

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À  
L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À CHICOUTIMI  
COMME EXIGENCE PARTIELLE  
DE LA MAÎTRISE EN RESSOURCES RENOUVELABLE

PAR  
ÉRIC GAGNON  
B.SC. BIOLOGIE

DÉVELOPPEMENT DU SYSTÈME RACINAIRE  
ADVENTIF CHEZ DES SEMIS D'ÉPINETTE NOIRE  
(*PICEA MARIANA* (MILL.) B.S.P.)  
EN PLANTATION

MARS 2002



## **Mise en garde/Advice**

Afin de rendre accessible au plus grand nombre le résultat des travaux de recherche menés par ses étudiants gradués et dans l'esprit des règles qui régissent le dépôt et la diffusion des mémoires et thèses dans cette Institution, l'**Université du Québec à Chicoutimi (UQAC)** est fière de rendre accessible une version complète et gratuite de cette œuvre.

Motivated by a desire to make the results of its graduate students' research accessible to all, and in accordance with the rules governing the acceptance and diffusion of dissertations and theses in this Institution, the **Université du Québec à Chicoutimi (UQAC)** is proud to make a complete version of this work available at no cost to the reader.

L'auteur conserve néanmoins la propriété du droit d'auteur qui protège ce mémoire ou cette thèse. Ni le mémoire ou la thèse ni des extraits substantiels de ceux-ci ne peuvent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

The author retains ownership of the copyright of this dissertation or thesis. Neither the dissertation nor the thesis, nor substantial extracts from it, may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

## RÉSUMÉ

L'épinette noire est la principale essence de la forêt boréale nord américaine. Par sa croissance lente, elle est une source importante de fibre de haute qualité pour les compagnies forestières canadiennes. Cette essence est par conséquent celle qui est la plus utilisée pour le reboisement. Le système racinaire d'une épinette noire adulte issue de la régénération naturelle est composé de racines adventives qui se sont développées sur la tige à un moment ou l'autre de sa vie. La mise en place rapide de ce système chez les plants à reboiser pourrait représenter une avenue pour accélérer la reprise de croissance suite à la plantation.

L'objectif de ce travail est d'évaluer l'importance d'enfouir la base de la tige de semis plantés afin de favoriser le développement des racines adventives. Des semis d'épinette noire ont été plantés en juin, août et septembre 1996 en utilisant trois méthodes de plantation (conventionnel, enfoui et pré-enfoui) et trois types de sol (organique, minéral et 5 cm d'organique sur minéral). Depuis la plantation, la survie et la croissance des semis font l'objet d'un suivi annuel et, en 1998, des mesures d'échanges gazeux et de composition minérale ont été effectuées.

Le taux de survie a atteint 99% en 1996, 95% en 1997, 88% en 1998 et 86% en 1999 pour l'ensemble de la plantation. Les semis plantés en juin sont plus gros que ceux plantés en août et septembre puisqu'ils ont pu croître l'année de la plantation; ils ont maintenu cet avantage par la suite. Durant l'année de la plantation, 3% des semis dont la tige était enfouie ou pré-enfouie ont développé des racines adventives. Ce taux est passé à 40% en 1997, à 55% en 1998 et à 62% en 1999. Le développement du système racinaire adventif se fait au détriment du système racinaire original. Jusqu'à maintenant les traitements qui favorisent la formation de racines adventives affectent positivement la croissance en hauteur des semis. Le léger retard de croissance provoqué par le stress de l'enfouissement des semis lors de leur production ou au moment de la plantation a été rapidement comblé et les semis enfouis et pré-enfouis sont plus grands que les semis conventionnels. Le défilement inverse est déjà présent chez les semis qui ont été enfoui et les racines adventives en sont responsables. Le type de sol a très peu affecté la croissance et le développement des semis. Aucune différence entre les traitements n'a pu être tirée à partir des échanges gazeux; les mesures auraient dû être prises sur une plus longue période. Aucune déficience majeure n'était présente lors de la prise des mesures pour les principaux éléments minéraux.

L'enfouissement des semis d'épinette noire permet le développement prononcé des racines adventives et les plants enfouis ne sont aucunement gênés dans leur survie et leur croissance. Leur hauteur est même supérieure à celle des plants conventionnels; la présence de racines adventives pourrait en être responsable.

## REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier mon directeur de recherche, le Dr Daniel Lord, qui a mis ce projet sur pied, et qui a su me diriger et qui était présent pour répondre à mes questions. Je tiens aussi à remercier Jacques Allaire, agronome et Denis Walsh, maître en ressources renouvelables qui m'ont été d'un grand soutien tant au niveau pratique que théorique. Je remercie aussi Daniel Gagnon, technicien horticole pour son travail lors des échantillonnages. Je remercie également Pierre-Yves Bernier du Centre de Foresterie des Laurentides qui m'a permis de faire mon stage et qui m'a donné de nombreux conseils pour les analyses d'échanges gazeux tout comme le Dr Manuel Lamontagne, pour ses conseils concernant l'utilisation de l'appareil de mesure de la photosynthèse, le Li-cor 6200. Je tiens aussi à remercier la compagnie Barette-Chapais Ltée et Jean-Pierre Girard (MRN), promoteurs du projet. Finalement j'aimerais remercier le Consortium de Recherche sur la Forêt Boréale Commerciale pour son appui financier.

## TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ .....	ii
REMERCIEMENTS .....	iii
TABLE DES MATIÈRES .....	iv
LISTE DES TABLEAUX .....	vi
LISTE DES FIGURES .....	viii
1 INTRODUCTION .....	1
2 MATÉRIEL ET MÉTHODES .....	6
2.1 MATÉRIEL VÉGÉTAL ET DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL .....	7
2.2 MESURE DU TAUX DE SURVIE ET DE LA CROISSANCE .....	12
2.3 ÉCHANGES GAZEUX .....	13
2.4 ANALYSES FOLIAIRES .....	15
2.5 TRAITEMENT DES DONNÉES .....	15
3 RÉSULTATS .....	17
3.1 MESURES INITIALES DE CROISSANCE .....	18
3.2 TAUX DE SURVIE DE LA PLANTATION .....	18
3.3 RACINES ADVENTIVES .....	19
3.4 PARAMÈTRES DE CROISSANCE .....	27
3.5 DÉFILEMENT INVERSE .....	39
3.6 ÉCHANGES GAZEUX .....	41
3.7 ÉLÉMENTS MINÉRAUX .....	42
4 DISCUSSION .....	45
4.1 TAUX DE SURVIE DE LA PLANTATION .....	46
4.2 RACINES ADVENTIVES .....	48
4.3 CROISSANCE DES SEMIS .....	50

4.3.1 DATE DE PLANTATION .....	50
4.3.2 MÉTHODE DE PLANTATION .....	51
4.3.3 TYPE DE SOL .....	56
4.3.4 ÉCHANGES GAZEUX.....	56
4.3.5 ÉLÉMENTS MINÉRAUX.....	57
CONCLUSION .....	58
RÉFÉRENCES .....	61

## LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU 1: CARACTÉRISTIQUES DES TROIS LOTS DE GRAINES FOURNIES PAR LE CENTRE DE SEMENCES FORESTIÈRES DE BERTHIER .....	7
TABLEAU 2: DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL AVEC LE BLOC 1 ET L'ANNÉE 1996 MIS EN ÉVIDENCE. LA DISTRIBUTION DES COMBINAISONS DE TRAITEMENTS DANS CHACUN DES BLOCS A ÉTÉ FAITE AU HASARD.....	8
TABLEAU 3: CARACTÉRISTIQUES MORPHOLOGIQUES MOYENNES DES SEMIS AU MOMENT DE LA PLANTATION. ....	18
TABLEAU 4 : TAUX DE SURVIE DE LA PLANTATION EN FONCTION DES FACTEURS DATES DE PLANTATION, MÉTHODE DE PLANTATION ET TYPE DE SOL POUR LES QUATRE ANNÉES D'ÉCHANTILLONNAGE. UN TEST DE KHI-CARRÉ A ÉTÉ APPLIQUÉ.. ....	20
TABLEAU 5 : POURCENTAGE DE SEMIS AYANT DÉVELOPPÉS AU MOINS UNE RACINE ADVENTIVE EN FONCTION DES FACTEURS DATE DE PLANTATION, MÉTHODE DE PLANTATION ET TYPE DE SOL POUR LES QUATRE ANNÉES D'ÉCHANTILLONNAGE. UN TEST DE KHI-CARRÉ A ÉTÉ APPLIQUÉ. ....	22
TABLEAU 6 : ANALYSE DE VARIANCE DU NOMBRE MOYEN DE RACINES ADVENTIVES PAR SEMIS TRANSFORMÉES EN FONCTION DE L'ANNÉE D'ÉCHANTILLONNAGE, DE LA DATE DE PLANTATION, DE LA MÉTHODE DE PLANTATION ET DU TYPE DE SOL. DES CONTRASTES ONT ÉTÉ EFFECTUÉS SUR LES FACTEURS ET LES INTERACTIONS PRINCIPALES SIGNIFICATIFS. ....	23
TABLEAU 7 : ANALYSE DE VARIANCE DE LA BIOMASSE DES RACINES ADVENTIVES TRANSFORMÉE EN FONCTION DE L'ANNÉE D'ÉCHANTILLONNAGE, DE LA DATE DE PLANTATION, DE LA MÉTHODE DE PLANTATION ET DU TYPE DE SOL. DES CONTRASTES ONT ÉTÉ EFFECTUÉS SUR LES FACTEURS ET LES INTERACTIONS PRINCIPALES SIGNIFICATIFS. ....	25
TABLEAU 8 : ANALYSE DE VARIANCE DE LA HAUTEUR DE LA TIGE TRANSFORMÉE EN FONCTION DE L'ANNÉE D'ÉCHANTILLONNAGE, DE LA DATE DE PLANTATION, DE LA MÉTHODE DE PLANTATION ET DU TYPE DE SOL. DES CONTRASTES ONT ÉTÉ EFFECTUÉS SUR LES FACTEURS ET LES INTERACTIONS PRINCIPALES SIGNIFICATIFS. ....	28
TABLEAU 9 : ANALYSE DE VARIANCE DU DIAMÈTRE AU COLLET TRANSFORMÉ EN FONCTION DE L'ANNÉE D'ÉCHANTILLONNAGE, DE LA DATE DE PLANTATION, DE LA MÉTHODE DE PLANTATION ET DU TYPE DE SOL. DES CONTRASTES ONT ÉTÉ EFFECTUÉS SUR LES FACTEURS ET LES INTERACTIONS PRINCIPALES SIGNIFICATIFS. ....	31
TABLEAU 10 : ANALYSE DE VARIANCE DU DIAMÈTRE 5 CM AU DESSUS DU COLLET TRANSFORMÉ ET VALEUR MOYENNE DU DIAMÈTRE 5 CM AU DESSUS DU COLLET (MM) EN 1999. LES VALEURS QUI NE PARTAGENT PAS LA MÊME LETTRE SONT SIGNIFICATIVEMENT DIFFÉRENTS LES UNS DES AUTRES.....	33
TABLEAU 11 : ANALYSE DE VARIANCE DE LA BIOMASSE DE LA TIGE TRANSFORMÉE EN FONCTION DE L'ANNÉE D'ÉCHANTILLONNAGE, DE LA DATE DE PLANTATION, DE LA MÉTHODE DE PLANTATION ET DU TYPE DE SOL. DES CONTRASTES ONT ÉTÉ EFFECTUÉS SUR LES FACTEURS ET LES INTERACTIONS PRINCIPALES SIGNIFICATIFS. ....	34

TABLEAU 12 : ANALYSE DE VARIANCE DE LA BIOMASSE RACINAIRE TRANSFORMÉE EN FONCTION DE L'ANNÉE D'ÉCHANTILLONNAGE, DE LA DATE DE PLANTATION, DE LA MÉTHODE DE PLANTATION ET DU TYPE DE SOL. DES CONTRASTES ONT ÉTÉ EFFECTUÉS SUR LES FACTEURS ET LES INTERACTIONS PRINCIPALES SIGNIFICATIFS.....	37
TABLEAU 13 : ANALYSE DE VARIANCE DE L'INDICE DELTA D (DIFFÉRENCE ENTRE LE DIAMÈTRE AU COLLET ET À 5 CM AU-DESSUS) EN FONCTION DE LA DATE DE PLANTATION, DE LA MÉTHODE DE PLANTATION ET DU TYPE DE SOL ET VALEURS MOYENNES POUR LES FACTEURS MÉTHODE ET DATE DE PLANTATION POUR L'ÉCHANTILLONNAGE DE 1999. LES VALEURS QUI NE PARTAGENT PAS LA MÊME LETTRE SONT SIGNIFICATIVEMENT DIFFÉRENTES LES UNES DES AUTRES.....	40
TABLEAU 14 : ANALYSE DE VARIANCE DE L'INDICE DELTA D (DIFFÉRENCE ENTRE LE DIAMÈTRE AU COLLET ET À 5 CM AU-DESSUS) POUR LES SEMIS AVEC AU MOINS UNE RACINE ADVENTIVE ET CEUX SANS RACINE ADVENTIVE EN FONCTION DE LA DATE DE PLANTATION, DE LA MÉTHODE DE PLANTATION ET DU TYPE DE SOL ET VALEURS MOYENNES POUR LES FACTEURS MÉTHODE DE PLANTATION POUR L'ÉCHANTILLONNAGE DE 1999. LES VALEURS QUI NE PARTAGENT PAS LA MÊME LETTRE SONT SIGNIFICATIVEMENT DIFFÉRENTES LES UNES DES AUTRES.....	41
TABLEAU 15 : ANALYSE DE VARIANCE DU TAUX DE PHOTOSYNTHÈSE NETTE, DE LA CONDUCTANCE STOMATALE ET DU COEFFICIENT D'UTILISATION DE L'EAU EN 1998 POUR LES FACTEURS MÉTHODE DE PLANTATION ET TYPE DE SOL ET VALEURS MOYENNES DU COEFFICIENT D'UTILISATION DE L'EAU EN FONCTION DU FACTEUR MÉTHODE DE PLANTATION. DES CONTRASTES ONT ÉTÉ EFFECTUÉS SUR LES FACTEURS ET SIGNIFICATIFS.....	43
TABLEAU 16 : CONCENTRATION DES PRINCIPAUX ÉLÉMENTS MINÉRAUX OBTENUS EN COMPARAISON AVEC LA LITTÉRATURE .....	44
TABLEAU 17 : ANALYSE DE VARIANCE DE LA COMPOSITION MINÉRALE DES SEMIS.....	44

