déformations racinaires n'induisent pas de retard de croissance de la partie aérienne jusqu'à 5 ans après la plantation. Cependant, le système racinaire est moins important que celui des plants témoins, malgré l'apparition de racines néoformées: ceci pourrait affecter la stabilité à long terme de l'arbre (Delaporte 1981). D'après Gagnaire-Michard *et al.* (1980), les déformations racinaires importantes modifient les échanges entre la parties aérienne et les racines, donc la répartition des principaux sucres solubles et de l'amidon. La déformation expérimentale des racines (racines en forme de L, en J, racines nouées) de jeunes arbres forestiers (épicéa, pin maritime) n'entraîne pas, trois ans après la plantation, de modification significative de la hauteur de la partie aérienne. Par contre, des différences très significatives de contenu en amidon et en saccharose dans les divers organes ont été mesurées. Au printemps, le taux d'amidon dans les racines des épicéas est nettement plus faible dans l'ensemble des racines des plants qui ont subis des déformations, ce qui pourrait possiblement entraîner des conséquences négatives à long terme sur la croissance de ces jeunes arbres.

Les conséquences de la déformation des racines sur la croissance ultérieure des arbres forestiers font donc l'objet d'opinions très contradictoires. Van Eerden (1981) considère que le système racinaire des arbres qui sont plantés devient de plus en plus "normal" et que la perte de vitalité des arbres plantés ne représente pas un problème majeur dans les forêts canadiennes. Il semble que la plupart des espèces puissent, dans une certaine mesure, surmonter une telle crise. Par exemple, le plant peut former des racines adventives au dessus du niveau de l'enracinement initial ou former un raccordement des fibres du bois entre la

racine et la souche, ce qui permet une alimentation correcte sans passer par les niveaux d'étranglement (Marquestaut 1978). Chez des semis de *Pinus taeda* 1-0 et des semis de *P. strobus* 2-0 à racines nues, la déformation racinaire en J induite lors de la plantation n'a pas induit de diminution significative du potentiel hydrique des semis et de la croissance la première année après la plantation (Seiler *et al.* 1990).

Le système racinaire de semis de sapin Douglas (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco var. *menziesii*) âgés de 5 ans a été étudié sur trois stations de l'Orégon (Newton et Cole 1991). Ni le rapport tige:racine, ni la hauteur des arbres plantés n'ont été influencés par des déformations tel que les enracinements en J ou en L lors de la plantation. Après 5 ans, il semble que les racines aient compensé complètement pour les malformations causées par la plantation; plus encore, la croissance et la stabilité future du plant n'ont pas été compromises.

Cette conclusion s'applique aussi aux angiospermes. Les résultats de l'étude de Gilman (1990b) montrent que la déformation racinaire produit par le récipients n'a pas d'effet à long terme sur la croissance de l'érable rouge, la majorité du système racinaire après la plantation émergeant de racines adventives situées au dessus de l'étranglement des racines encerclées.

Capacité de croissance racinaire et performance en plantation

La réussite des plantations dépend de nombreux facteurs, certains relevant de critères physiologiques contrôlant la qualité des plants, et d'autres de caractéristiques propres au milieu physique (conditions climatiques, niveau d'alimentation en eau, caractéristique du sol, compétition). La qualité d'un plant et ses possibilités de développement et de croissance

ultérieure est la résultante de l'intégration de nombreuses caractéristiques physiologiques et morphologiques. La qualité du plant est souvent déterminée par la capacité de régénération racinaire. Le potentiel de régénération racinaire peut aussi être corrélée à la concentration en glucide des plants ou à leur potentiel hydrique (Assenac 1987). Cependant, le taux de survie initial supérieure des semis en récipient comparé aux plants à racines nues provient avant tout d'un système racinaire intact et non perturbé. En effet, un contact intime entre le sol et les racines est favorisé au moment de la plantation dans le premier type de production (Tinus 1974).

La capacité de croissance racinaire (CCR) est définie comme étant la capacité du système racinaire d'étendre les racines existantes ou d'initier de nouvelles racines spécialement après la transplantation ou la plantation (Sutton 1990). La CCR est estimée à partir des nouvelles racines produites par un sous-échantillon dans des conditions de croissance favorables durant un test d'une durée spécifique.

