

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

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

PAR
MANUEL LAMONTAGNE
B. Sc. en Biologie

INFLUENCE DU GAUCHISSEMENT DE LA TIGE DE L'ÉPINETTE
NOIRE (*Picea mariana* (Mill.) BSP) SUR LE REDRESSEMENT DE LA
TIGE ET LA CROISSANCE DES PLANTS DE PLUS D'UN AN

MAI 1993



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 produits 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 or thesis, nor substantial extracts from it, may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

RÉSUMÉ

Le gauchissement de la tige de l'épinette noire est un phénomène survenant principalement lors de la période de croissance exponentielle en longueur de la pousse de 1^{ère} année et lorsque les plants sont cultivés en récipients dans les serres ou dans les tunnels. Ce phénomène conduit à une déclassification du plant par le ministère des Forêts du Québec lorsque l'angle de la pousse de 1^{ère} année par rapport à la verticale dépasse 15°. Deux hypothèses sous-tendent cette étude: 1) les plants des différentes classes de gauchissement possèdent tous une capacité égale de redressement avec le temps, et ce même après lignification et, 2) le potentiel de croissance des plants d'épinette noire très fortement gauchis (> 90°) serait inférieur dû à un développement racinaire plus faible et non à cause du gauchissement de la tige.

Une première expérience s'est déroulée à l'Université du Québec à Chicoutimi dans quatre chambres à environnement contrôlé avec des plants 1-0 produits en récipients dans les serres de la Coopérative forestière de Girardville. Les plants ont été initialement sélectionnés selon quatre classes de gauchissement se distinguant par l'angle de la pousse par rapport à la verticale: $\leq 15^\circ$ pour la classe 1; $> 15^\circ$ à $\leq 45^\circ$ pour la classe 2; $> 45^\circ$ à $\leq 90^\circ$ pour la classe 3; et $> 90^\circ$ pour la classe 4. Par la suite, les plants ont été disposés aléatoirement dans quatre systèmes de culture hydroponique, soit un par chambre à environnement contrôlé, et cultivés pendant une période de croissance de 15 semaines. La seconde expérience a eu lieu à l'automne 1991 sur deux sites de reboisement situés en Abitibi afin de vérifier si les potentiels de croissance et de redressement montrés en environnement contrôlé correspondaient à ceux sur le terrain. Les deux sites à l'étude, un sur sol sablonneux et un sur sol organique, ont été reboisés en 1986 avec des plants 1-0 produits en récipients dans les serres des Serres coopératives de Guyenne. Les plants de deux provenances ont été disposés en blocs aléatoires complets dans chacun des sites. Ils ont été regroupés en trois classes d'angle: classe $\leq 15^\circ$; classe $> 15^\circ$ à $\leq 90^\circ$; et classe $> 90^\circ$.

La croissance des plants a été évaluée pour les deux expériences à l'aide des biomasses sèches des tiges et des racines, de la longueur de la tige, du diamètre de l'hypocotyle et des rapports biomasse sèche caulinare/racinaire et hauteur/diamètre. La capacité de croissance racinaire a également permis d'évaluer les plants de l'expérience en environnement contrôlé. La croissance des plants s'est avérée non significativement différente entre les différentes classes de gauchissement dans les deux expériences. Par contre, elle s'est avérée significativement différente entre les sites à l'étude dans la seconde expérience.

Des mesures quantitatives et qualitatives du système racinaire ont permis de mieux préciser la croissance des plants des deux expériences. En environnement contrôlé, les plants des différentes classes de gauchissement n'ont montré aucune différence dans leur développement racinaire. Dans les systèmes de culture hydroponique, les principales racines latérales des plants se sont majoritairement développées dans le tiers supérieur du système

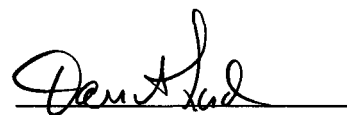
racinaire. Sur le terrain, le système racinaire s'est développé différemment entre les sites plutôt qu'entre les plants des différentes classes de gauchissement. Dans le site organique, un nouveau système racinaire s'est établi en surface au-dessus des premières racines alors que le système racinaire développé en récipient a été conservé dans le site sablonneux.