## LISTE DES FIGURES

FIGURE 1 : SCHÉMA DES MÉTHODES DE PLANTATION. PRÉ-ENFOUİ SIGNIFIE L'ENFOUSSEMENT DES CINQ PREMIERS CENTIMÈTRES DE TIGE 16 SEMAINES APRÈS LE DÉBUT DE LA PÉRIODE DE PRODUCTION ; ENFOUİ SIGNIFIE L'ENFOUSSEMENT DES CINQ PREMIERS CENTIMÈTRES DE TIGE LORS DE LA PLANTATION ; LES SEMIS DU TRAITEMENT CONVENTIONNEL SONT PLANTÉS AU COLLET. ....	10
FIGURE 2 : SEMIS PRÉ-ENFOUİ PLANTÉ EN 1996 ET RÉCOLTÉ EN 1998 .....	20
FIGURE 3 : VARIATION DU NOMBRE MOYEN DE RACINES ADVENTIVES PAR SEMIS EN FONCTION DU TEMPS D'ÉCHANTILLONNAGE POUR LE FACTEUR MÉTHODE DE PLANTATION.....	24
FIGURE 4 : BIOMASSE DES RACINES ADVENTIVES TRANSFORMÉE EN FONCTION DU TEMPS D'ÉCHANTILLONNAGE POUR LES FACTEURS MÉTHODE DE PLANTATION (A) ET TYPE DE SOL (B) .....	26
FIGURE 5 : VARIATION DE LA HAUTEUR DE LA TIGE EN FONCTION DU TEMPS D'ÉCHANTILLONNAGE POUR LES FACTEURS DATE DE PLANTATION (A), MÉTHODE DE PLANTATION (B) ET TYPE DE SOL (C).....	29
FIGURE 6 : VARIATION DU DIAMÈTRE AU COLLET EN FONCTION DU TEMPS D'ÉCHANTILLONNAGE POUR LES FACTEURS DATE DE PLANTATION (A) ET MÉTHODE DE PLANTATION (B).....	32
FIGURE 7 : BIOMASSE DE LA TIGE TRANSFORMÉE EN FONCTION DU TEMPS D'ÉCHANTILLONNAGE POUR LES FACTEURS DATE DE PLANTATION (A), MÉTHODE DE PLANTATION (B) ET TYPE DE SOL (C).....	35
FIGURE 8 : BIOMASSE RACINAIRE TRANSFORMÉE EN FONCTION DU TEMPS D'ÉCHANTILLONNAGE POUR LES FACTEURS DATE DE PLANTATION (A) ET MÉTHODE DE PLANTATION (B).....	38

# **CHAPITRE 1**

## **INTRODUCTION**

L'épinette noire (*Picea mariana* (Mill) BSP) est la principale essence de la forêt boréale de l'est de l'Amérique du nord (Lamhamedi et Bernier 1994). Par sa croissance lente, elle est une source importante de fibre de haute qualité pour les compagnies forestières canadiennes (Lamhamedi et Bernier 1994). Pour régénérer cette forêt, le ministère des Ressources naturelles du Québec (MRN) et ses partenaires industriels ont planté plus de 1,3 milliards d'arbres sur les terres publiques entre 1986 et 1995. Depuis 1995, plus de 100 millions de plants par année sont mis en terre et de ce nombre, environ 58% sont de l'épinette noire (Trottier 1998).

Les bilans antérieurs aux années 80 faisaient état de performances mitigées en matière de reboisement, mais plusieurs améliorations ont été apportées afin d'obtenir de meilleurs résultats. Parmi celles-là, amélioration génétique, type de récipients et préparation de terrain retiennent l'attention (Trottier 1998). Afin de qualifier les semis au moment de la livraison des plants, le MRN utilisait 15 normes et critères de qualité (Brouillette *et al.* 1987). Présentement, c'est une vingtaine de normes qui sont basées sur des critères morphologiques et physiologiques comme la hauteur, le diamètre et la forme de la tige, le nombre de tête, la concentration tissulaire minimale en minéraux et la coloration des semis (Ministère des Ressources naturelles 2001). Au niveau racinaire, les principaux critères s'intéressent à la quantité, l'état et la forme. Mais aucun critère ne porte spécifiquement sur la présence de racines adventives (Aubin 1996).

Le système racinaire de l'épinette noire adulte est constitué de racines latérales de surface distribuées radialement. Ces racines se situent généralement dans le sept à dix premiers centimètres de sol et elles ne dépassent guère les trente centimètres de profondeur (Strong et LaRoi 1983). Cette distribution en surface des racines se vérifie également chez des épinettes noires provenant de plantation. Le maximum de racines se retrouve dans les premiers centimètres de sol, puis décroît rapidement en profondeur (Armson 1972).

À l'âge adulte, ces racines ont toutes les chances d'être des racines adventives, c'est-à-dire des racines qui se développent sur un organe autre que les racines, habituellement la tige (Sutton et Tinus 1983). Il est connu depuis longtemps que l'épinette noire est une espèce qui développe un système racinaire adventif dominant ; celui-ci peut même prendre préséance sur le système racinaire initial issu de la graine (LeBarron 1945; DesRochers et Gagnon 1997). L'enfouissement de la tige ou l'accumulation de débris autour de celle-ci sont des conditions obligatoires pour assurer le développement de racines adventives (LeBarron 1945; McClain 1981; Stroempl 1990; Cloutier et Fillion 1995; Aubin 1996). Cet enfouissement amènerait des conditions d'humidité élevée autour de la tige, ce qui favoriserait la formation des racines adventives sur cette partie de la plante (McClain 1981).

Selon la littérature, un léger enfouissement n'affecte pas la survie des semis de conifères et est parfois même bénéfique sur la survie et/ou la croissance (Mullin 1964, 1966; Stroempl 1990; Sutton 1967, 1995). Pittman (1991) a observé une meilleure

croissance en hauteur les deux premières années chez l'épinette noire enfouie. D'autres auteurs dont Sutton (1967) ont observé une réponse similaire. Ils expliquent ce phénomène par la réallocation du carbone des parties enterrées vers la tige. Stroempl (1990) a dressé une liste des avantages de l'enfouissement pour la survie des plants à la condition que le site soit bien drainé : meilleure stabilité physique des semis, absence de déchaussement des plants, meilleure protection de la jonction tige-racine (collet), meilleure utilisation de l'eau disponible, meilleure protection de la tige contre le vent et la neige et meilleure résistance contre la chaleur et la sécheresse. Le stress hydrique est la première cause de mortalité ou de baisse de croissance lors de la plantation de semis de conifères (Burdett 1990). Ce stress peut être dû au confinement des racines et peut être limité par la croissance racinaire, dont les racines adventives (Burdett 1990). Ces avantages pourraient également aider à la croissance des semis. Schwann (1994) mentionne d'autres avantages liés à l'enfouissement : plus de marge de manœuvre pour les reboiseurs et réduction des besoins de scarification. Par contre plusieurs auteurs s'entendent pour dire que l'enfouissement n'est pas bénéfique lorsque les plants sont enfouis de façon excessive (Sutton 1995) ou bien lorsqu'ils sont plantés sur des sites mal drainés, très humides ou lorsque les plants sont petits et qu'ils peuvent être noyés par une pluie importante (Mullin 1964; Stroempl 1990 ).

Toutes ces observations ne semblent pas avoir été considérées dans la plupart des actions liées à l'aménagement forestier. McClain (1981) mentionne que le système racinaire de l'épinette noire doit s'exprimer pour la croissance normale de l'arbre et en pratique, la sylviculture actuelle n'en tient malheureusement pas compte. Sutton (1995)

suggère que les semis d'épinette noire soient plantés plus profondément pour favoriser le développement de racines adventives. Schwann (1994) propose que l'épinette noire soit enfouie au moins jusqu'à la première branche dans un sol minéral bien drainé sans affecter les performances des plants. Il émet certaine crainte lorsque le feuillage est enterré. Mais dans les sols susceptibles de provoquer des dommages par le froid, il croit que l'enfouissement peut améliorer la survie. De plus, l'enfouissement peut augmenter la stabilité des semis dans l'humus.

Il apparaît que la mise en place d'un système racinaire adventif caulinaire tôt durant la croissance des semis en culture pourrait accélérer la reprise de croissance de ceux-ci lors de la plantation en forêt. Il serait donc intéressant de favoriser le développement de racines adventives lors de la période de production des semis ou au moment de la plantation par l'enfouissement de leur tige dans le sol. L'objectif général de ce projet est d'évaluer si l'enfouissement de la tige au moment de la production des semis ou de la plantation permet le développement d'un système racinaire adventif caulinaire et si ces racines leur confèrent un avantage. L'objectif spécifique de cette recherche consiste à étudier les effets du type de sol et de la date de plantation sur le développement de ces racines adventives, sur la croissance des semis et sur le taux de survie. Les hypothèses suivantes seront vérifiées : 1) l'enfouissement permet d'obtenir des racines adventives en grande quantité et rapidement ; 2) les semis ayant développé des racines adventives montrent un meilleur taux de survie et une meilleure croissance.

# **CHAPITRE 2**

## **MATÉRIEL ET MÉTHODE**

## 2.1 MATÉRIEL VÉGÉTAL ET DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL

Les semis d'épinette noire (*Picea mariana* (Mill.) B.S.P.) ont été produits aux serres du Pavillon de la Recherche Forestière de l'Université du Québec à Chicoutimi à partir de semences de trois lots fournies par le Centre de semences forestières de Berthier (tableau 1). Plusieurs analyses préliminaires ont démontré qu'il n'existe pas de différences significatives entre les trois lots utilisés pour les paramètres mesurés dans cette expérience. Les données ont donc été regroupées sans tenir compte des provenances.

Tableau 1 : Caractéristiques des trois lots de graines fournies par le Centre de semences forestières de Berthier.

Lot	Provenance *	Nombre de semence/ Kg *1000	Zone écologique	Latitude	Longitude	Date de récolte
1	EPN-VI-025-K13-026-94	848	Verger	49°50'	74°50'	1994
2	EPN-AI-12B-K91-025-90	954	Boréale	49°40'	72°50'	1990
3	EPN-NI-12B-K91-025-84	1082	Boréale	49°40'	72°50'	1984

\*numérotation du Centre de semences forestières de Berthier

Les sites expérimentaux sont situés dans l'aire commune 26-20 du secteur de Chapais (site 1 : 49°17'30'' N, 75°13' O et site 2 : 49°19'30'' N, 75°12' O). Le plan expérimental était un dispositif en tiroir avec le temps (année d'échantillonnage) comme facteur principal. Les facteurs date de plantation, méthode de plantation et type de sol étaient en sous-parcelle. Le dispositif comprenait 4 années d'échantillonnage, 5 blocs, 3 dates de plantation, 3 types de sol, 3 méthodes de plantation et 3 sous-échantillons pour un total de 1440 semis (tableau 2).

Tableau 2 : Dispositif expérimental avec le bloc 1 et l'année 1996 mis en évidence. La distribution des combinaisons de traitements dans chacun des blocs a été faite au hasard.

		Année d'échantillonnage					
		1996			1997	1998	1999
		Méthode de plantation					
Bloc	Date de plantation	Type de sol	Pré-enfoui	Enfoui	Conventionnel		
1	Juin	ORG	3*	3	3		
		MIN	3	3	3		
		O-M	3	3	X		
	Août	ORG					
		MIN					
		O-M					
	Septembre	ORG					
		MIN					
		O-M					
2							
3							
4							
5							

\* Nombre de semis

X : la combinaison méthode de plantation Conventionnel et type de sol O-M n'a pas été appliquée.

ORG : sol organique

MIN : sol minéral

O-M : mince couche de sol organique (5 cm) sur du sol minéral

Les blocs 1, 2 et 3 étaient situés dans un site mésique où la couche de matière organique est épaisse et bien décomposée, alors que les blocs 4 et 5 étaient situés dans un site xérique où la couche de matière organique est mince et peu décomposée. Les sites étaient scarifiés.

En 1996, sept parcelles par bloc correspondant chacune à une année d'échantillonnage ont été plantées; tous les plants d'une parcelle ont été mesurés la même année. Les récoltes étaient prévues en 1996, 1997, 1998, 1999, 2001, 2003 et 2006 et elles correspondaient aux temps 1 à 7. Pour la présente étude, quatre échantillonnages destructifs ont été effectués, soit aux automnes 1996, 1997, 1998 et 1999 qui correspondent aux temps 1, 2, 3 et 4. Les temps 4, 5, 6 et 7 ont été utilisés pour le suivi du taux de survie de la plantation.

Les trois niveaux du facteur date de plantation correspondaient à trois dates de plantation, soit JUIN, AOÛT et SEPTEMBRE. La première plantation a été effectuée entre le 17 juin et le 9 juillet 1996. Le long délai entre le début et la fin de la plantation est attribuable à l'arrêt obligatoire des travaux en forêt à cette époque suite à une période prolongée de sécheresse propice à l'émergence de feux de forêt catastrophiques. La seconde plantation s'est fait du 6 au 14 août et la troisième du 3 au 10 septembre de la même année.

Le facteur méthode de plantation présentait trois niveaux : PRÉ-ENFOUI, ENFOUI et CONVENTIONNEL. Les semis produits par la méthode du pré-enfouissement ont d'abord été cultivés dans des récipients 67-50 (67 cavités de 50 cm<sup>3</sup>) jusqu'à la 16e semaine, puis ils ont été transférés dans des récipients 45-110 (45 cavités de 110 cm<sup>3</sup>) en prenant soin d'enfouir dans la tourbe les cinq premiers centimètres de la tige. Tous les récipients 45-110 ont été transférés à l'extérieur quatre semaines plus tard. Cette méthode

permettait le développement d'un système racinaire adventif durant la période de production en serres, avant leur plantation. Ces semis étaient plantés avec le dessus de la carotte de tourbe au niveau du sol (figure 1).

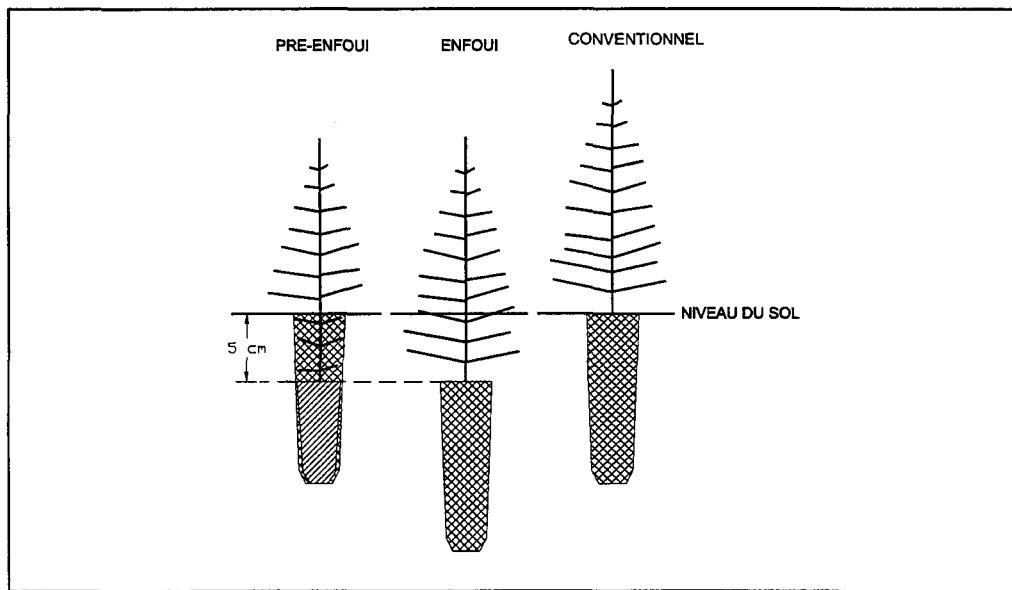


Figure 1 : Schéma des méthodes de plantation. PRÉ-ENFOUI signifie l'enfouissement des cinq premiers centimètres de tige 16 semaines après le début de la période de production ; ENFOUI signifie l'enfouissement des cinq premiers centimètres de tige lors de la plantation ; les semis du traitement CONVENTIONNEL sont plantés au collet.