D'après Sutton (1980), la valeur de la CCR est très dépendante de l'environnement lors du test. Cependant, il y a des évidences que la valeur de la CCR est reliée à la survie et à l'augmentation en hauteur des semis, même si les circonstances et le degré de ces corrélations n'est pas parfaitement claires. La relation entre la CCR et la performance après la plantation est en effet équivoque et difficile à investiguer. Sutton (1990) dit qu'il est possible de prédire la performance future des semis à partir de la CCR lorsque la valeur enregistrée lors du test est élevée ou très faible. Un plant qui a une CCR faible ou inexistante a peu de chance de survivre. À l'inverse, un lot de plant qui a une CCR très élevée peut espérer bien performer, du moins dans les limites imposées par les conditions du test.

La capacité de croissance racinaire varie énormément selon la saison. Une étude de deux ans portant sur la capacité de croissance racinaire de semis de pin sylvestre montre que celle-ci est intense entre juillet et septembre la première année de croissance puis se maintient à un bas niveau durant l'hiver pour augmenter rapidement très tôt le printemps suivant (Mattsson 1986). La reprise de la croissance racinaire au printemps précède l'allongement de la tige et est apparemment contrôlée par les régulateurs de croissance (auxines et gibbérellines) transloqués de la tige vers les racines *via* le phloème. De même, le potentiel de régénération racinaire de l'épinette noire est généralement élevé le printemps, bas durant l'été et moyen à l'automne. De plus, il tend à être très bas sur les sols dont la tension superficielle est de moins de 0,05 MPa (Day 1981). Les inventaires sur les sites forestiers qui ont été reboisés en épinette noire montrent bien que le taux de survie est le plus élevé au printemps et à l'été, alors qu'il se détériore lorsque les semis sont plantés tard durant la saison de croissance (Savard 1984; Hatcher 1984).

Après l'hivernement, l'augmentation de la conductivité hydraulique du système racinaire des semis d'épinette noire d'un an est fortement corrélé avec l'allongement des nouvelles racines (Colombo et Asselstine 1989). Les auteurs concluent que la capacité de croissance racinaire mesurée en laboratoire devrait permettre d'évaluer la performance au champ puisque la valeur du test est un bon indice de la capacité du semis à maintenir un niveau d'hydratation suffisant. La défoliation causée par le gel hivernal peut aussi diminuer la CCR. Colombo et Glerum (1984) suggèrent de déclasser les plants dont 25% des aiguilles sont mortes puisqu'ils ont une CCR trop basse.

La CCR des semis forestier mesurée dans des conditions standard en laboratoire prédit souvent la performance future des lots de plants, même s'il n'y a pas de corrélation étroite

entre la CCR au laboratoire et celle en plantation. Ainsi le test de Burdett a été utilisé pour caractériser la CCR de lots de plants d'épinette blanche et de pin lodgepole (Dunsworth 1986). La méthode fut très utile pour identifier les lots de plants qui montraient une faible probabilité de survie. Une valeur limite de 1,0 lors du test de CCR semblait raisonnable comme norme minimale. Cependant, en dehors du fait que le test permet de discriminer entre plant viables et non-viables, le test n'a aucune autre valeur de prédiction sur la performance comme telle des semis établis.

Il arrive parfois qu'il n'y ait pas de relation entre la valeur de la CCR mesurée en laboratoire dans des conditions contrôlées et la performance en plantation des lots de plants testés, la CCR ne mesurant que la santé générale et la vigueur du semis. La sélection de lots de semis ayant une capacité de croissance racinaire élevée n'est pas un gage de succès si le site de la plantation est de piètre qualité. D'après Coates et al. (1991), la température du sol et de l'air, de même que le niveau de lumière sont les facteurs primaires qui contrôlent la performance des semis d'épinette d'Engelmann et de pin lodgepole sur les sites de reboisement de la région centre-sud de la Colombie-Britannique. L'étude de Camm et Harper (1991) sur la reprise de la croissance racinaire des semis d'épinette blanche cultivés en récipient après hivernement en chambre froide (-2°C) montre bien l'importance du facteur température du sol: le nombre de racines allongeantes n'est que de 11% à 3°C et de 30% et 7°C par rapport au nombre de racines produites à une température de sol de 11°C . Il est malheureusement impossible de fixer le seuil minimal de la capacité de croissance racinaire que le semis doit atteindre pour que la survie du plant soit assurée. Ceci est dû au fait que la performance en plantation est le résultat de l'interaction entre la qualité des lots de plants reboisés, les facteurs de l'environnement et la qualité de la préparation du site (Burdett 1987).