La tige de tous les plants continuent de bouger après lignification, la résultante étant le plus souvent un redressement. L'expérience en environnement contrôlé a montré que les plants des classes 3 et 4 améliorent leur angle de gauchissement initial plus rapidement que ceux de la classe 2, la plupart d'entre eux atteignant la classe 2 après 15 semaines de culture hydroponique. Les plants des deux sites à l'étude ayant eu un gauchissement initial $> 15^\circ$ se sont redressés, la plupart se retrouvant dans la classe $\leq 15^\circ$. Toutefois le facteur site a influencé le redressement de l'angle de la tige. Les plants du site organique ont présenté un meilleur taux de correction d'angle de la pousse de 1^{ère} année que ceux du site sablonneux. De plus, les résultats de cette étude ont démontré que l'angle de la pousse de 1^{ère} année n'influence pas l'expression du gauchissement chez les pousses annuelles subséquentes.

Les présentes données indiquent que le gauchissement de la tige de l'épinette noire a peu d'influence sur la croissance des plants en plantation comparativement aux facteurs environnementaux des sites. De plus, le développement racinaire plus faible des plants très fortement gauchis n'a pas influencé leur croissance ultérieure. Les résultats de cette étude indiquent que le gauchissement n'est sûrement pas le critère de classification le plus important pour estimer la croissance à long terme d'une population de plants.



Manuel Lamontagne



Daniel Lord

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier mon directeur de recherche, le Dr Daniel Lord, pour son appui tout au long de ce projet. Je remercie également messieurs Jacques Allaire et Daniel Gagnon pour leur aide technique lors de la phase expérimentale et lors des échantillonnages. Je ne voudrais pas oublier les Coopératives forestières de Ferland-Boileau et de Girardville qui ont bien voulu fournir les plants nécessaires au pré-test et à l'expérience en environnement contrôlé, et monsieur Martin Béland de l'Unité de recherche et de développement forestier de l'Abitibi-Témiscamingue (URDFAT) qui nous a permis d'utiliser leur dispositif expérimental. Finalement, la réalisation de ce travail a été permis grâce au support financier du Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada (CRSNG) pour la bourse de 2^e cycle, du programme de recherche et développement coopératif (RDC) du CRSNG, du ministère des Forêts du Québec et de la Fondation de l'Université du Québec à Chicoutimi.

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ.....	ii
REMERCIEMENTS	iv
TABLE DES MATIÈRES	v
LISTE DES TABLEAUX.....	vii
LISTE DES FIGURES	ix
CHAPITRE I: INTRODUCTION.....	1
CHAPITRE II: MATÉRIEL ET MÉTHODES	5
2,1 Expérience 1: Environnement contrôlé.....	5
2,1,1 Provenance des plants et dispositif expérimental.....	5
2,1,2 Conditions de culture	8
2,1,3 Test de capacité de croissance racinaire.....	11
2,1,4 Mesures de croissance.....	13
2,1,5 Mesures de gauchissement.....	13
2,1,6 Traitement des données.....	14
2,2 Expérience 2: Plantation	15
2,2,1 Provenance des plants et dispositif expérimental.....	15
2,2,2 Mesures de croissance.....	17
2,2,3 Mesures de gauchissement.....	18
2,2,4 Forme racinaire.....	18
2,2,5 Traitement des données.....	19

CHAPITRE III: RÉSULTATS.....	20
3,1 Expérience 1: Environnement contrôlé.....	20
3,1,1 Test de capacité de croissance racinaire.....	20
3,1,2 Croissance des plants.....	22
3,1,3 Gauchissement	33
3,2 Expérience 2: Plantation.....	42
3,2,1 Croissance des plants.....	42
3,2,2 Gauchissement	45
3,2,3 Forme racinaire.....	49
CHAPITRE IV: DISCUSSION.....	52
4,1 Potentiel de croissance.....	52
4,2 Potentiel de redressement.....	58
CHAPITRE V: CONCLUSIONS	64
CHAPITRE VI: RÉFÉRENCES.....	66