Pour les niveaux ENFOUI et CONVENTIONNEL, une méthode standard utilisée dans la production commerciale de plants forestiers dans des récipients 45-110 a été appliquée (Lord *et al* 1993). Les semis ENFOUI étaient plantés plus profondément, soit en plaçant le collet à 5 cm sous la surface du sol. Les semis CONVENTIONNEL étaient plantés pour que le collet soit au niveau du sol comme on le suggère généralement (Schwann 1994). Cette méthode de plantation correspond également aux pratiques antérieures tel qu'indiqué par Sutton (1967).

Le facteur type de sol comprenait aussi trois niveaux : ORGANIQUE, MINÉRAL et ORGANIQUE SUR MINÉRAL. Le niveau ORGANIQUE correspondait à des microsites où la matière organique était plus épaisse que la longueur de la carotte de tourbe de 110 cm<sup>3</sup>. Le niveau MINÉRAL correspondait à des microsites où le sol était strictement minéral, sans matière organique sur le dessus. Le niveau ORGANIQUE SUR MINÉRAL correspondait à des microsites où il y avait une couche de sol organique d'environ 5 cm au-dessus du sol minéral.

Huit combinaisons méthode de plantation-type de sol ont donc été étudiées. La combinaison méthode de plantation CONVENTIONNEL et type de sol ORGANIQUE SUR MINÉRAL n'a pas été utilisé puisqu'elle est similaire à la combinaison méthode de plantation CONVENTIONNEL et type de sol ORGANIQUE et qu'elle n'apporte donc aucune condition nouvelle pour des semis non-enfouis comparativement aux autres combinaisons.

## 2.2 MESURE DU TAUX DE SURVIE ET DE LA CROISSANCE

Un échantillonnage de semis a été effectué annuellement pendant quatre années sur les parcelles temps 1 à 4. Un relevé du taux de survie a été effectué annuellement sur les parcelles temps 4 à 7. Les échantillonnages ont eu lieu du 15 au 16 octobre 1996, du 6 au 8 octobre 1997, du 21 au 23 septembre 1998 et du 7 au 9 septembre 1999. Les taux de survie ont été compilés au même moment à l'exception de celui de 1997 qui a été effectué en juillet pour des raisons d'ordre pratique.

L'échantillonnage de l'automne 1996 comprenait 357 plants sur une possibilité de 360 (trois plants morts), 346 plants ont été retrouvés en 1997, 323 plants en 1998 et 305 plants en 1999. Les relevés de survie annuelle ont été effectués en répertoriant chacun des plants et en notant s'il était mort ou vivant. Les 1440 semis des parcelles non-échantillonnées au moment du dernier relevé en 1999 ont été utilisés (4 années d'échantillonnage x 360 semis).

Les semis ont été conservés en chambre froide jusqu'au moment des mesures. Une fois les racines nettoyées, la hauteur de la tige, le diamètre au collet, le diamètre à 5 cm au-dessus du collet (échantillonnage 4 seulement), la biomasse sèche de la tige et la biomasse sèche des racines non-adventives ont été mesurés sur chacun des semis. Une attention particulière a été portée aux racines adventives caulinaires qui ont été dénombrées, séchées puis pesées.

Afin de vérifier la présence ou non du phénomène du défilement inverse, l'indice delta D a été utilisé (Scheiner et Gurevitch 1993). Il a été obtenu lors du 4<sup>ème</sup> échantillonnage en faisant la différence entre le diamètre au niveau du collet et celui à 5 cm au-dessus du collet, mesure correspondant à la hauteur d'enfouissement de la tige pour les semis du traitement ENFOUI et PRÉ-ENFOUI. Une valeur positive à cet indice signifie que la forme de la base de la tige ne présente pas de défilement inverse, alors que c'est le contraire lorsque l'indice est négatif.

### 2.3 ÉCHANGES GAZEUX

Les mesures d'échanges gazeux ont eu lieu du 31 août au 2 septembre 1998. Les plants ont été sélectionnés dans les parcelles du troisième temps de récolte (21 au 23 septembre 1998). Une relation peut ainsi être établie entre les échanges gazeux et les paramètres de croissance obtenus lors de l'échantillonnage. Le facteur date de plantation n'a pas été utilisé afin d'obtenir une plus grande homogénéité dans les données. Les semis de la première date de plantation (juin) ont été retirés puisqu'ils étaient en moyenne de taille supérieure aux semis des 2 autres date de plantation. À partir des semis restants, une liste a été compilée et amenée sur le terrain. Une fois sur le terrain, dans chacun des blocs, les deux premiers semis rencontrés pour chaque combinaison méthodes de plantation-type de sols ont été identifiées pour les mesures (5 blocs x 8 méthodes x 2 semis = 80 semis x 2 mesures). Quelques aiguilles ont été enlevées sur la pousse sélectionnée pour permettre une fermeture étanche de la cuvette lors de la prise de mesures. Les plants ont eu au minimum une heure pour s'acclimater à ce stress. Les mesures ont été prises avec un LI-

6200 de LI-COR (1989). Trente minutes avant la prise de mesure, l'appareil a été placé dans les mêmes conditions que les semis et a été calibré selon les procédures de LI-COR (1989). Le taux de photosynthèse a été mesuré en  $\mu\text{mole CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  à partir du différentiel de  $\text{CO}_2$  pendant une minute (3x20 secondes). La cuvette un quart de litre de LI-COR a été utilisée. Les plants sélectionnés des blocs 1 à 3 ont été mesurés une première fois le 31 août, l'ensemble des semis sélectionnés ont été mesurés le premier septembre et ceux des blocs 4 et 5 ont été mesurés une deuxième fois le 2 septembre 1998. Les mesures ont été prises sous lumière saturante grâce à deux ampoules halogènes de 50 watts (12 volts) à faisceau étroit. Le LI-COR permet de mesurer directement la quantité de lumière dans la chambre foliaire et, d'après la littérature, une lumière de  $1000 \mu\text{moles} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  permet la saturation en lumière de l'épinette noire (Lamhamedi et Bernier 1994). Suite à la dernière mesure du taux de photosynthèse, les pousses ont été recueillies dans des sacs pré-identifiés et amenées au laboratoire. La surface foliaire totale de chacune des pousses d'épinette noire recueillies sur le terrain a été mesurée à l'aide d'un numériseur et du logiciel MacNeedle (Régent Instrument inc. 1998). Les taux de photosynthèse nette ont ensuite été obtenus en divisant les taux de photosynthèse mesurés par leur surface foliaire respective. L'appareil permet également d'obtenir d'autre données physiologiques. La conductance stomatale est une variable obtenue directement par l'appareil. Le coefficient d'utilisation de l'eau a été obtenu indirectement en divisant le taux de photosynthèse net par la transpiration mesurée par le LI-COR. Cette variable donne le ratio entre les moles de  $\text{CO}_2$  assimilées et les moles de  $\text{H}_2\text{O}$  transpirées.

## 2.4 ANALYSES FOLIAIRES

Un relevé de quarante échantillons d'aiguilles a été envoyé au laboratoire de chimie organique-inorganique à la direction de la recherche forestière du ministère des Ressources naturelles du Québec (MRN) afin que leur composition chimique soit déterminée. Des semis récoltés lors de l'échantillonnage de 1998 ont été utilisés. Le facteur date de plantation n'a pas été utilisé. Seuls les semis de la première date de plantation (juin) ont été sélectionnés afin d'obtenir une plus grande homogénéité. Des aiguilles ont été prélevées sur tous ces semis. Dans chaque bloc, un échantillon a été préparé pour chacune des combinaisons de facteur méthode de plantation-type de sol (5 blocs x 8 méthodes-sols = 40 échantillons). Les analyses ont été effectuées selon la méthode standard utilisée au MRN (Thomas *et al.* 1967; Canadian Society of Soil Science 1993).

## 2.5 TRAITEMENT DES DONNÉES

Les données ont été analysées à l'aide du logiciel SAS system (SAS Institute Inc. 1990). Un test de Bartlett a été appliqué afin de vérifier l'homogénéité des variances et une transformation logarithmique a été effectuée lorsque nécessaire (Kirk 1968; Scherrer 1984). Le nombre de racines adventives a été transformé par une racine carrée afin que sa distribution soit normale. Des analyses de variance (procédure GLM) ont été effectuées pour le nombre de racines adventives, la biomasse sèche des racines adventives, la hauteur de la tige, le diamètre au collet, le diamètre à 5 cm au-dessus du collet, l'indice Delta D, la biomasse sèche de la tige, la biomasse sèche des racines, le taux de photosynthèse nette, la conductance stomatale, le coefficient d'utilisation de l'eau et la composition minérale (Kirk

1968). Des analyses de contrastes ont été utilisées lorsque nécessaire (Steel and Torrie 1980). Pour le diamètre à 5 cm au-dessus du collet et l'indice Delta D, un test de comparaison multiple (test de Tukey) a été utilisé puisqu'il n'y avait qu'une seule année d'échantillonnage. Pour l'indice Delta D une analyse de variance a aussi été appliquée après la séparation *a posteriori* des semis avec et sans racines adventives.

Des tests de Khi-carré ont été utilisés pour analyser le taux de survie et le taux de semis ayant développé des racines adventives (Scherrer 1984; Zar 1984). Pour le facteur méthode de plantation, les semis plantés dans un sol organique sur minéral n'ont pas été utilisés dans l'analyse et pour le facteur type de sol, les semis conventionnel n'ont pas été utilisés dans l'analyse afin de ne pas biaiser les résultats puisqu'ils ne sont pas complets (tableau 2). Les moyennes étaient jugées significativement différentes au seuil de  $p < 0.05$ .

# **CHAPITRE 3**

## **RÉSULTATS**

### 3.1 MESURES INITIALES DE CROISSANCE

La hauteur de la tige, le diamètre au collet, la biomasse sèche de la tige et des racines ainsi que le nombre de racines adventives par plants ont été déterminés avant la plantation des semis afin de connaître leurs caractéristiques initiales. Un échantillonnage de 180 semis (3 dates de plantation x 2 types de production x 30 semis) issus de chacune des combinaisons de facteurs a été effectué (tableau 3).

Tableau 3 : Caractéristiques morphologiques moyennes avec l'écart type des semis au moment de la plantation.

Date de plantation	Type de production	Hauteur (mm)	Diamètre collet (mm)	Biomasse tige (g)	Biomasse racines non-adventives (g)	Nombre de racines adventives /plant
Juin	Standard	185±32	2.00±0.31	1.03±0.32	0.44±0.13	0
	Pré-enfoui	184±26	1.77±0.15	0.67±0.18	0.33±0.10	0
Août	Standard	175±29	2.18±0.39	0.99±0.33	0.73±0.24	0
	Pré-enfoui	176±20	2.06±0.34	0.68±0.16	0.52±0.11	0
Septembre	Standard	189±24	2.29±0.34	1.03±0.34	0.87±0.26	0
	Pré-enfoui	177±22	1.96±0.28	0.68±0.19	0.60±0.21	0.07±0.25

### 3.2 TAUX DE SURVIE DE LA PLANTATION

Le taux de survie global de la plantation était de 99% en 1996, de 95% en 1997, de 88% en 1998 et de 86% en 1999. Après 3 ans, ce résultat est légèrement inférieur à celui des plantations équivalentes au Saguenay Lac-St-Jean suivies par le ministère des Ressources naturelles du Québec (MRN), lequel se situe à environ 90%, mais huit année après la plantation (Trottier 1998). Plusieurs semis ont été affectés par deux gels tardifs qui

ont eu lieu les 27 et 31 mai 1998, ces gels semblent avoir affectés négativement le taux de survie des plants. En effet, ce taux est passé de 95% en 1997 à 88% en 1998. Plusieurs semis ont d'ailleurs perdu leur pousse annuelle cette année là. Le facteur date de plantation n'a pas influencé significativement le taux de survie de la plantation contrairement au facteur méthode de plantation (tableau 4). Les semis du traitement ENFOUI ont un taux de survie inférieur aux deux autres traitements en 1997 et 1998 mais il n'y a plus de différence entre les méthodes de plantation en 1999. Le facteur type de sol a aussi significativement influencé le taux de survie des plants lors de l'échantillonnage de 1999 (tableau 4). Les plants mis en terre dans un sol exclusivement minéral ont un taux de survie significativement supérieur aux autres semis après 3 ans (1999).

### **3.3 RACINES ADVENTIVES**

Des racines adventives se sont développées sur 2% de l'ensemble des semis en 1996, sur 31% en 1997, sur 42% en 1998 et sur 53% en 1999. Pour les semis ayant été placés sous des conditions favorisant le développement de racines adventives (traitement ENFOUI et PRÉ-ENFOUI), 3% des semis possédaient des racines adventives en 1996 alors que le taux augmentait à 40% en 1997, 55% en 1998 et 62% en 1999. Elles se sont développées exclusivement sur la partie enfouie de la tige des semis. Ces racines étaient pour la plupart solides, brunâtres et lignifiées (figure 2). L'exemple de semis du traitement PRÉ-ENFOUI avec racines adventives vaut tout autant pour les semis du traitement ENFOUI.

Tableau 4 : Taux de survie de la plantation en fonction des facteurs date de plantation, méthode de plantation et type de sol pour les quatre années d'échantillonnage. Un test de Khi-carré a été appliqué.

Années	Date de plantation			Khi-carré
	Juin %	Août %	Septembre %	
1996	99	99	100	0.366
1997	94	96	96	0.578
1998	86	89	89	0.302
1999	85	88	87	0.343
Années	Méthode de plantation			Khi-carré
	Enfoui %	Pré-enfoui %	Conventionnel %	
1996	100	99	100	0.190
1997	93	97	97	0.001*
1998	85	89	90	0.042*
1999	86	86	87	0.935
Années	Type de sol			Khi-carré
	MIN %	ORG %	O-M %	
1996	99	99	99	0.911
1997	95	94	96	0.295
1998	90	85	88	0.099
1999	90	83	85	0.015*

\* : significatif

ORG : sol organique

MIN : sol minéral

O-M : mince couche de sol organique (5 cm) sur du sol minéral

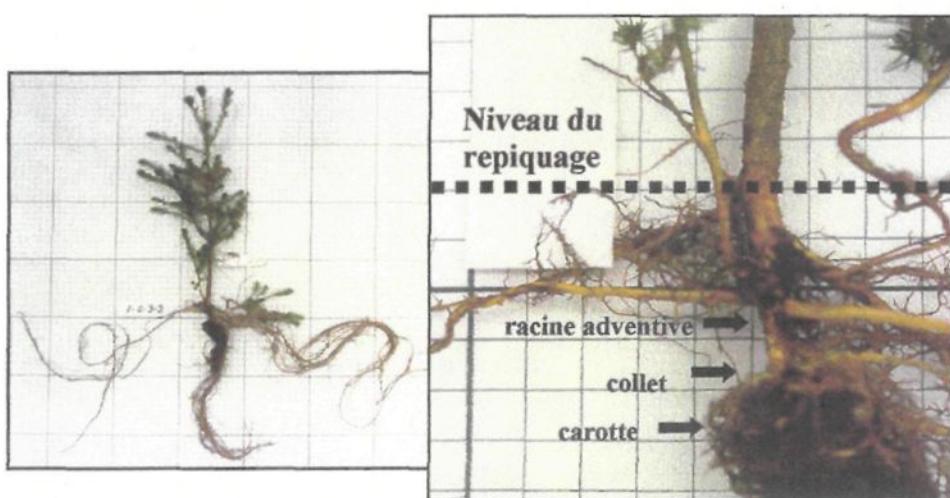


Figure 2 : Semis pré-enfoui planté en 1996 et récolté en 1998.