Chez certaines espèces de conifères, la CCR est corrélée directement avec la performance en plantation. Chez des semis à racines nues de *Pinus contorta*, la CCR fut corrélée à la survie après plantation, la mortalité augmentant exponentiellement avec la diminution de la CCR ($R = 0,97$) (Burdett 1979). La plantation de différentes provenances de pin blanc montre que le test de CCR est aussi un bon indice de la capacité de survies des semis 2 ans après plantation (Johnson *et al.* 1990).

Une étude de Sutton (1983) sur la performance après plantation de semis à racine nue d'épinette noire 1,5+1,5 après deux ans montre que la dimension (hauteur, diamètre, indice de surface racinaire) des arbres donne peu d'indication sur la CCR. Par contre, une différence d'un ordre de magnitude dans la CCR est associée avec des différences significatives dans la performance, même si la relation n'est pas linéaire. Les variations d'un site à l'autre compliquent la relation performance-CCR, l'interprétation de cette relation devant tenir compte du site et du climat. En général, la CCR est fortement corrélée à la performance sur le terrain après trois ans lorsque la longueur moyenne des racines de plus de 1 cm (en moyenne) est la variable mesurée (Sutton 1987).

En fait, l'interprétation des test de CCR doit tenir compte de l'espèce étudiée et de son mode d'enracinement. Ainsi, Mattsson (1991) a comparé les résultats d'un test de CCR de semis de pin sylvestre (*Pinus sylvestris*) et d'épinette de Norvège (*Picea abies*) avec la performance après la plantation. Un gradient de viabilité a été induit sur les lots de plants avant la plantation en exposant les semis à différents régimes d'hivernement. Si la valeur de la CCR du pin sylvestre donne une bonne estimation de la performance future, notamment par rapport au taux de survie, à l'augmentation en hauteur et en diamètre de la tige, aucune corrélation ne se dégage par contre entre les valeurs du test et la performance des semis

d'épinette de Norvège. Ce résultat s'expliquerait par un mode de développement racinaire différent chez ces deux espèces. Le pin sylvestre initie de nouvelles racines à partir de méristèmes primaires; si ceux-ci sont endommagés par le gel, le potentiel de reprise racinaire est fortement affecté. L'épinette de Norvège compense les lésions subies au niveau des racines en initiant des racines adventives au collet. Cependant, l'exposition à de très basses températures (-16°C) diminue la capacité de croissance racinaire de l'épinette de Norvège même si cette espèce est beaucoup plus résistante que le pin sylvestre (Lindström 1986).

La dimension du semis est un autre facteur important à considérer, car il influence la performance des semis en récipients durant leur phase d'établissement. Ainsi, les petits semis souffrent d'un plus haut taux de mortalité et ont aussi un taux de croissance plus faible dû à la végétation compétitrice (Scarratt 1974). L'endurcissement au froid lors de la production est un autre facteur très important qui joue aussi sur la qualité du semis (D'Aoust et Trudel 1984). La résistance au gel et la capacité de croissance racinaire étaient reliées l'une à l'autre chez des espèces de conifères comme la pruche de l'ouest, le pin à feuilles tordues, et le sapin Douglas. Ces paramètres étaient aussi reliées à la performance (survie et croissance) au champs chez l'épinette blanche (var. *engelmannii*), le pin à feuilles tordues et le sapin Douglas (Simpson 1990).

Burdett (1990) relie le développement futur de la plantation à l'interdépendance entre la croissance racinaire et la photosynthèse des plants nouvellement mis en terre. Le stress provoqué par la transplantation est causé par le stress hydrique résultant du mauvais contact des racines avec le sol dû au confinement des racines au trou de plantation. La croissance racinaire permet de rétablir le bilan hydrique mais le développement des racines est dépendant de la photosynthèse courante. La photosynthèse dépend à son tour de l'assimilation du gaz

carbonique aux dépens de l'eau perdue par la transpiration. La photosynthèse est limitée par l'absorption de l'eau et est donc fonction de la croissance racinaire; croissance racinaire et photosynthèse sont donc interdépendants.