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I:	Intensités lumineuses et températures maintenues à l'intérieur des chambres à environnement contrôlé lors des 15 semaines de culture hydroponique.....	9
Tableau II:	Indice semi-quantitatif de Burdett (1979) modifié.....	9
Tableau III:	Conditions de culture dans la serre de l'UQAC lors du test de capacité de croissance racinaire.....	12
Tableau IV:	Comparaison de la moyenne, de l'écart-type et du coefficient de variation des paramètres de croissance des plants gauchis avant la période de croissance en environnement contrôlé	24
Tableau V:	Analyse de variance de la biomasse sèche caulinaires pour les différentes dates d'échantillonnage lors de la période de croissance en environnement contrôlé	25
Tableau VI:	Analyse de variance de la biomasse sèche racinaire pour les différentes dates d'échantillonnage lors de la période de croissance en environnement contrôlé	27
Tableau VII:	Analyse de variance du rapport BSC/BSR pour les différentes dates d'échantillonnage lors de la période de croissance en environnement contrôlé.....	30
Tableau VIII:	Analyse de variance de la longueur totale de la tige pour les différentes dates d'échantillonnage lors de la période de croissance en environnement contrôlé	32
Tableau IX:	Analyse de variance du diamètre de l'hypocotyle pour les différentes dates d'échantillonnage lors de la période de croissance en environnement contrôlé.....	34

Tableau X:	Analyse de variance du rapport H/D pour les différentes dates d'échantillonnage lors de la période de croissance en environnement contrôlé.....	35
Tableau XI:	Comparaison de moyenne des paramètres de croissance des plants mesurés en 1991 en fonction de leur classe de gauchissement initiale prise en 1986	43
Tableau XII:	Comparaison de moyenne des paramètres de croissance des plants de provenance 1 extraits en 1991 en fonction de leur classe de gauchissement initiale prise en 1986.....	44

LISTE DES FIGURES

Figure 1:	Schéma du système hydroponique.	7
Figure 2:	Nombre de plant par classe de gauchissement en fonction de l'indice semi-quantitatif de Burdett (1979) modifié lors des tests de capacité de croissance racinaire en serre et en environnement contrôlé.	21
Figure 3:	Évolution de la biomasse sèche caulinare des plants lors de la période de croissance en environnement contrôlé.	26
Figure 4:	Évolution de la biomasse sèche racinaire des plants lors de la période de croissance en environnement contrôlé.	26
Figure 5:	Évolution du rapport de la biomasse sèche caulinare/racinaire (BSC/BSR) des plants lors de la période de croissance en environnement contrôlé.	29
Figure 6:	Évolution de la longueur totale de la tige des plants lors de la période de croissance en environnement contrôlé.	31
Figure 7:	Évolution du diamètre de l'hypocotyle des plants lors de la période de croissance en environnement contrôlé.	31
Figure 8:	Évolution du rapport hauteur/diamètre (H/D) des plants lors de la période de croissance en environnement contrôlé.	36
Figure 9:	Évolution de la fréquence de gauchissement des pousses de première année en fonction de leur sélection initiale lors de la période de croissance en environnement contrôlé.	37
Figure 10:	Évolution de la fréquence de gauchissement des pousses de deuxième année en fonction de la sélection initiale des pousses de première année lors de la période de croissance en environnement contrôlé.	39

Figure 11: Évolution de la fréquence de gauchissement des pousses de deuxième année en fonction de la fréquence de gauchissement des pousses de première année prise à chaque date d'échantillonnage lors de la période de croissance en environnement contrôlé.	41
Figure 12: Fréquence de gauchissement en 1991 des pousses de première année en fonction de la classe de gauchissement initiale prise en 1986.	46
Figure 13: Fréquence de gauchissement en 1991 des pousses de sixième année en fonction de la classe de gauchissement initiale des pousses de première année prise en 1986	47
Figure 14: Fréquence de gauchissement en 1991 de l'ensemble des pousses annuelles du plant en fonction de la classe de gauchissement initiale des pousses de première année prise en 1986.....	48
Figure 15: Caractérisation du système racinaire des plants de provenance 1, cinq ans après plantation.....	50