Les facteurs date de plantation et type de sol n'ont pas influencé significativement le nombre de semis ayant développé au moins une racine adventive alors que le facteur méthode de plantation a significativement influencé ce nombre (tableau 5). Le traitement PRÉ-ENFOUI a permis d'obtenir rapidement beaucoup de semis avec au moins une racine adventive, soit déjà près de 8% en 1996 et plus de 65% en 1998 et 1999. Le traitement ENFOUI suit de près le traitement PRÉ-ENFOUI avec plus de 55% de semis avec au moins une racine adventive en 1999. Le traitement CONVENTIONNEL ne permet pas d'obtenir aussi rapidement des semis avec des racines adventives. Par contre en 1999, près de 25% des semis du traitement CONVENTIONNEL possèdent au moins une racine adventive, un bond considérable comparativement au  $\pm 5\%$  des deux années précédentes.

Les facteurs date de plantation et type de sol n'ont pas influencé significativement le nombre moyen de racines adventives par semis (tableau 6). Le facteur méthode de plantation a significativement affecté le nombre moyen de racines adventives par plant (M,  $p=0.0001$ ) et leur développement dans le temps (AxM,  $p=0.0001$ , tableau 6). Les semis pré-enfouis ont un nombre moyen de racines adventives supérieur à chaque année suivi de près par les semis enfouis alors que les semis conventionnels ont beaucoup moins de racines adventives (figure 3). Le nombre moyen de racines adventives des semis enfouis et pré-enfouis augmente plus rapidement que celui des semis conventionnels (figure 3).

Tableau 5 : Pourcentage de semis ayant développé au moins une racine adventive en fonction des facteurs date de plantation, méthode de plantation et type de sol pour les quatre années d'échantillonnage. Un test de Khi-carré a été appliqué.

		Date de plantation			Khi-carré
Années	%	Juin	Août	Septembre	
1996	0.8	0.8		4.2	0.097
1997	28.0		36.5	29.2	0.316
1998	44.2		38.2	44.0	0.590
1999	43.3		57.6	56.9	0.069
		Méthode de plantation			Khi-carré
Années	%	Enfoui	Pré-enfoui	Conventionnel	
1996	0		7.8	0	0.001*
1997	32.2		47.7	5.8	0.001*
1998	44.9		65.4	4.7	0.001*
1999	55.6		65.4	24.7	0.001*
		Type de sol			Khi-carré
Années	%	MIN	ORG	O-M	
1996	2.2		5.6	0	0.063
1997	43.3		36.5	38.8	0.640
1998	60.3		51.2	55.7	0.514
1999	64.9		56.6	64.0	0.509

\* : significatif

ORG : sol organique

MIN : sol minéral

O-M : mince couche de sol organique (5 cm) sur du sol minéral

Tableau 6 : Analyse de variance du nombre moyen de racines adventives par semis transformées en fonction de l'année d'échantillonnage, de la date de plantation, de la méthode de plantation et du type de sol. Des contrastes ont été effectués sur les facteurs et les interactions principales significatives.

Source de variation	dl	C-M	F	Pr>F
Parcelle principale				
Bloc (B)	4	1.2724		
Année d'échantillonnage (A)	3	11.0199	22.74	0.0001*
Linéaire	1	31.4358	64.88	0.0001*
Quadratique	1	0.9316	1.92	0.1908
Erreur	12	0.4845		
Sous-parcelle				
Date (D)	2	0.2315	1.54	0.2140
Méthode (M)	2	10.5204	70.13	0.0001*
Con. vs Trait	1	17.8994	119.32	0.0001*
Pré vs Enf	1	2.9804	19.87	0.0001*
Sol (S)	2	0.4095	2.73	0.0656
DxM	4	0.1009	0.67	0.6111
DxS	4	0.0343	0.23	0.9226
AxD	6	0.1007	0.67	0.6729
AxM	6	1.2649	8.43	0.0001*
Lin x Con. vs Trait	1	4.9491	32.99	0.0001*
Lin x Pré vs Enf	1	0.0352	0.23	0.6283
Quad x Con. vs Trait	1	1.0961	7.31	0.0070*
Quad x Pré vs Enf	1	1.1502	7.67	0.0057*
AxS	6	0.1305	0.87	0.5165
AxDxM	12	0.0902	0.60	0.8426
AxDxS	12	0.2774	1.85	0.0366*
Erreur	1255	0.15		

\* : significatif

Con. vs Trait : méthode de plantation CONVENTIONNEL versus méthode de plantation ENFOUI et PRÉ-ENFOUI

Pré vs Enf : méthode de plantation PRÉ-ENFOUI versus méthode de plantation ENFOUI

Min vs 2Org: type de sol minéral versus type de sol contenant de l'organique

O-M vs O-O: type de sol organique sur minéral versus type de sol organique

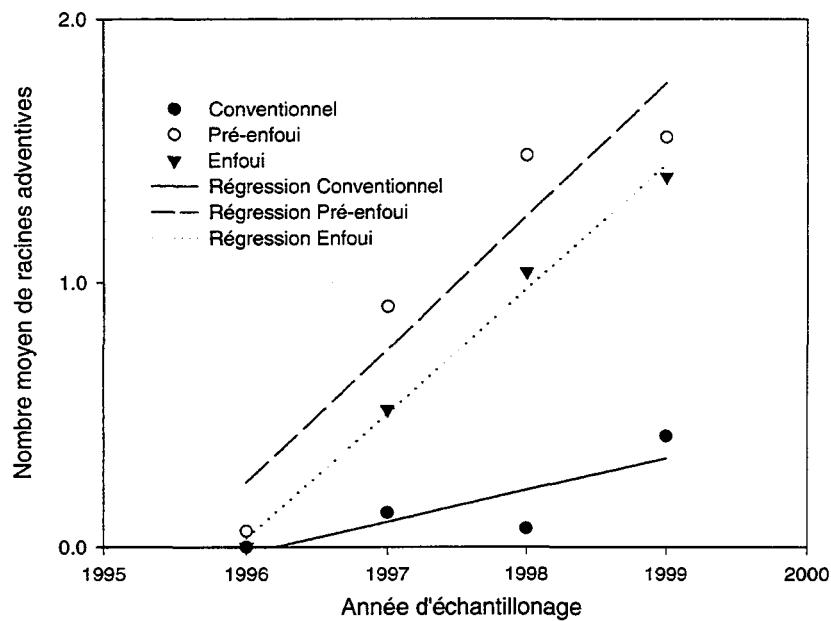


Figure 3 : Variation du nombre moyen de racines adventives par semis en fonction du temps d'échantillonnage pour le facteur méthode de plantation.

Le facteur date de plantation n'a pas influencé significativement la biomasse des racines adventives (tableau 7). Le facteur méthode de plantation a affecté significativement la biomasse des racines adventives ( $M, p=0.0001$ ) et son développement dans le temps ( $AxM, p=0.0001$ , tableau 7). Les semis pré-enfouis présentent un développement plus important de leur système racinaire adventif suivi de très près par les semis enfouis et de loin par les semis conventionnels (figure 4A). Le facteur type de sol a affecté la biomasse des racines adventives ( $S, p=0.0292$ , tableau 7). Les semis plantés dans un sol organique sur du minéral ont une biomasse des racines adventives supérieur, suivi par les semis plantés dans un sol minéral et ceux plantés dans un sol organique (figure 4B).

Tableau 7 : Analyse de variance de la biomasse des racines adventives transformée en fonction de l'année d'échantillonnage, de la date de plantation, de la méthode de plantation et du type de sol. Des contrastes ont été effectués sur les facteurs et les interactions principales significatives.

Source de variation	dl	C-M	F	Pr>F
Parcelle principale				
Bloc (B)	4	33.1234		
Année d'échantillonnage(A)	3	196.6923	20.92	0.0001*
Linéaire	1	589.5381	62.70	0.0001*
Quadratique	1	0.5956	0.06	0.8055
Erreur	12	9.4021		
Sous-parcelle				
Date (D)	2	0.8374	0.43	0.6491
Méthode (M)	2	125.1790	64.63	0.0001*
Con. vs Trait	1	202.4870	104.55	0.0001*
Pré vs Enf	1	45.7537	23.62	0.0001*
Sol (S)	2	6.8601	3.54	0.0292*
Min vs 2Org	1	4.2549	2.20	0.1385
O-M vs O-O	1	7.0195	3.62	0.0572
DxM	4	1.6656	0.86	0.4874
DxS	4	0.3485	0.18	0.9488
AxD	6	1.3482	0.70	0.6528
AxM	6	17.6293	9.10	0.0001*
Lin x Con. vs Trait	1	68.0454	35.13	0.0001*
Lin x Pré vs Enf	1	0.2416	0.12	0.7240
Quad x Con. vs Trait	1	6.0271	3.11	0.0780
Quad x Pré vs Enf	1	24.7165	12.76	0.0004*
AxS	6	2.7580	1.42	0.2019
AxDxM	12	1.7425	0.90	0.5468
AxDxS	12	2.3897	1.23	0.2538
Erreur	1255	1.9368		

\* : significatif

Con. vs Trait : méthode de plantation CONVENTIONNEL versus méthode de plantation ENFOUI et PRÉ-ENFOUI

Pré vs Enf : méthode de plantation PRÉ-ENFOUI versus méthode de plantation ENFOUI

Min vs 2Org: type de sol minéral versus type de sol contenant de l'organique

O-M vs O-O: type de sol organique sur minéral versus type de sol organique

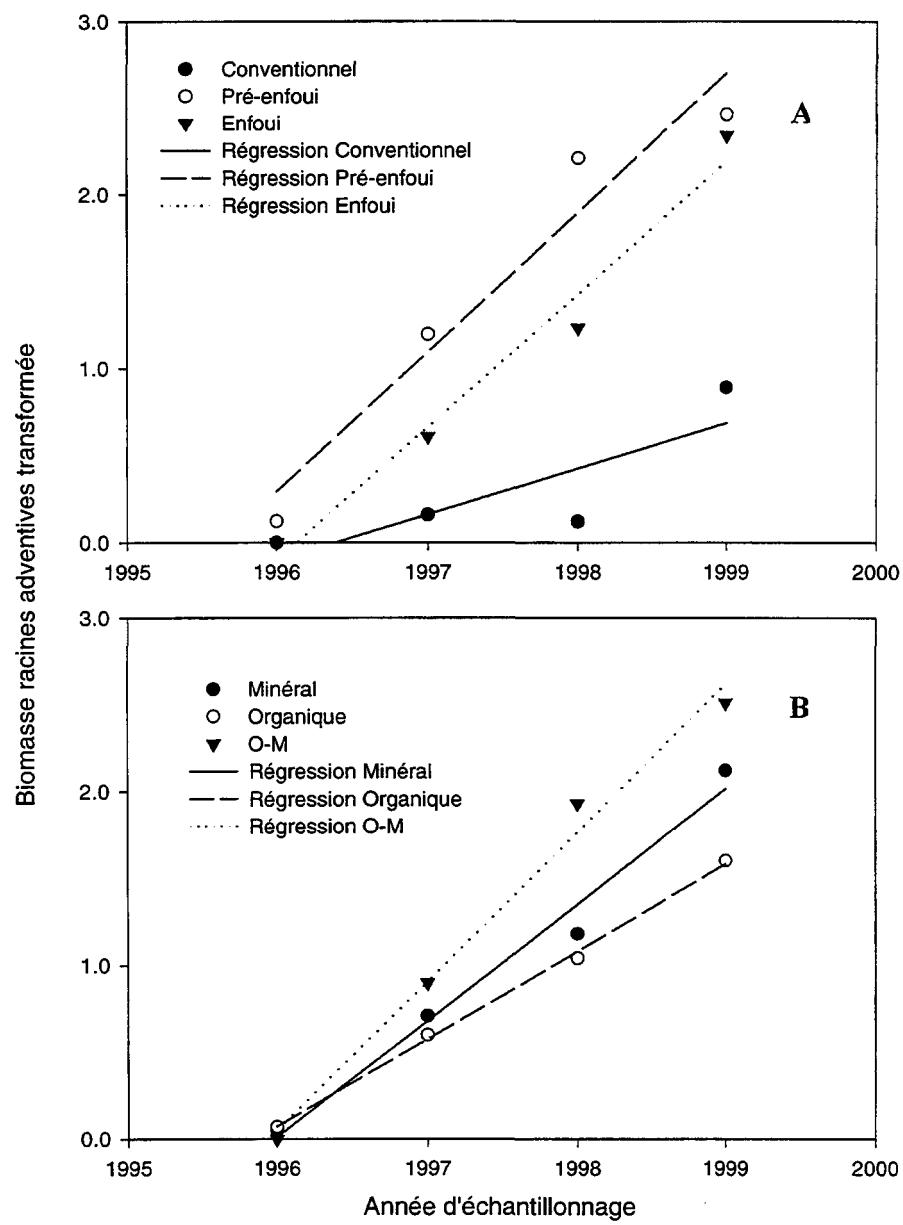


Figure 4 : Biomasse des racines adventives transformée en fonction du temps d'échantillonnage pour les facteurs méthode de plantation (A) et type de sol (B).

### 3.4 PARAMÈTRES DE CROISSANCE

Les paramètres de croissance utilisés pour étudier l'effet des traitements sur les semis étaient la hauteur de la tige transformée, le diamètre au collet transformée, le diamètre à 5 cm au-dessus du collet transformé, la biomasse sèche de la tige transformée et la biomasse sèche racinaire transformée.

Le facteur date de plantation a significativement affecté la hauteur des semis (D,  $p=0.0001$ ) et leur croissance en hauteur dans le temps (AxD,  $p=0.0144$ , tableau 8). Les semis plantés en juin sont toujours plus grands et ils présentent une croissance supérieure à ceux plantés en août et en septembre (figure 5A). Le facteur méthode de plantation a aussi influencé significativement la taille des semis (M,  $p=0.0001$ ) et leur croissance en hauteur dans le temps (AxM,  $p=0.0001$ , tableau 8). Étant donné leur méthode de préparation, les semis pré-enfouis étaient plus petits lors de l'année de la plantation. Par la suite, ils font partie des plus grands avec les semis enfouis (figure 5B). Sauf pour l'année de plantation, les semis pré-enfouis et enfouis montrent systématiquement une meilleure croissance en hauteur que les semis conventionnels (figure 5B). Le facteur type de sol a aussi influencé significativement la taille des semis (S,  $p=0.0085$ ) mais pas leur croissance en hauteur dans le temps (tableau 8). Les semis plantés dans du sol exclusivement organique sont significativement plus petits que ceux plantés dans du sol avec une composante minérale (figure 5C).

Tableau 8 : Analyse de variance de la hauteur de la tige transformée en fonction de l'année d'échantillonnage, de la date de plantation, de la méthode de plantation et du type de sol. Des contrastes ont été effectués sur les facteurs et les interactions principales significatifs.