Au moment même où se terminait la rédaction de cette revue de littérature, M. Gil Lambany du MFO présentait une conférence intitulée La Qualification physiologique des Plants avant Reboisement: Bilan et synthèse sur la Capacité de Croissance Racinaire [C.C.R.] (Lambany 1992). Certains éléments de cette conférence sont rapportés ici. L'objectif du projet de M. Lambany était d'évaluer la fiabilité et la sensibilité du test de la capacité de croissance racinaire (CCR) dans l'éventualité de l'introduction de ce paramètre de qualification des lots de plants forestiers avant reboisement. La CCR des semis d'épinette noire a été mesurée durant l'hiver 1991-92 et la performance des semis sera évaluée après une saison de croissance sur le site de la plantation. Les conclusions et recommandations sont préliminaires puisque les traitements statistiques n'ont pas encore été faits, qu'il reste un essai de la CCR à effectuer au mois de mai avant la plantation et que la corrélation entre la CCR et la performance en plantation ne sera évaluée qu'en octobre 1992.

Les hypothèses qui sont testées sont les suivantes: 1) la CCR varie durant l'hiver et le profil des valeurs de la CCR prend l'allure d'une cloche (très faible à l'automne puis augmentation constante pour atteindre une valeur maximale en décembre-janvier, puis diminution par la suite); 2) le génotype de l'espèce étudiée (provenance) n'influence pas la CCR; 3) la régie de culture, notamment le niveau de la fertilisation azotée, influence la CCR subséquente des semis.

Les semis d'épinette noire 2+0 étudiés provenaient de la pépinière gouvernementale d'East-Angus et ont été cultivés en récipient IPL-45-110 dans des tunnels avec ombrières. Deux provenances ont été étudiées de même que cinq régies de fertilisation. La quantité totale d'azote donnée à chaque semis durant la période de croissance était de 15 mg dans la régie #1, 23 mg dans la régie #2, 30 mg dans la régie #3, 38 mg dans la régie #4 et 45 mg dans la régie #5. Le traitement à 30 mg correspond à la régie usuelle pour ce type de production.

Les semis ont hiverné à l'extérieur sans protection et les parcelles expérimentales ont été échantillonnées à cinq reprises (il reste encore un échantillonnage à réaliser) pour mesurer l'évolution de la CCR. Les plants étaient acclimatés avant le test puis replantés individuellement dans des pots de 2,3 L dans un substrat de tourbe et vermiculite. Les pots étaient alors transférés dans un cabinet de croissance et la CCR était mesurée après 17 jours. La variable choisie pour quantifier la CCR était le nombre de racines blanches de plus 1 cm produites après 17 jours.

La fertilisation azoté a fortement influencé la morphologie des semis. L'augmentation de la quantité d'azote fournis aux plants a fortement stimulé la croissance en hauteur de la tige et le rapport biomasse anhydre aérien/racinaire passe d'une valeur de 2 pour la régie à 15 mg d'azote par semis à 6,1 pour celle à 45. À la fin de la production en pépinière, trois classes statistiquement différentes au point de vue morphologique sont présentes correspondant aux régies à 15, 30 et 45 mg d'azote.

L'hypothèse que la valeur de la CCR prend le profil d'une cloche durant la période d'hivernement avec des valeurs maximales en décembre-janvier est infirmée puisque la CCR reste pratiquement stable tout l'hiver. Le profil hivernal est peu accentué et on observe tout

au plus une légère baisse des valeurs médianes en fonction du temps, probablement sans signification au point de vue statistique. Le facteur provenance n'a pas d'effet sur la CCR. Les valeurs de la CCR sont très variables, ce qui ne permet pas de discriminer l'effet de la fertilisation azotée. Le coefficient de variation est très élevé (autour de 60%) et les valeurs de la CCR se situent entre 20 et 40, quelque soit le traitement. Si l'indice de Burdett est utilisé, tous les lots de semis montraient en moyenne un fort potentiel de croissance racinaire, quelque soit leur morphologie ou la quantité d'azote reçue durant la période de croissance active.