Source de variation	dl	C-M	F	Pr>F
Parcelle principale				
Bloc (B)	4	0.4207		
Année d'échantillonnage (A)	3	15.0961	60.01	0.0001*
Linéaire	1	43.2683	172.00	0.0001*
Quadratique	1	0.1275	0.51	0.4902
Erreur	12	0.2516		
Sous-parcelle				
Date (D)	2	0.5867	16.16	0.0001*
Linéaire (Lin)	1	0.8294	22.85	0.0001*
Quadratique (Quad)	1	0.3441	9.48	0.0021*
Méthode (M)	2	0.3260	8.98	0.0001*
Con. vs Trait.	1	0.6493	17.89	0.0001*
Pré vs Enf	1	0.0018	0.05	0.8220
Sol (S)	2	0.1739	4.79	0.0085*
Min vs 2Org	1	0.0481	1.33	0.2499
O-M vs O-O	1	0.2484	6.84	0.0090*
DxM	4	0.0551	1.52	0.1947
DxS	4	0.0271	0.75	0.5599
AxD	6	0.0966	2.66	0.0144*
Lin x Lin	1	0.2250	6.20	0.0129*
Lin x Quad	1	0.0350	0.97	0.3261
Quad x Lin	1	0.0838	2.31	0.1289
Quad x Quad	1	0.0003	0.01	0.9247
AxM	6	0.1805	4.97	0.0001*
Lin x Con. vs Trait	1	0.4875	13.43	0.0003*
Lin x Pré vs Enf	1	0.0247	0.68	0.4097
Quad x Con. vs Trait	1	0.0272	0.75	0.3868
Quad x Pré vs Enf	1	0.3914	10.78	0.0011*
AxS	6	0.0328	0.90	0.4924
AxDxM	12	0.0404	1.11	0.3451
AxDxS	12	0.0276	0.76	0.6932
Erreur	1255	0.0363		

\* : significatif

Con. vs Trait : méthode de plantation CONVENTIONNEL versus méthode de plantation ENFOUI et PRÉ-ENFOUI

Pré vs Enf : méthode de plantation PRÉ-ENFOUI versus méthode de plantation ENFOUI

Min vs 2Org: type de sol minéral versus type de sol contenant de l'organique

O-M vs O-O: type de sol organique sur minéral versus type de sol organique

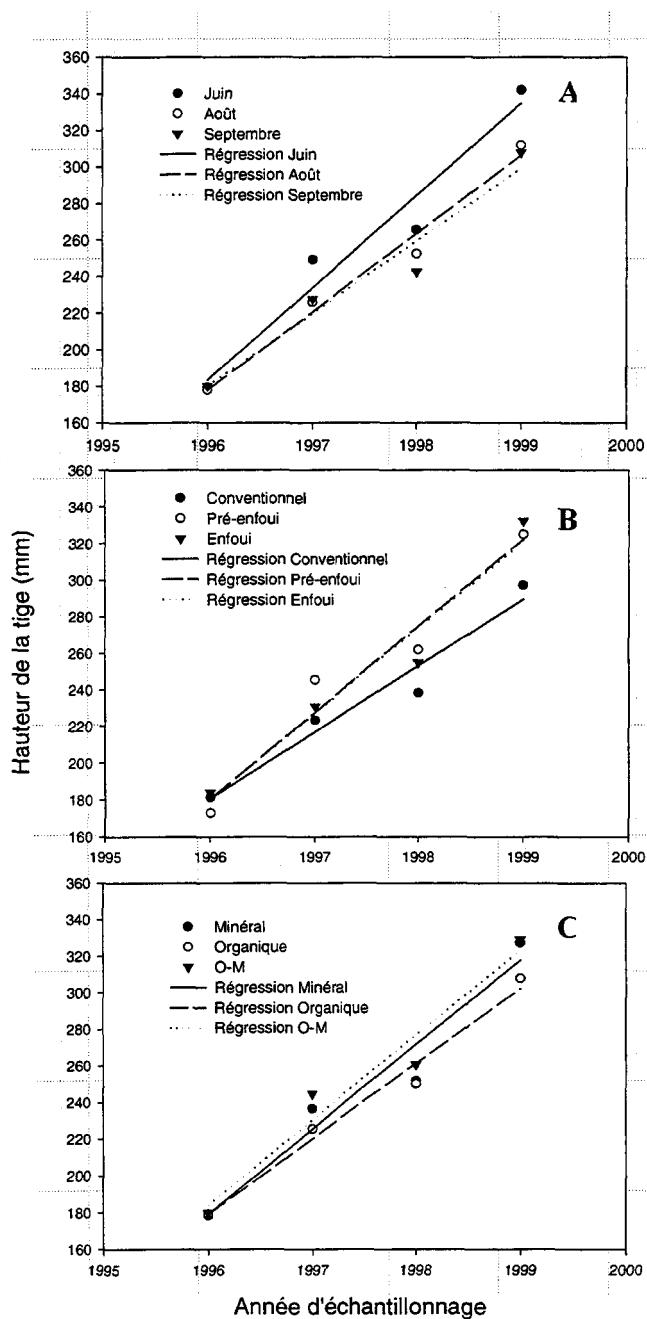


Figure 5 : Variation de la hauteur de la tige en fonction du temps d'échantillonnage pour les facteurs date de plantation (A), méthode de plantation (B) et type de sol (C).

Le facteur date de plantation a significativement affecté le diamètre au niveau du collet des semis (D, p=0.0001) et leur croissance dans le temps (Ax D, p=0.0017, tableau 9). Les semis plantés en juin montrent un diamètre au collet supérieur à chaque année. Ces semis présentent également une augmentation plus importante de ce diamètre suivis par les semis d'août et de septembre (figure 6A). Le facteur méthode de plantation a significativement affecté le diamètre au collet (M, p=0.0001, tableau 9). Les semis pré-enfouis montrent un diamètre inférieur aux deux autres méthodes à chaque année et les semis conventionnels ont le plus gros diamètre pour les trois dernières années mais leur taux de croissance est semblable (figure 6B). Le facteur type de sol n'a pas influencé significativement le diamètre au collet (tableau 9). Le facteur date de plantation a influencé significativement le diamètre pris à 5 cm au-dessus du collet mesuré en 1999 (D, p=0.0001, tableau 10). Les semis plantés en juin ont le plus gros diamètre à 5 cm au-dessus du collet suivi par ceux d'août et de septembre (tableau 10). Le facteur méthode de plantation n'a pas affecté significativement le diamètre à 5 cm au-dessus du collet. Le facteur type de sol a aussi affecté significativement le diamètre à 5 cm au-dessus du collet (S, p=0.0056, tableau 10). Les semis plantés dans un sol organique ont un diamètre inférieur aux autres types de sol (tableau 10).

Le facteur date de plantation a significativement affecté la biomasse de la tige (D, p=0.0001) et son développement dans le temps (Ax D, p=0.0001, tableau 11). Les semis plantés en juin sont plus gros et ils montrent une meilleure croissance suivis par les semis plantés en août et en septembre (figure 7A). Le facteur méthode de plantation a influencé

significativement la biomasse de la tige (M,  $p=0.0014$ ) et son développement dans le temps (AxM,  $p=0.0014$ , tableau 11). Les semis pré-enfouis étaient plus petit l'année de la plantation mais ils présentent la croissance la plus rapide ; ils ont donc rattrapé leur retard.

Tableau 9 : Analyse de variance du diamètre au collet transformé en fonction de l'année d'échantillonnage, de la date de plantation, de la méthode de plantation et du type de sol. Des contrastes ont été effectués sur les facteurs et les interactions principales significatives.

Source de variation	dl	C-M	F	Pr>F
Parcelle principale				
Bloc (B)	4	4.5053		
Année d'échantillonnage (A)	3	23.4569	33.63	0.0001*
Linéaire	1	65.9762	94.58	0.0001*
Quadratique	1	0.1726	0.25	0.6278
Erreur	12	0.6976		
Sous-parcelle				
Date (D)	2	1.3825	21.01	0.0001*
Linéaire (Lin)	1	2.1931	33.32	0.0001*
Quadratique (Quad)	1	0.5720	8.69	0.0033*
Méthode (M)	2	2.2426	34.07	0.0001*
Con. vs Trait.	1	1.7150	26.06	0.0001*
Pré vs Enf	1	2.7228	41.37	0.0001*
Sol (S)	2	0.0239	0.36	0.6956
DxM	4	0.3257	4.95	0.0006*
DxS	4	0.0186	0.28	0.8895
AxD	6	0.2341	3.56	0.0017*
Lin x Lin	1	1.0031	15.24	0.0001*
Lin x Quad	1	0.1443	2.19	0.1389
Quad x Lin	1	0.0413	0.63	0.4287
Quad x Quad	1	0.0354	0.54	0.4637
AxM	6	0.1275	1.94	0.0718
AxS	6	0.1363	2.07	0.0540
AxDxM	12	0.1266	1.92	0.0281*
AxDxS	12	0.0644	0.98	0.4668
Erreur	1255	0.0658		

\* : significatif

Con. vs Trait : méthode de plantation CONVENTIONNEL versus méthode de plantation ENFOUI et PRÉ-ENFOUI

Pré vs Enf : méthode de plantation PRÉ-ENFOUI versus méthode de plantation ENFOUI

Min vs 2Org: type de sol minéral versus type de sol contenant de l'organique

O-M vs O-O: type de sol organique sur minéral versus type de sol l'organique

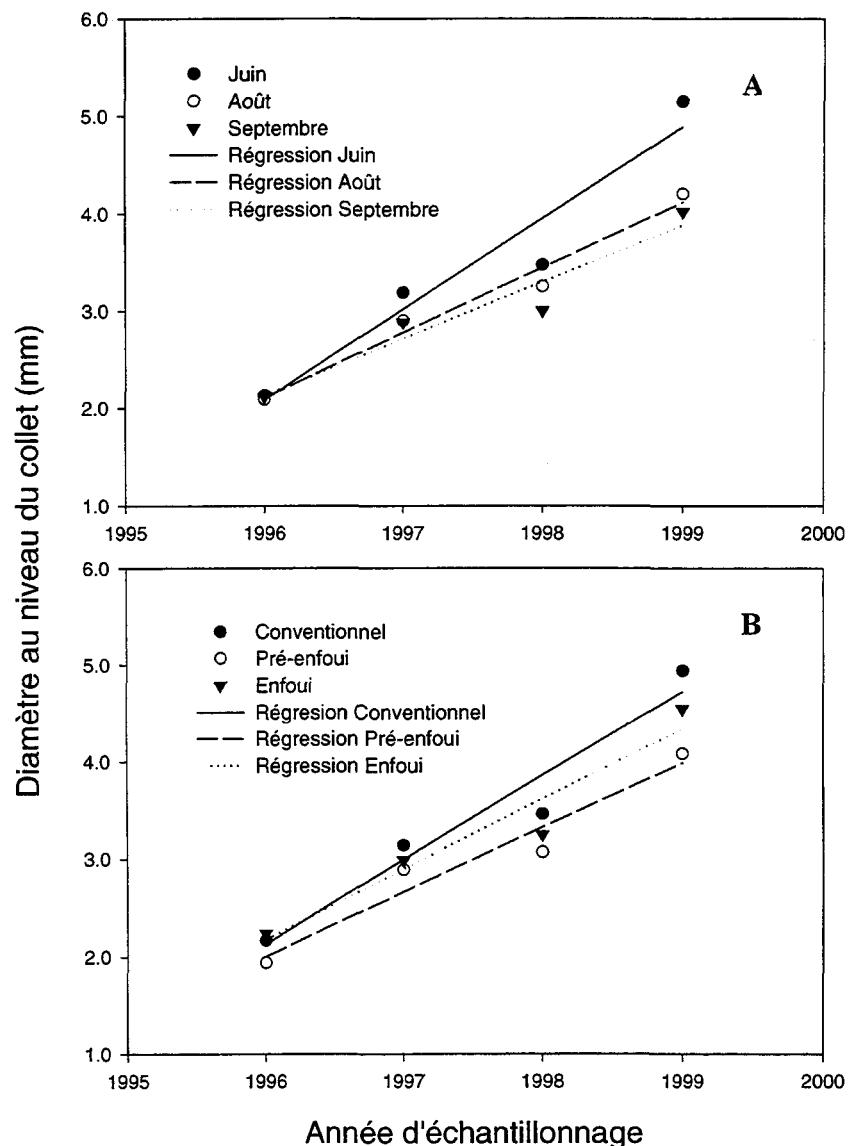


Figure 6 : Variation du diamètre au collet en fonction du temps d'échantillonnage pour les facteurs date de plantation (A) et méthode de plantation (B).

Tableau 10 : Analyse de variance du diamètre à 5 cm au-dessus du collet transformé et valeur moyenne du diamètre à 5 cm au-dessus du collet (mm) en 1999. Les valeurs qui ne partagent pas la même lettre sont significativement différentes les unes des autres.

Source de variation	dl	C-M	F	Pr>F
Bloc (B)	4	2.0748		
Date (D)	2	0.8890	9.31	0.0001*
Méthode (M)	2	0.8890	1.32	0.2696
Sols (S)	2	0.1257	5.28	0.0056*
D*M	4	0.5042	2.32	0.0570
D*S	4	0.2216	0.35	0.8464
M*S	3	0.0331	1.72	0.1628
D*M*S	6	0.1643	0.91	0.4876
Erreur	277	0.0869		
Date	Dia5	Méthode	Dia5	Dia5
Juin	5.00 a	Conventionnel	4.31 a	Minéral
Août	4.33 b	Pré-enfoui	4.59 a	Organique
Septembre	4.21 b	Enfoui	4.58 a	O-M

\* : significatif

O-M: type de sol organique sur minéral

Dia5 : diamètre à 5 cm au-dessus du collet

Les semis enfouis ont eux aussi une croissance supérieure aux semis conventionnels (figure 7B). Le facteur type de sol a affecté significativement la biomasse de la tige (S, p=0.0041) mais il n'a pas influencé significativement son développement dans le temps (tableau 11). Les semis plantés dans un sol organique ont une biomasse caulinaire légèrement plus petite que ceux plantés dans un sol organique sur minéral (figure 7C).

Tableau 11 : Analyse de variance de la biomasse de la tige transformée en fonction de l'année d'échantillonnage, de la date de plantation, de la méthode de plantation et du type de sol. Des contrastes ont été effectués sur les facteurs et les interactions principales significatives.