La méthode n'est donc pas fiable pour caractériser la qualité des lots de semis avant plantation puisque les valeurs de la CCR enregistrées tout au cours de la saison hivernale sont trop variables (C.V. 60%). Le test sera repris en mai sous une forme différente. Les paramètres de croissance en cabinet seront passablement modifiés puisque les semis seront cultivés en jour court (6 heures), sous faible éclaircissement et à une température plus froide (12-15°C). La performance après une saison en plantation sera évaluée à l'automne 1992 pour voir si la CCR peut expliquer le succès ou l'échec de la plantation. La conclusion générale de G. Lambany est que, dans l'état actuel des connaissances, le test de la CCR donne des résultats trop variables pour introduire ce paramètre comme outil de qualification des semis forestiers

Conclusions

Il est pratiquement impossible de définir ce que devrait être le développement idéal du système racinaire chez une espèce donnée puisque le développement des racines est influencé autant par des facteurs internes (génétique ou physiologique) que par le type de substrat sur

lequel pousse la plante. Le système racinaire a donc une très grande plasticité et se renouvelle continuellement, de nouveaux axes secondaires se développant au détriment des axes primaires.

La reprise de la croissance racinaire immédiatement après la plantation est sans doute le facteur le plus important pour assurer la survie et la croissance du semis. Pour cette raison, des tests de capacité de croissance racinaire ont été développés pour quantifier la qualité des semis. Cependant, l'interprétation des résultats est difficile puisque la valeur de la CCR est beaucoup plus un indice de viabilité qu'une quantification de la "qualité" ou une estimation des performances futures au champ. Ce type de test est utile cependant pour détecter les plants qui sont pratiquement moribonds, même s'ils semblent en bon état à première vue. En fait le terme qualité d'un lot de plant est inadéquat et devrait être remplacé par le mot viabilité.

Dans le cas de la production de semis d'épinette noire en récipient, c'est la forme et le volume de la cavité qui façonne la forme du système racinaire. Le système racinaire chez cette espèce est surtout formé de latérales du premier ou du second ordre qui ont une croissance plagiotropique. Les parois redirectionnent la croissance de celles-ci vers le bas et quelques chercheurs se sont inquiétés de la forme peu "naturelle" du système racinaire. À la suite d'un certain nombre de recherches, il semble bien que les déformations racinaires ne représentent pas un problème majeur pour la majorité des essences forestières reboisées, y compris l'épinette noire. Chez cette espèce, aucune étude scientifique n'a démontré que les déformations racinaires induisaient réellement une perte de vitalité du semis reboisé. Par contre, il faut aussi noter qu'aucune étude exhaustive n'a prouvé le contraire! Ce que l'on peut affirmer, cependant, c'est que la reprise de croissance du système racinaire des semis d'épinette noire se fait par le développement d'un système entièrement nouveau formé

exclusivement de racines adventives de surface; les racines présentes lors de la plantation cessent éventuellement de fonctionner comme composante majeure du système racinaire.