Source de variation	dl	C-M	F	Pr>F
Parcelle principale				
Bloc (B)	4	15.0961		
Année d'échantillonnage (A)	3	129.3214	41.00	0.0001*
Linéaire	1	369.0658	117.01	0.0001*
Quadratique	1	1.8785	0.60	0.4552
Erreur	12	3.1542		
Sous-parcelle				
Date (D)	2	8.5793	29.90	0.0001*
Linéaire (Lin)	1	13.2709	46.26	0.0001*
Quadratique (Quad)	1	3.8878	13.55	0.0002*
Méthode (M)	2	1.9050	6.64	0.0014*
Con. vs Trait.	1	0.1491	0.52	0.4711
Pré vs Enf	1	3.6765	12.81	0.0004*
Sol (S)	2	1.5864	5.53	0.0041*
Min vs 2Org	1	0.8764	3.05	0.0807
O-M vs O-O	1	1.7411	6.07	0.0139*
DxM	4	0.9976	3.48	0.0078*
DxS	4	0.1032	0.36	0.8374
AxD	6	1.3577	4.73	0.0001*
Lin x Lin	1	5.5884	19.48	0.0001*
Lin x Quad	1	0.9779	3.41	0.0651
Quad x Lin	1	0.1162	0.40	0.5247
Quad x Quad	1	0.3533	1.23	0.2674
AxM	6	1.0453	3.64	0.0014*
Lin x Con. vs Trait	1	2.5043	8.73	0.0032*
Lin x Pré vs Enf	1	0.6659	2.32	0.1279
Quad x Con. vs Trait	1	0.2423	0.84	0.3582
Quad x Pré vs Enf	1	2.5489	8.88	0.0029*
AxS	6	0.5115	1.78	0.0992
AxDxM	12	0.4241	1.48	0.1256
AxDxS	12	0.1465	0.51	0.9090
Erreur	1255	0.2869		

\* : significatif

Con. vs Trait : méthode de plantation CONVENTIONNEL versus méthode de plantation ENFOUI et PRÉ-ENFOUI

Pré vs Enf : méthode de plantation PRÉ-ENFOUI versus méthode de plantation ENFOUI

Min vs 2Org: type de sol minéral versus type de sol contenant de l'organique

O-M vs O-O: type de sol organique sur minéral versus type de sol organique

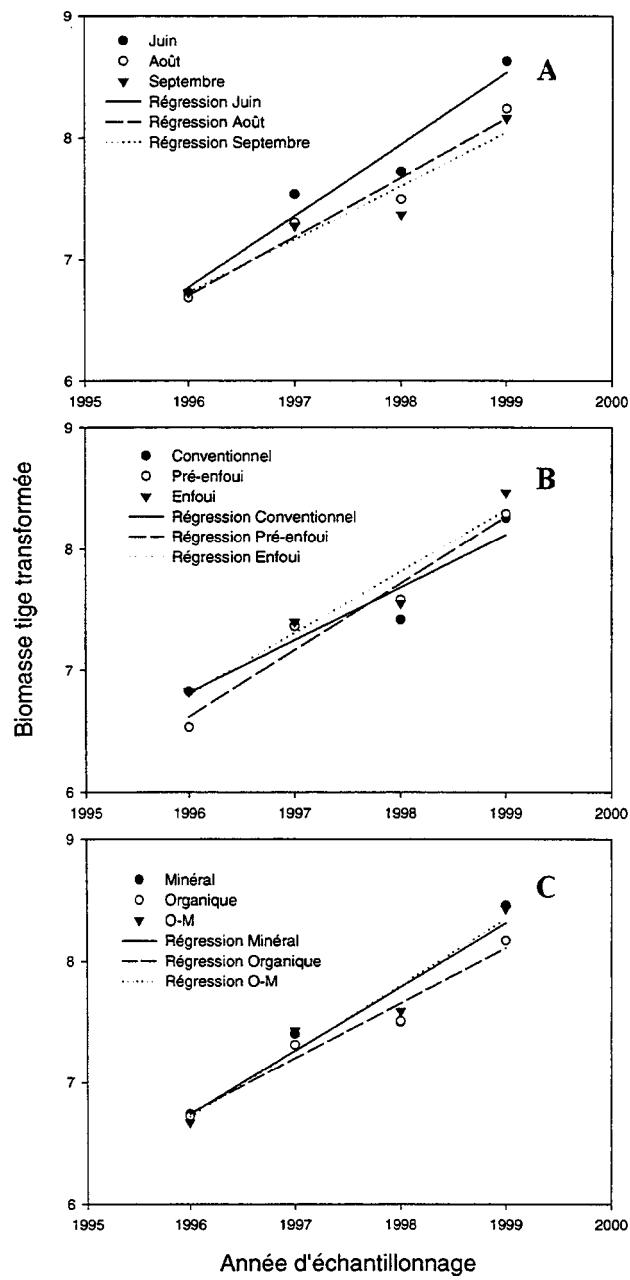


Figure 7 : Biomasse de la tige transformée en fonction du temps d'échantillonnage pour les facteurs date de plantation (A), méthode de plantation (B) et type de sol (C).

Le facteur date de plantation a significativement affecté la biomasse racinaire (D,  $p=0.0001$ ) et son développement dans le temps (AxD,  $p=0.0271$ , tableau 12). Les semis plantés en juin ont une biomasse racinaire inférieure les trois premières années (1996, 1997 et 1998) suivis par ceux d'août et de septembre alors qu'en 1999 la biomasse racinaire est semblable (figure 8A). Les semis mis en terre en juin montrent une meilleure progression de leur biomasse racinaire suivis par les semis plantés en août et ceux plantés en septembre (figure 8A). Le facteur méthode de plantation a également influencé significativement la biomasse racinaire (M,  $p=0.0001$ ). Les semis pré-enfouis ont la plus petite biomasse racinaire, suivis par les semis enfouis et conventionnels (figure 8B). Le facteur type de sol n'a pas influencé significativement la biomasse racinaire des plants (tableau 12).

Tableau 12 : Analyse de variance de la biomasse racinaire transformée en fonction de l'année d'échantillonnage, de la date de plantation, de la méthode de plantation et du type de sol. Des contrastes ont été effectués sur les facteurs et les interactions principales significatives.

Source de variation	dl	C-M	F	Pr>F
Parcelle principale				
Bloc (B)	4	5.5134		
Année d'échantillonnage (A)	3	8.3215	5.16	0.0161*
Linéaire	1	14.8452	9.20	0.0104*
Quadratique	1	2.8067	1.74	0.2118
Erreur	12	1.6133		
Sous-parcelle				
Date (D)	2	2.4245	9.59	0.0001*
Linéaire (Lin)	1	4.8459	19.18	0.0001*
Quadratique (Quad)	1	0.0032	0.01	0.9108
Méthode (M)	2	7.9215	31.35	0.0001*
Con. vs Trait	1	6.1391	24.29	0.0001*
Pré vs Enf	1	9.5506	37.79	0.0001*
Sol (S)	2	0.5587	2.21	0.1100
DxM	4	0.6813	2.70	0.0296*
DxS	4	0.0226	0.09	0.9857
AxD	6	0.6021	2.38	0.0271*
Lin x Lin	1	1.6198	6.41	0.0115*
Lin x Quad	1	0.3450	1.37	0.2429
Quad x Lin	1	0.0047	0.02	0.8918
Quad x Quad	1	0.3768	1.49	0.2223
AxM	6	0.2744	1.09	0.3686
AxS	6	0.4495	1.78	0.1000
AxDxM	12	0.2243	0.89	0.5594
AxDxS	12	0.1350	0.53	0.8934
Erreur	1255	0.2527		

\* : significatif

Con. vs Trait : méthode de plantation CONVENTIONNEL versus méthode de plantation ENFOUI et PRÉ-ENFOUI

Pré vs Enf : méthode de plantation PRÉ-ENFOUI versus méthode de plantation ENFOUI

Min vs 2Org: type de sol minéral versus type de sol contenant de l'organique

O-M vs O-O: type de sol organique sur minéral versus type de sol organique

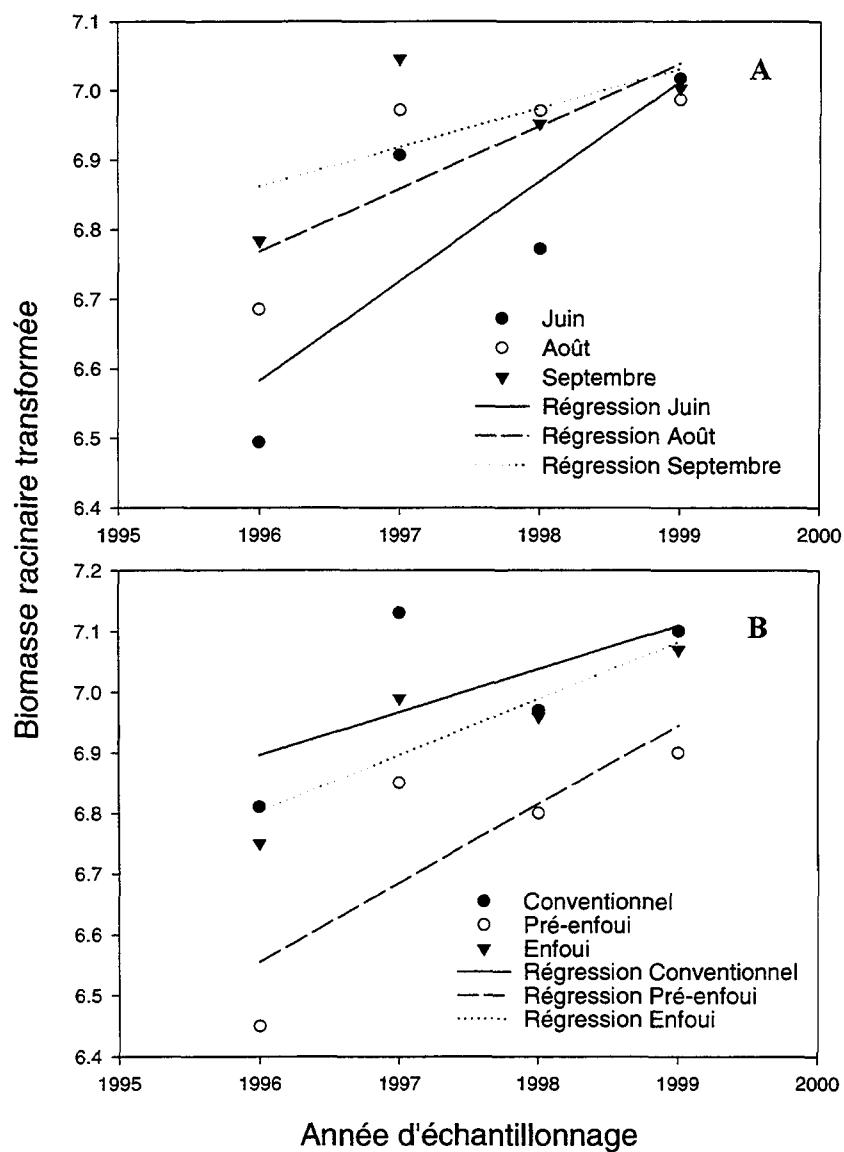


Figure 8 : Biomasse racinaire transformée en fonction du temps d'échantillonnage pour les facteurs date de plantation (A) et méthode de plantation (B).

### 3.5 DÉFILEMENT INVERSE

La différence entre le diamètre mesuré au niveau du collet et celui mesuré à 5 cm au-dessus du collet (indice Delta D) a significativement été affecté par les facteurs méthode de plantation et date de plantation (tableau 13). Une valeur positive à cet indice signifie que la forme de la base de la tige ne présente pas de défilement inverse, alors que c'est le contraire lorsque l'indice est négatif. Les semis plantés en juin ne montrent pas de défilement inverse, alors que ceux plantés en août et septembre présente cette caractéristique (tableau 13).

Le défilement inverse est très présent chez les semis pré-enfouis avec un l'indice Delta D le plus négatif (-0.51 mm, tableau 13). Il est également observé chez les semis enfouis mais très peu chez les semis conventionnels. La présence de racines adventives affecte grandement ces différences (tableau 14). Le défilement inverse est plus important encore pour les semis pré-enfouis qui ont développé des racines adventives (indice Delta D = -0.75 mm), alors qu'il est minime chez ceux qui n'ont pas de racines adventives (indice Delta D = -0.07 mm). Les semis enfouis qui ont des racines adventives présentent le défilement inverse (indice Delta D = -0.28 mm) alors que ceux qui n'ont pas de racines adventives n'en ont pas (indice Delta D = 0.31 mm). Les semis conventionnels avec ou sans racines adventives ne présentent pas de défilement inverse (indice Delta D = 0.54 mm et 0.66 mm).

Tableau 13 : Analyse de variance de l'indice Delta D (différence entre le diamètre au collet et à 5 cm au-dessus) en fonction de la date de plantation, de la méthode de plantation et du type de sol et valeurs moyennes pour les facteurs méthode et date de plantation pour l'échantillonnage de 1999. Les valeurs qui ne partagent pas la même lettre sont significativement différentes les unes des autres.

Source de variation	dl	C-M	Pr>F
Bloc (B)	4	2.4591	
Date (D)	2	2.9674	0.0411*
Méthode (M)	2	26.0726	0.0001*
Sols (S)	2	1.2294	0.2642
D*M	4	2.2878	0.0438*
D*S	4	0.4033	0.7806
M*S	3	1.2776	0.2461
D*M*S	6	0.2649	0.9423
Erreur	277		

Indice Delta D (mm)		
Méthode	Conventionnel	0.63a
	Pré-enfoui	-0.51c
	Enfoui	-0.03b
Date	Juin	0.15a
	Août	-0.13ab
	Septembre	-0.19b

\* : significatif

Tableau 14 : Analyse de variance de l'indice Delta D (différence entre le diamètre au collet et à 5 cm au-dessus) pour les semis avec au moins une racine adventive et ceux sans racine adventive en fonction de la date de plantation, de la méthode de plantation et du type de sol et valeurs moyennes pour les facteurs méthode de plantation pour l'échantillonnage de 1999. Les valeurs qui ne partagent pas la même lettre sont significativement différentes les unes des autres.

Source de variation	dl	Semis avec racines adventives (n=160)		Semis sans racine adventive n=(145)			
		C-M	Pr>F	C-M	Pr>F		
Bloc (B)	4	0.1574		4.1216			
Date (D)	2	3.4385	0.0349*	0.0723	0.8886		
Méthode (M)	2	14.2684	0.0001*	3.81	0.0027*		
Sols (S)	2	0.6214	0.5383	0.7083	0.3176		
D*M	4	1.6771	0.1585	1.9166	0.0173*		
D*S	4	1.5244	0.1981	0.2969	0.7463		
M*S	3	2.1313	0.0989	0.3228	0.6639		
D*M*S	6	1.3262	0.2490	0.4039	0.6816		
		Erreur = 132		Erreur = 117			
Indice Delta D (mm)							
Méthode	Semis avec racines adventives		Semis sans racine adventive				
	Conventionnel	0.54a	0.66a				
	Pré-enfoui	-0.75b	-0.07b				
	Enfoui	-0.28b	0.31ab				
Valeurs moyennes		-0.41	0.34				

\* : significatif

### 3.6 ÉCHANGES GAZEUX

Les facteurs méthode de plantation et type de sol n'affectent pas significativement le taux de photosynthèse nette et la conductance stomatale (tableau 15). Cependant, le facteur méthode de plantation affecte significativement le coefficient d'utilisation de l'eau ( $p= 0.0451$ ). Les semis du traitement CONVENTIONNEL ont un coefficient d'utilisation de l'eau supérieur aux semis des traitements PRÉ-ENFOUI et ENFOUI (tableau 15). Le

facteur type de sol n'influence pas significativement le coefficient d'utilisation de l'eau (tableau 15).

### **3.7 ÉLÉMENTS MINÉRAUX**

Les valeurs obtenues pour les principaux élément minéraux (azote (N), phosphore (P), potassium (K), calcium (Ca) et magnésium (Mg)) se comparent à celles obtenues par d'autres auteurs (tableau 16). Seule la concentration de calcium est de beaucoup supérieure et la concentration d'azote légèrement inférieure.

Les différents traitements utilisés tant pour la méthode de plantation que pour les types de sol n'influencent pas significativement les différentes concentrations des principaux éléments minéraux (tableau 17).

Tableau 15 : Analyse de variance du taux de photosynthèse nette, de la conductance stomatale et du coefficient d'utilisation de l'eau en 1998 pour les facteurs méthode de plantation et type de sol et valeurs moyennes du coefficient d'utilisation de l'eau en fonction du facteur méthode de plantation. Des contrastes ont été effectués sur les facteurs significatifs.