Références

- Allard, J.-Y., Blais, S., Gagnon, P., et Paradis, R. 1988. Essai d'élongation racinaire et mesure des sucres solubles dans des productions de 2-0 et de 3-0 cultivés en multipot 45-110. Troisième atelier québécois sur la culture des plants forestiers en récipients, Chicoutimi, novembre 1988: 259-268.
- Armson, K. A. 1972. Distribution of conifer seedling roots in a nursery soil. For. Chron. June 1972, 141-143.
- Brouillette, J. G., Tétreault, J. P., et Lortie, J. 1987. Guide d'évaluation de la qualité des plants de reboisement produits en récipients. Gouvernement du Québec. Ministère de l'Énergie et des Ressources. Service de la régénération forestière. Québec. 50 pages.
- Burdett, A. N. 1979. New methods for measuring root growth capacity: their value in assessing lodgepole pine stock quality. Can. J. For. Res. 9: 63-67.
- Burdett, A. N. 1987. Understanding root growth capacity: theoretical considerations in assessing planting stock quality by means of root growth tests. Can. J. For. Res. 17: 768-775.
- Burdett, A. N. 1990. Physiological processes in plantation establishment and the development of specifications for forest planting stock. Can. J. For. Res. 20: 415-427.
- Camm, E. L., and Harper, G. J. 1991. Temporal variations in cold sensitivity of root growth in cold-stored white spruce seedlings. Tree Physiol. 9: 425-431.
- Carlson, L. W., and Endean, F. 1976. The effect of rooting volume and container configuration on the early growth of white spruce seedlings. Can. J. For. Res.: 6: 221-224.
- Coates, K. D., Emmingham, W. H., and Radosevich, S. R. 1991. Conifer-seedling success and microclimate at different levels of herb and shrub cover in a *Rhododendron-Vaccinium-Menziesia* community of south central British Columbia. Can. J. For. Res. 21: 858-866.
- Colombo, S. J., and Asselstine, M. F. 1989. Root hydraulic conductivity and root growth capacity of black spruce (*Picea mariana*) seedlings. Tree Physiol. 5: 73-81.
- Colombo, S. J., and Glerum, C. 1983. Winter injury to shoots as it affects root activity in black spruce container seedlings. Can. J. For. Res. 14: 31-32.
- Coutts, M. P. 1987. Developmental processes in tree root systems. . Can. J. For. Res. 17: 761-767.
- D'Aoust, A. L., et Trudel, D. 1984. L'endurcissement au gel et au stress du milieu, par des traitements photopériodiques, chez des semis d'épinette noire en conteneurs. Deuxième atelier de travail sur la culture des semis en récipients. SCF, MER, OIFQ. 29-30 novembre 1984. Sainte-Foy, Québec: 76-85..

- Day, R. J. 1981. Evaluating root regeneration potential of bare-root nursery stock. Proceedings of the 1981 Intermountain Nurserymen's Association Meeting. Env. Canada, Information Report NOR-X-241, 83-96.
- Delaporte, P. 1981. Premiers résultats de trois essais de déformations racinaires. *Dans Annales de Recherches Sylvicoles Éd. par Afocel*, Paris: 165-239.
- Drapeau, J. P. 1987. Priorité: reboisement. *Forêt et Conservation*, avril 1987: 25-33.
- Dunsworth, B. G. 1986. Root growth potential in coastal container species: trend from operational testing and prediction of outplanting performance. Western Nursery Council Meeting, Tumwater, Wa., august 12-15: 103-105.
- Fayle, D. C. F. 1975a. Extension and longitudinal growth during the development of red pine root systems. *Can. J. For. Res.* 5: 109-121.
- Fayle, D. C. F. 1975b. Archy and diameter of primary xylem in horizontal and vertical roots of red pine. *Can. J. For. Res.* 5: 122-129.
- Fogel, R. 1983. Root turnover and productivity of coniferous forests. *Plant and Soil* 71: 75-85.
- Gagnaire-Michard, J., Cavat, C., et Bonicel, A. 1980. Variations des concentrations glucidiques dans les tiges induites par les déformations racinaires. *Dans Annales de Recherches Sylvicoles Éd. par Afocel*, Paris: 255-271.
- Gauthier, J. 1988. Difficultés des producteurs de plants forestiers à rencontrer les normes de qualité. Troisième Atelier Québécois sur la Culture des Plants Forestiers en Récipients, Chicoutimi, novembre 1988: 29-39.
- Gilman, E. F. 1990a. Tree root growth and development. I. Form, spread, depth and periodicity. *J. Environ. Hort.* 8: 215-220.
- Gilman, E. F. 1990b. Tree root growth and development. II. Response to culture, management and planting. *J. Environ. Hort.* 8: 220-227.
- Girouard, R. M. 1988. Le développement du système racinaire des semis de pin gris en conteneur avant et après la plantation. Troisième Atelier québécois sur la culture des plants forestiers en récipients, Chicoutimi, novembre 1988: 163-179.
- Hiatt, H. A., and Tinus, R. W. 1974. Container shape controls root system configuration of ponderosa pine. *Proc. of the North American Containerized Forest Tree Seedling Symp.*, Denver Co., august 26-29: 194-196.
- Hallett, R. D., and Cameron, M. D. Editors 1983. MFRC Workshop Proceedings No. 1. *Proc. of the Stock Quality Workshop*, 9 march 1992, Fredericton, N. B.
- Hatcher, R. J. 1984. Résultats préliminaires de plantations expérimentales de semis de conifères en conteneurs. Deuxième Atelier de Travail sur la Culture des Semis en Récipients, Ste-Foy Québec, 29-30 novembre: 115-129.