Source de variation	dl	C-M	F	Pr>F
<u>Taux de photosynthèse</u>				
Bloc (B)	4	204.7324		
Méthode (M)	2	20.5804	1.40	0.2543
Sols (S)	2	1.4983	0.10	0.9034
M*S	3	13.3562	0.91	0.4425
Erreur	68	14.7311		
<u>Conductance stomatale</u>				
B	4	3.5563		
M	2	1.0320	1.98	0.1460
S	2	0.7263	1.39	0.2553
M*S	3	0.4179	0.80	0.4973
Erreur	68	0.5213		
<u>Coefficient d'utilisation de l'eau</u>				
B	4	24.2590		
M	2	5.6824	3.24	0.0451*
Con. vs Trait	1	11.2590	6.43	0.0135*
Pré vs Enf	1	0.1057	0.06	0.8067
S	2	0.0510	0.03	0.9713
Min vs 2Org	1	0.2119	0.12	0.7290
O-M vs O-O		0.4008	0.23	0.6339
M*S	3	0.9861	0.56	0.6412
Erreur	68	1.7511		

Méthode	Coefficient d'utilisation de l'eau
Conventionnel	3.44
Pré-enfoui	2.45
Enfoui	2.54

\* : significatif

Con. vs Trait : méthode de plantation CONVENTIONNEL versus méthode de plantation ENFOUI et PRÉ-ENFOUI

Pré vs Enf : méthode de plantation PRÉ-ENFOUI versus méthode de plantation ENFOUI

Min vs 2Org: type de sol minéral versus type de sol contenant de l'organique

O-M vs O-O: type de sol organique sur minéral versus type de sol l'organique

Tableau 16 : Concentration des principaux éléments minéraux obtenus en comparaison avec la littérature

Éléments minéraux	Concentration (%)	
	Cette recherche	Littérature <sup>TT</sup>
N	1.44	1.50-2.50
P	0.18	0.18-0.30
K	0.54	0.40-0.80
Ca	0.82	0.10-0.15
Mg	0.10	0.09-0.12

<sup>TT</sup>: Selon Stewart et Swan (1970)

Tableau 17 : Analyse de variance de la composition minérale des semis

Source de variation	dl	N		P		K		Ca		Mg			
		C-M	F	Pr>F									
Bloc	4	109.31			0.1127			1.4015			5.1879		
Méthode	2	1.8640	0.35	0.7077	0.0005	0.01	0.9871	0.1210	0.18	0.8357	2.6010	1.40	0.2632
Sols	2	2.0045	0.38	0.6897	0.0063	0.17	0.8451	0.8830	1.32	0.2838	0.6755	0.36	0.6983
M*S	3	1.7871	0.34	0.7997	0.0343	0.93	0.4412	0.3744	0.56	0.6465	0.8692	0.47	0.7070
erreur	28	5.3247			0.0370			0.6699			1.8574		0.0322

## **CHAPITRE 4**

## **DISCUSSION**

## 4.1 TAUX DE SURVIE DE LA PLANTATION

La mortalité des semis a été plus importante les premières années mais elle semble maintenant se stabiliser. Les différents traitements appliqués aux semis ont très peu affecté leur taux de survie. Les semis plantés en juin, août ou septembre présentent un taux de survie semblable. Malgré des conditions de sécheresse prévalant dans le secteur lors de la plantation de juin, les semis mis en terre à ce moment ont bien résisté. Le stress hydrique est pourtant la première cause de mortalité chez les jeunes semis (Burdett 1990). Les semis plantés en septembre ont, quant à eux, eu le temps de s'adapter suffisamment au terrain pour bien passer l'hiver.

L'enfouissement des 5 premiers cm de tige au-dessus du collet au moment de la plantation réduit sensiblement le taux de survie des plants pendant deux saisons (1997 et 1998) mais il ne l'affecte plus la dernière année (1999). Les semis plus faibles sont peut-être morts plus rapidement. Le stress supplémentaire créé par l'enfouissement d'une partie de la tige dans le sol au moment de la plantation apparaît donc négligeable. Les semis pré-enfouis ont également subit le stress de l'enfouissement, mais en serre sous des conditions plus favorables. Sutton (1995) mentionne qu'il faut plusieurs ajustements avant que le système racinaire d'un semis reboisé s'adapte aux conditions du sol où il a été introduit. Par contre, Stroempl (1990) croit que la perte de stabilité du plant attribuable au reboisement est amoindrie par l'enfouissement.

Selon la littérature, un léger enfouissement n'affecte pas la survie des semis de conifères, étant souvent bénéfique (Mullin 1964, 1966; Schwann 1994; Stroempl 1990; Sutton 1967, 1995). Plusieurs facteurs peuvent expliquer le meilleur taux de survie des semis enfouis : meilleure stabilité et ancrage, meilleure protection contre la chaleur, meilleure protection contre le déchaussement, développement des racines adventives qui supplémentent les racines initiales. Schwann (1994) indique toutefois qu'un enfouissement dépassant le niveau de la première branche peut mettre en péril la survie des semis d'épinette noire dans les sites mal drainés. Sutton (1995) mentionne aussi qu'un enfouissement trop important s'est avéré néfaste dans certaines expériences.

Les semis plantés dans un microsite ne contenant pas de matière organique montrent un taux de survie significativement plus élevé de 5% environ lors du dernier échantillonnage en 1999. Les sols organiques s'assècheraient plus rapidement parce que les pores sont plus gros, ce qui peut nuire aux plants (Grossnickle 2000). De plus, les sols organiques dispersent moins bien la chaleur; la température du sol en surface y est donc plus élevée, ce qui peut aussi entraîner un stress important pour les semis (Grossnickle 2000). Les semis plantés dans le sol organique sont également plus exposés au gel puisque ce type de sol à une moins grande capacité à absorber et à transmettre l'énergie thermique que les sols minéraux. Dans la présente étude, les traitements organiques ne se différencient des autres traitements que par l'épaisseur de matière organique recouvrant le sol minéral. Les gels tardifs observés au printemps 1998 ont donc pu affecter plus particulièrement le taux de survie des plants des microsites organiques. Par contre, le

phénomène du déchaussement, observé à quelques reprises dans cette expérience, peut amener la mort des semis et il survient dans les sols à texture plus fine de type minéral s'ils sont très humides (Grossnickle 2000).

Sutton (1967) ne recommande pas l'utilisation de la technique de l'enfouissement dans les microsites organiques. Armstrong (1957), quant à lui, a obtenu un taux de survie de 36% pour une plantation avec enfouissement dans un sol organique en comparaison avec 89% pour les semis conventionnels. Par contre ces auteurs parlent de site exclusivement organique. Dans la présente étude, le sol minéral est toujours présent et les taux de survie observés dans les traitements organiques ne sont aucunement catastrophiques.

## 4.2 RACINES ADVENTIVES

Les traitements utilisant l'enfouissement ont permis de vérifier la première hypothèse voulant que l'enfouissement permette d'obtenir des racines adventives en grande quantité et plus rapidement. Ceci n'est guère surprenant puisque l'enfouissement de la tige ou l'accumulation de débris autour de celle-ci sont des conditions essentielles au développement des racines adventives caulinaire (LeBarron 1945; McClain 1981; Cloutier et Fillion 1995; Aubin 1996). La proportion de semis qui développent des racines adventives se situe aux alentours de 60% après 3 ans. Les semis pré-enfouis ont atteint ce pourcentage en 1998 et les semis enfouis ont presque atteint cette valeur en 1999, un an après les semis pré-enfouis. Même les semis plantés de façon standard montrent un bon potentiel de développement de racines adventives. En 1999, 25% des semis

CONVENTIONNEL en ont développé. Ces plants n'ayant pas été enfouis artificiellement, leur tige a dû être recouverte naturellement de débris ou de végétation puisqu'il s'agit de conditions nécessaires au développement de racines adventives. Il faudra cependant beaucoup plus de saison de croissance pour que le nombre de semis conventionnels ayant développé des racines adventives rejoigne celui des semis enfouis.

La littérature fait peu mention de pourcentage de plant qui ont développé des racines adventives. Par contre, LeBarron (1945), Sutton (1967) et Schwann (1994) parlent d'un phénomène très commun chez l'épinette noire. Différents travaux de l'équipe du laboratoire d'écologie végétale de l'UQAC démontrent, hors de tout doute, que le système racinaire des épinettes noires naturelles adultes se développent en totalité à partir de racines adventives initiées sur la tige de l'arbre (Gagnon *et al.* 1999). Sutton (1967) a observé chez l'épinette blanche en plantation que la moitié des plants enfouis sous conditions favorables ont développé des racines adventives en moins de trois mois. McClain (1981) a observé chez des épinettes noires en plantation depuis 10 ans la présence presque exclusive de racines adventives pour tous les arbres. Les conditions de terrain prévalant dans cette expérience, le taux d'humidité entre autre, favorisaient peut-être le développement des racines adventives (Sutton 1967). Dans la présente étude, les semis n'étaient en terre que depuis 1996 et le dernier relevé datant de 1999, le pourcentage de plant ayant développé au moins une racine adventive devrait continuer à progresser.

Aucune différence importante n'a été observée dans cette étude quant à la quantité de semis ayant développé des racines adventives en fonction de la date de plantation et du type de sol. Certains auteurs dont Sutton (1967) et Armstrong (1957) ne recommandent pas l'enfouissement dans un sol organique mais ils semblent s'être attardé d'avantage à la survie qu'au développement des racines adventives. Le nombre moyen de racines adventives et la biomasse des racines adventives montrent des résultats semblables.

## 4.3 CROISSANCE DES SEMIS

### 4.3.1 Date de plantation

Selon Grossnickle (2000), la tige et les racines se développeraient la première année dans les plantations printanières alors que seul le système racinaire pousserait la première année dans les plantations estivales. Par la suite malgré un patron de croissance différent, la taille totale des plants se ressemblerait. Aucun semis n'a été mis en terre au printemps dans la présente étude mais la première plantation a eu lieu très tôt en été pour le secteur et la dernière très tard. Les semis mis en terre en juin ont une meilleure croissance de la partie aérienne que ceux plantés plus tardivement malgré une biomasse racinaire totale inférieure les trois premières années. Le développement du système racinaire dans les récipients sur les aires de croissance jusqu'en août et septembre s'est avéré plus important que celui des semis plantés sur le terrain en juin. Le stress de la plantation combiné avec les conditions plus favorables prévalant sur les aires de croissance pourraient en être responsable. Sutton (1995) indique qu'il faut des ajustements majeurs avant que le système racinaire d'un semis planté s'adapte à son nouvel environnement. Malgré cette

biomasse racinaire plus faible des semis plantés en juin, leurs parties aériennes étaient semblables au départ. Et les mesures prises les années subséquentes montrent que les croissances en hauteur, diamètre et biomasse de la partie aérienne des semis plantés en juin ont été plus importantes que celles des semis plantés en août et en septembre. Les semis plantés en juin ont peut-être profité des quelques semaines supplémentaires passées sur le terrain pour s'adapter aux conditions qui y prévalent, ce qui pourrait leurs avoir conféré un avantage dès la saison de croissance suivante. Leur système racinaire moins développé ne semble pas leur avoir été nuisible. D'ailleurs, Grossnickle (2000) mentionne qu'un système racinaire plus imposant n'assure pas nécessairement une meilleure croissance.

#### **4.3.2 Méthode de plantation**

La seconde hypothèse voulant que les semis ayant développé des racines adventives montrent un meilleur taux de survie et une meilleure croissance se vérifie pour la croissance. Effectivement, la croissance des parties aériennes est supérieure chez les semis dont la tige a été enfouie. L'année de la plantation, les semis enfouis pendant la période de production (PRÉ-ENFOUI) présentaient une hauteur de tige et une biomasse aérienne inférieure aux semis des traitements ENFOUI et CONVENTIONNEL, ce qui peut s'expliquer par une réduction de la capacité photosynthétique la première année due à l'enfouissement (Aubin 1996; Sutton 1967). Les semis enfouis ont également subit cette réduction de leur capacité photosynthétique, mais à un stade plus avancé de leur développement. Cependant, dès la seconde année de croissance les semis dont la tige a été

enfouie ont démontré une meilleure croissance que les semis du traitement CONVENTIONNEL. Cette tendance s'accentue encore en 1999.

Certains auteurs ont observé que l'enfouissement favorise la croissance en hauteur. Sutton (1967) a obtenu une meilleure croissance en hauteur des plants enfouis la première année pour l'épinette blanche et la deuxième année pour l'épinette de norvège. Pittman (1991) a observé une meilleure croissance annuelle en hauteur chez des semis d'épinette noire enfouis (40% et 60% de la tige enfouie) pour les deux premières saisons. Par contre, l'effet n'était plus significatif six années après la plantation. Toutefois la croissance totale après six ans était supérieure chez les plants enfouis à 40%, 60% et 80% comparativement à ceux enfouis à 20% et les non-enfouis. D'autres études ont observé cette stimulation de la croissance pour les premières années de plantation dont Mullin (1964) chez le pin rouge et Armstrong (1957) chez l'épinette noire. Selon Pitmann (1991) et Sutton (1995), cet avantage de croissance en hauteur disparaîtrait après les premières années. C'est la réallocation du carbone des parties enfouies de tige et de branches vers les parties non-enfouies qui procurait aux semis une meilleure croissance ponctuelle. Dans la présente étude, un phénomène autre que la réallocation du carbone doit donc se manifester pour expliquer ces observations. La présence de racines adventives en est peut-être en partie responsable. Schwann (1994) mentionne qu'une importante quantité d'éléments minéraux se retrouve dans la matière organique et dans le sol minéral de surface. Il ajoute que dans les plantations d'épinette avec enfouissement, les racines adventives se développent dans ce milieu riche en minéraux pour devenir le système racinaire principal.

Malgré son effet positif sur la croissance en hauteur et en biomasse aérienne, l'enfouissement a été néfaste sur la croissance en diamètre au collet. Le défilement inverse semble en être responsable, ce phénomène observé chez l'épinette noire adulte consiste en un ralentissement de la croissance du diamètre de la partie de la tige enfouie dans le sol. Les cernes de croissance les plus récents sont ainsi progressivement absents des sections les plus près du collet (DesRochers et Gagnon 1997). L'étude de Knight (1961) sur l'évolution dans le temps de l'activité cambiale de toutes les parties de cultivars de pommier (*Malus* sp.), montre une vague d'activité partant du sommet des tiges et progressant lentement vers le bas du plant durant la période de croissance. Cette vague ne se rend pas toujours jusqu'au bout de la portion de tige enfouie. Avec les années le diamètre au niveau du sol s'accroît tandis que le diamètre au niveau du collet ne varie que très peu. La tige prend une forme d'effilement inversé. Ce phénomène serait dû en partie aux conditions nutritionnelles de la partie enfouie de la tige, située sous les racines adventives et en deçà de l'échange nutritif entre les feuilles et les racines (Knight 1961). Cette présence de vague d'activité cambiale a également été observée chez les conifères par Kozlowski et al (1991). Le diamètre au niveau du collet n'est donc pas un bon indicateur de la croissance chez l'épinette noire. D'ailleurs, Aubin (1996) suggère l'utilisation du diamètre au niveau de la surface du sol qui s'avère plus appropriée pour comparer l'effet d'un traitement sur ce paramètre. En 1999, le diamètre à 5 cm au-dessus du collet a été mesuré et aucune différence significative n'a été observée entre les méthodes de plantation. Ce type de diamètre aurait dû être utilisé pour toute l'étude afin d'observer le développement du diamètre dans le temps.

L'indice Delta D (différence entre le diamètre au collet et 5 cm au-dessus du collet) en fonction de l'enfouissement démontre que le défilement inverse est bien visible. Ce phénomène n'est pas observé chez les semis conventionnels et il apparaît un peu chez les semis enfouis. Le défilement inverse est cependant bien visible chez les semis pré-enfouis, les semis enterrés à un plus jeune stade. Lorsque les semis n'ont pas développé de racines adventives, le défilement inverse n'est pas observé alors qu'il est très présent chez ceux qui en ont développé. Même chez les semis du traitement pré-enfoui où le phénomène est très important, les plants sans racine adventive n'ont pratiquement pas de défilement inverse. Ces résultats démontrent clairement que le défilement inverse est causé par la présence de racines adventives sur la tige des semis.

Dans la présente étude, le système racinaire global est moins imposant chez les semis enfouis et pré-enfouis, et ce, malgré l'importance que prend le développement des racines adventives chez ces semis. C'est également ce qui a été observé pour la majorité de ses semis par Aubin (1996). Le nouveau système racinaire adventif ne constituait qu'un faible pourcentage de la biomasse sèche totale du système racinaire. Par contre, l'inquiétude que pourrait amener la présence d'une biomasse racinaire inférieure chez les semis enfouis n'a pas sa raison d'être puisque l'ensemble des données se rapportant aux parties aériennes des plants ne montre pas de désavantage connu à posséder moins de racine. D'ailleurs, un investissement moindre dans le système racinaire permettrait d'économiser le carbone utilisable pour les parties aériennes. Le système racinaire en place permet donc de combler aussi bien les besoins en eau qu'en minéraux des jeunes semis.

Ces racines, quoique moins nombreuses, sont peut-être plus efficaces étant donné leur position près du collet. Ces racines sont effectivement toujours situées en surface où une importante quantité d'éléments minéraux se retrouve (Schwann 1994). Le volume de sol couvert par les racines adventives est peut-être supérieur à celui des autres racines confinées aux récipients pendant la production. Ceci pourrait permettre aux racines adventives de récolter plus facilement l'eau et les éléments minéraux essentiels au développement des semis.

D'après la littérature, si le sol est moyennement à hautement fertile et bien drainé, l'enfouissement n'inactive pas le système racinaire préexistant. Les nouvelles racines adventives caulinaires supplémentent plutôt qu'elles nuisent au système racinaire déjà en place (Sutton 1967; Schwann 1994). Par contre, si le sol est peu fertile, la majorité du système racinaire non-adventif pourrait être inactivé par l'enfouissement (Schwann 1994). C'est ce que McClain (1981) a constaté chez l'épinette noire; le système racinaire original a cessé de fonctionner et il a été complètement remplacé par des racines adventives. LeBarron (1945) mentionne aussi que le système racinaire adventif remplacerait graduellement le système racinaire initial.

Le phénomène de tige multiple qui pourrait être relié à l'enfouissement des plants selon Gross (1985) et Webb et Reese (1984) n'a pratiquement pas été retrouvé au cours des quatre échantillonnages effectués. Par contre, les gels tardifs qui ont affecté plusieurs

bourgeons terminaux de la plantation au printemps 1998 pourrait à terme rendre le phénomène moins marginal.

#### **4.3.3 Type de sol**

Selon Grossnickle (2000), les sols organiques possèdent un indice de diffusion thermale plus faible, ce qui entraîne un mauvais transfert de chaleur dans le sol. Ainsi lorsqu'une couche de matière organique recouvrirait le sol, il y aurait réduction de la saison de croissance. Dans cette étude, le type de sol a très peu affecté la croissance des plants. En 1999, le diamètre à 5 cm au-dessus du collet et la hauteur de la tige sont légèrement inférieurs pour le traitement organique et la biomasse aérienne des plants est supérieure dans le sol minéral mais le taux de croissance est le même. Les différences dans l'épaisseur de la couche de matière organique ne sont peut-être pas assez importantes pour influencer la croissance des semis.

#### **4.3.4 Échanges gazeux**

En 1998, des mesures du taux de photosynthèse ont été effectuées afin d'observer directement les effets des différents traitements. La croissance des plants dépend de la fixation du carbone par la photosynthèse. Il semble donc logique que si la photosynthèse nette augmente, la croissance augmente aussi. Cependant, la relation est faible entre les mesures de la photosynthèse nette à court terme et la croissance (Kozlowski *et al* 1991). Dans cette étude, seul le coefficient d'utilisation de l'eau a été affecté par l'enfouissement; les plants conventionnels possèdent un coefficient d'utilisation de l'eau supérieur aux deux

autres traitements. Cela signifie que ces plants peuvent fixer davantage de carbone pour une même perte d'eau. Ainsi, les semis conventionnels étaient plus efficaces au niveau photosynthétique et en meilleure situation hydrique au moment de la prise des mesures en août 1998. Toutefois, il est difficile de tirer des conclusions à partir de ces observations ponctuelles. Des mesures répétées dans le temps des échanges gazeux sur les mêmes semis auraient possiblement donné de meilleurs résultats. Plusieurs études dont Lamhamedi *et al.* (1998) qui s'intéressent aux échanges gazeux utilisent des mesures répétées dans le temps afin de diminuer l'imprécision due à la variabilité de ces mesures. Lamhamedi et Bernier (1994) mentionnent que le taux de photosynthèse de l'épinette noire est influencé par la lumière, la température, l'humidité, la concentration en CO<sub>2</sub>, la disponibilité de l'eau dans le sol et le phénotype.

#### 4.3.5 Éléments minéraux

Aucune déficience majeure n'était présente lors de la prise des mesures pour les principaux éléments minéraux. Le calcium a toutefois un niveau beaucoup plus élevé que les valeurs normales mentionnées dans la littérature. Toutefois cet état ne se reflétait pas directement sur les semis et cela ne semble pas avoir affecté les plants. Le pourcentage de calcium ne devait donc pas atteindre un niveau toxique (Grossnickle 2000). L'azote quant à lui était légèrement déficient. Cette carence était toutefois trop minime pour qu'elle amène des conséquences visibles sur les semis. Par contre la croissance pouvait être légèrement affecté (Grossnickle 2000).

# **CHAPITRE 5**

# **CONCLUSION**

Ces quatre années d'échantillonnage permettent d'observer qu'il y a des effets ponctuels qui disparaissent avec le temps mais surtout qu'il y a des tendances générales qui se manifestent. La plantation de juin donne un avantage de croissance au semis mais les plantations plus tardives d'août et septembre ont également une bonne croissance. Il reste donc à voir si cet avantage de la plantation de juin va s'accentuer avec le temps. Jusqu'à présent, le facteur type de sol affecte peu la croissance des semis mais la présence de matière organique aurait une influence négative sur le taux de survie. Cette influence est toutefois minime en comparaison à certaines études.

L'enfouissement des semis pendant la période de production ou lors de la plantation n'affecte aucunement le développement normal des semis et il permet un développement prononcé des racines adventives alors qu'il désavantage le développement du système racinaire non-adventif. L'importance quantitative des racines adventives en terme de biomasse demeure toutefois mineure par rapport au système racinaire non-adventif. Malgré un système racinaire plus petit, les semis qui ont été enfouis ont une hauteur de tige moyenne supérieure aux semis plantés CONVENTIONNEL et leur taux de croissance est supérieur. Les racines adventives, quoique moins nombreuses, sont peut-être plus efficaces que le système racinaire de base. Elles permettraient également une économie de carbone alloué normalement aux racines et devenant disponible pour la tige. Leur position sur la tige, plus près des parties aériennes, et leur également plus en surface pourrait aussi expliquer cette efficacité supérieure. Le défilement inverse est causé par les racines adventives.

Les racines adventives ne nuisent donc pas à la croissance et à la survie des plants, bien au contraire, mais il est encore tôt pour affirmer hors de tout doute qu'elles leur confèrent un avantage significatif à plus long terme. Il sera intéressant de voir si les débuts de tendance exprimée par les résultats présentés dans cette recherche se poursuivent.

Il est important de poursuivre le suivi à plus long terme de plantation avec de l'enfouissement tout en étudiant aussi le phénomène chez les arbres naturels. Plusieurs chercheurs se sont penchés sur le phénomène de l'enfouissement et des racines adventives mais plusieurs incertitudes demeurent. Il serait important également d'étudier le phénomène à un niveau plus fondamental en comparant par exemple l'efficacité du système racinaire adventif par rapport au système racinaire non-adventif.

# **CHAPITRE 6**

## **RÉFÉRENCES**

Armson, K.A. 1972. Distribution of conifer seedling roots in a nursery soil. The Forestry Chronicle 48, 141-143.

Armstrong, R.H. 1957. Experimental tree planting to compare survival and growth using various methods. Spruce Falls Pulp & Pap. Co. Ltd. File Rep. (Cité par Schwann, 1994).

Aubin, K.N. 1996. Influence du contenu en eau du substrat et de la profondeur de plantation sur la formation de racines adventives caulaires, la croissance et l'allocation glucidique de semis d'épinette noire. Mémoire de maîtrise. Université du Québec à Chicoutimi. 105 p.

Brouillette, J.G., J.P. Tétreault et J. Lortie. 1987. Guide d'évaluation de la qualité des plants de reboisement produit en récipients. Gouvernement du Québec. Ministère de l'Énergie et des Ressources. Service de la régénération forestière. 43p.

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.

Canadian Society of Soil Science, 1993. Soil sampling and methods of analysis. Carter M.R. editor, Lewis publishers.

Cloutier, J. et L. Fillion. 1995. Analyse dendrométrique d'une frange forestière soumise à l'entourbement sur une île centrale du lac Bienville, Québec subartique. Recueil des résumés de communication, 63ième congrès de l'Acfas, UQAC, p. 47.

DesRochers, A. et R. Gagnon. 1997. Is ring count at ground level a good estimation of black spruce age ? Can. J. For. Res. 27 : 1263-1267.

Gagnon, R., H. Morin, D. Lord, C. Krause, S. Cloutier, G. Savard et J. Potvin. 1999. Les forêts d'épinette noire au Québec : recherche, nouvelles connaissances et applications en aménagement. UQAC, Laboratoire d'écologie végétale partenaire du Consortium de recherche sur la forêt boréale commerciale Chicoutimi, Québec. 30p.

Gross, H.L. 1985. Multiple-leadered trees compare favorably with single-leadered trees in field performance tests of nursery stock, Great Lakes Forest Research Center, Canadian Forestry Service, Inf. Rep. O-X-363, Sault Ste. Marie, Ont.

Grossnickle, S.C. 2000. Ecophysiology of northern spruce species: the performance of planted seedlings. National Research Council of Canada, Ottawa, Ontario, 407p.

Kirk, R. E. 1968. Experimental design : procedures for behavioral sciences. Baylor University. 577 p.

Knight, R.C. 1961. Taper and secondary thickening in stems and roots of the apple. East Malling Research Station, Annual Report, p 65-71.

Kozlowski, T.T., P.J. Kramer et G.P. Pallardy. 1991. The physiological ecology of woody plants. Academic Press, New York, 657p.

Lamhamedi, M.S. et P.Y. Bernier. 1994. Ecophysiology and field performance of black spruce (*Picea mariana*) : a review. Ann. Sci. For. 51: 529-551.

Lamhamedi, M.S., P.-Y. Bernier, C. Hébert et R. Jobidon. 1998. Physiological and growth responses of three sizes of containerized *Picea mariana* seedlings outplanted with and without vegetation control. Forest Ecology and Management 110 p. 13-23.

LeBarron, R.K. 1945. Adjustment of black spruce root system to increasing depth of peat. Ecology, 26(3) : 309-311.

LI-COR. 1989. LI-6200 primer. LI-COR inc. Lincoln, Nebraska, U.S.A.

Lord, D., S. Morissette et J. Allaire. 1993. Influence de l'intensité lumineuse, de la température nocturne de l'air et de la concentration en CO<sub>2</sub> sur la croissance de semis d'épinette noire (*Picea mariana*) produits en récipients en serres. Can. J. For. Res. 23: 101-110.

McLain, K.M. 1981. Growth, nutrition and root development of ontario tubeling, plugs and 3+0 bare-root black spruce. Proceeding of the Canadian Containerized Tree Seedling Symposium. Septembre 1981. SCF, MNR. Toronto. 331-342.

Ministère des Ressources naturelles. 2001. Définitions des critères et normes de qualité des plants résineux cultivés en récipients. Direction de la production des semences et des plants, Division de la production des plants forestiers, Québec, Québec. 21p.

Mullin, R.E. 1964. Influence of planting depth on survival and growth of red pine. Forestry chronicle 40(3) : 384-391.

Mullin, R.E. 1966. Influence of depth and method of planting on white spruce. Journal of forestry 64 : 466-468.

Pittman, B. 1991. Effect of planting depth on survival, growth and nutrient status of black spruce. Unpublished B. Sc. F. Thesis. University of New Brunswick. Fredericton, N.B. 92p. (Cité par Schwann, 1994 et Sutton, 1995).

Régent instruments inc. 1998. Win/Mac Needle version 4.4A. Québec, Canada, 32 p.

SAS Institutes Inc. 1990. SAS/STAT™ User's Guide Release 6.04 Edition. Cary, NC : SAS Institutes Inc. , 1686 pp.

Scheiner, S.M. et J. Gurevitch 1993. Design and analyse of ecological experiments. Chapman & Hall, Inc. 445 p.

Scherrer, B. 1984. Biostatistique. Gaétan Morin éditeur. Québec, Canada, 850 p.

Schwann, T. 1994. Planting depth and it's influence on survival and growth: a literature review with emphasis on jack pine, black spruce and white spruce. OMNR, Northeast Science & Technology. TR-017. 36p.

Steel, R.G.D. et J.H. Torrie. 1980. Principles and procedures of statistics, a biochemical approach. McGraw-Hill Publishing Company, New York, 633p.

Stewart, H. et D. Swan. 1970. Relationship between nutrient supply, growth and nutrient concentrations in the foliage of black spruce and jack pine. Woodlands Pap. 19. Pulp and Paper Research Institute of Canada, Montréal, Qc. 46pp.

Stroempl, G. 1990. Deeper planting of seedlings and transplants increase plantation survival. Tree Planter's Notes, 41(4) : 17-21.

Strong, W.L. et G.H LaRoi. 1983. Root-system morphology of common boreal forest trees in Alberta, Canada. 13, 1164-1173.

Sutton, R.F. 1967. Influence of planting depth on early growth of conifers. Commonwealth Forestry Review 46 : 282-295

Sutton, R.F. 1995. Advantages of deep planting black spruce. Sault-Ste-Marie, Ont.: Can. For. Serv. Great Lakes For. Centre Tech. Note no. 50: 1-3.

Sutton, R.F. et R.W. Tinus. 1983. Root and root system terminology. For. Sci. Monogr. 24 p.

Thomas R.R., R.W. Sheard et J.R. Mayer. 1967. Comparison of conventional and automated procedures for nitrogen, phosphorus and potassium, analysis of plant material using a single digestion. Agronomy Journal, Vol.59, June p,240-243

Trottier, F. 1998. Performance des plantations établies par le Ministère des Ressources naturelles dans les forêts publiques du Québec, de 1986 à 1995. Ministère des Ressources naturelles, Direction de l'assistance technique, 124 pp.

Webb, D.P. et K.H. Reese. 1984. Multiple leadering of coniferous nursery stock, Can. For. Serv., Min. Natural Resources, Ont., Joint Rep. No 3,

Zar, J.H. 1984. Biostatistical analysis. 2 ed. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice Hall, 718p.