- Henderson, R., Ford, E. D., Renshaw, E., and Deans, J. D. 1983. Morphology of the structural root system of sitka spruce 1. Analysis and quantitative description. *Forestry* 56: 121-135.
- Johnson, J. E., Kreh, R. E., Torbert, J. L., Feret, and P. P. 1990. Root growth potential of scotch pine seeds sources and is relationship to field performance. *Proc. of 1990 Northeastern Nurserymen's Conference, Montréal, july 23-26*: 147-159.
- Johnson-Flanagan, A. M., and Owens, J. 1985a. Development of white spruce (*Picea glauca*) seedlings roots. *Can. J. Bot.* 63: 456-462.
- Johnson-Flanagan, A. M., and Owens, J. 1985b. Root growth and root growth capacity of white spruce (*Picea glauca* (Moench) Voss) seedlings. *Can. J. For. Res.* 15: 456-462.
- Kramer, P. J., and Kozlowski, T. T. 1979. *Physiology of Woody Plants Second Ed.* Acad. Press, Inc., Orlando Fla. 811 pages.
- Lambany, G. 1992. La qualification physiologique des plants avant reboisement: Bilan et synthèse sur la capacité de croissance racinaire [C.C.R.]. Conférence Info-Recherche tenue à Québec le 2 avril 1992.
- Lambany, G, et Langlois, C.-G. 1988. Métabolisme des sucres au cours des périodes d'endurcissement, de dormance hivernale et de désendurcissement. Troisième atelier québécois sur la culture des plants forestiers en récipients, Chicoutimi, novembre 1988: 215-229.
- Langerud, B. R. 1991. 'Planting stock quality': a proposal for better termonology. *Scand. J. For. Res.* 6: 49-51.
- Langlois, C.-G., et Gingras, B.-M. 1990. Cernage des racines de plants produits en récipients. IUFRO Montréal 1990, 11 pages.
- Langlois, C.G., et Carrier, C. 1984. La culture en récipients - croissance, conditions culturales et fertilisation. Deuxième atelier de travail sur la culture des semis en récipients. SCF, MER, OIFQ. 29-30 novembre 1984. Sainte-Foy, Québec: 36-64.
- Langlois, C. G., Godbout, L., and Fortin, J. A. 1983. Seasonal variation of growth and development of the roots of five second year conifer species in the nursery. *Plant Soil* 71: 55-62.
- Langlois, J.-G. 1988. Le dynamisme de la croissance des plants cultivés dans le récipients 45-110 et les relations avec les variables. Troisième Atelier Québécois sur la Culture des Plants Forestiers en Récipients, Chicoutimi, novembre 1988: 43-65.
- Lindström, A. 1986. Freezing temperatures in the root zone- Effects on growth of containerized *Pinus sylvestris* and *Picea abies* seedlings. *Scand. J. For. Res.* 1: 371-377.
- Lyr, H., and Hoffmann, G. 1967. Growth rates and growth periodicity of tree roots. *Int. Rev. For. Res.* 2: 181-206.

- Margolis, H. A. 1987. Seedling production and reforestation in Quebec. J. Forestry 85: 39-43.
- Marquestaut, J. 1978. Les dangers cachés des plants en conteneurs. Afocel 1: 35-42.
- Mattsson, A. 1986. Seasonal variation in root growth capacity during cultivation of container grown *Pinus sylvestris* seedlings. Scand. J. For. res. 1: 473-482.
- Mattsson, A. 1991. Root growth capacity and field performance of *Pinus sylvestris* and *Picea abies* seedlings. Scand. J. For. Res. 6: 105-112.
- McClain, K. M. 1981. Growth, nutrition and root development of Ontario tubeling, plugs and 3+0 bare-root black spruce. Proc. Canadian Containerized Tree Seedling Symp, september 1981, Toronto: 331-342.
- MFO 1991. Ressources et Industrie Forestières- Portrait Statistique . Ministère de la Forêt . Gouvernement du Québec. Publ. 91-3009. 79 pages.
- Miron, F. 1988. L'établissement et l'évolution des normes depuis 1980. Troisième Atelier Québécois sur la Culture des Plants Forestiers en Récipients, Chicoutimi, novembre 1988: 27-28.
- Navratil, S., Brace L. G., and Edwards, I. K. 1986. Planting Stock Quality Monitoring. Inf. Rep. NOR-X-279, Can. For. Serv. 21. 21 pages.
- Newton, M., and Cole, E. C. 1991. Root development in planted Douglas-fir under varying competitive stress.. Can. J. For. Res. 21: 25-31.
- Olsthoorn, A. F. M. 1991a. Fine root density and root biomasse of two Douglas-fir stands on sandy soils in the Netherlands. 1. Root biomass in early summer. Netherland J. Agric. Sci. 39: 49-60.
- Olsthoorn, A. F. M., and Tiktak, A. 1991b. Fine root density and root biomasse of two Douglas-fir stands on sandy soils in the Netherlands. 2. Periodicity of fine root growth and estimation of belowground carbon allocation. Netherland J. Agric. Sci. 39: 61-77.
- Philipson, J. J. 1988. Root growth in sitka spruce and Douglas-fir transplants: dependance on the shoot and stored carbohydrate. Tree physiol. 4: 101-108.
- Savard, J. 1984. Résultats préliminaires de reboisement à l'aide de semis en récipients. Deuxième Atelier de Travail sur la Culture des Semis en Récipients, Ste-Foy Québec, 29-30 novembre: 130-135.
- Scarratt, J. B. 1974. Performance of tubed seedlings in Ontario. Proc. of North American Containerized Seedlings Symposium, Denver Colorado, august 26-29: 310-320.
- Seiler, J. R., Paganelli, D. J., and Cazell, B. H. 1990. Growth and water potential of j-rooted loblolly and eastern white pine seedlings over three growing seasons. New Forests 4: 147-153.

- Simpson, D. 1987. Interpretation of seedlings quality monitoring data- Project no. 3.9. Research Memo No. 009, Kalamalka Res. Stn. and Seed Orchard, Vernon, B. C.
- Simpson, D. G. 1990. Frost hardiness, root growth capacity, and field performance relationships in interior, spruce, lodgepole pine, Douglas-fir, and western hemlock seedlings. *Can. J. For. Res.* 20: 566-572.
- Strong, W. L., and La Roi, G. H. 1983. Root-system morphology of common boreal forest trees in Alberta, Canada. *Can. J. For. Res.* 13: 1164-1173.
- Sutton, R. F. 1980. Planting stock quality, root growth capacity, and field performance of three boreal conifers. *N.Z. J. For. Sci.* 10: 54-71.
- Sutton, R. F. 1983. Root growth capacity: relationship with field root growth and performance in outplanted jack pine and black spruce. *Plant and Soil* 71: 111-122.
- Sutton, R.F. 1987. Root growth capacity and field performance of jack pine and black spruce in boreal stand establishment in Ontario. *Can. J. For. Res.* 17: 794-804.
- Sutton, R. F. 1990. Root growth capacity in coniferous forest trees. *HortScience* 25: 259-266.
- Sutton, R.F. 1991. Soil properties and root development in forest trees: a review. Forestry Canada, Great Lakes Forestry centre, Information report O-X-413.
- Sutton, R. F., and Tinus, R. W. 1983. Root and Root System Terminology. *Forest Science Monograph* 24. 137 pages.
- Tinus, R. W. 1974. Characteristics of seedlings with high survival potential. *Proc. of the North American Containerized Forest Tree Seedling Symposium*, August 26-29, Denver Colorado: 276-282.
- Van Eerden, E. 1981. Root form of planted trees. *Proc. Canadian Containerized Tree Seedling Symp.*, September 1981, Toronto: 401-406.
- Wagg, J. W. B. 1967. Origin and development of white spruce root-forms. *Can. Dept. of For. and Rural Dev. Dep. Publ.* 1192.