CHAPITRE I

INTRODUCTION

Le programme de reboisement mis sur pied par le ministère des Forêts du Québec (MFO) a comme objectif d'assurer la régénération d'une partie de nos forêts suite à l'exploitation forestière, une activité économique de première importance au Québec. En 1990, 52% des 250 millions de plants prévus pour le reboisement étaient de l'épinette noire (*Picea mariana* (Mill.) BSP) suivi par l'épinette blanche (*Picea glauca* (Moench) Voss.) avec 23% et par le pin gris (*Pinus banksiana* Lamb.) avec 18% (Dancause, 1990). Plus de 75% de la production de ces plants s'est faite en récipients. Afin d'assurer la survie du plus grand nombre de plants possible, de même qu'un développement rapide après la plantation, ceux-ci doivent être évalués selon différents critères tels la hauteur, le diamètre de l'hypocotyle, les maladies, etc. Le gauchissement de la tige, phénomène peu étudié, fait aussi partie des critères de classification.

Le gauchissement de la tige de l'épinette noire est un phénomène qui apparaît durant la période de croissance exponentielle de la pousse de 1^{ère} année chez les plants d'épinette noire ou sur la pousse annuelle de plants plus âgés (Lord *et al.*, 1991). Cette phase de croissance est caractérisée par des mouvements de balancement plus ou moins prononcés de la pousse qui entraînent parfois l'affaissement d'une section de celle-ci. Le redressement, de nature tropique ou résultant de la croissance secondaire, est parfois insuffisant pour corriger la courbure de la pousse. La lignification de la pousse ferait en sorte que cette courbure

deviendrait permanente, le plant devenant alors définitivement gauchi. L'un des objectifs de ce travail est de vérifier cette affirmation.

Lors de la production en serre ou en tunnel, jusqu'à 20% des plants d'épinette noire présentent ce phénomène de croissance (Margolis *et al.*, 1988; Lord *et al.*, 1990). À l'Université du Québec à Chicoutimi (UQAC), le gauchissement de la tige a été regroupé sous quatre classes d'angle de la pousse par rapport à la verticale: $\leq 15^\circ$ pour la première classe; $> 15^\circ$ à $\leq 45^\circ$ pour la seconde; $> 45^\circ$ à $\leq 90^\circ$ pour la troisième; et $> 90^\circ$ pour la quatrième. Selon les critères d'évaluation du MFO, un gauchissement de plus de 15° amène une déclassification du plant (Brouillette *et al.*, 1987), d'où une perte significative de revenus pour les producteurs lors de certaines années de production. Les plants gauchis sont rejetés car on estime qu'ils croîtraient plus lentement que les plants non-gauchis une fois plantés. Un autre objectif de ce travail consiste à confirmer ou infirmer cet autre affirmation.

La première hypothèse qui sous-tend ce projet affirme que tous les plants gauchis possèdent un même potentiel à se redresser, et ce même après lignification. Diverses causes possibles du gauchissement et de son développement ont été avancées ou étudiées (Langlois et Carrier, 1984; Margolis *et al.*, 1988; Lord *et al.*, 1990; Margolis et Lord, 1990; Lord *et al.*, 1991; Margolis *et al.*, 1991; Lord et Allaire, 1992a, b; Walsh, 1993). Pourtant, seuls les travaux de Béland et Lapierre (1992) ont porté sur la performance des plants gauchis en plantation. Cependant, ces derniers n'ont étudié que l'aspect "croissance de la tige". À notre connaissance, aucune mesure de gauchissement n'a été prise sur les pousses de 1^{ère} année ayant plus d'un an de même que sur les pousses annuelles ultérieures à celle de 1^{ère} année. En conséquence, on ne connaît pas l'évolution du gauchissement des plants sur le terrain.

Est-ce que le plant se redresse? Quelles sont les conséquences sur la qualité, en terme de gauchissement, des pousses annuelles ultérieures à celle de 1^{ère} année?

Des résultats préliminaires obtenus par l'équipe de recherche de l'UQAC ont démontré que les plants très fortement gauchis ($> 90^\circ$) présentaient un système racinaire moins développé et ce, tant au niveau de la biomasse que du volume (Allaire, communication personnelle). Selon Lyr et Hoffmann (1967), une croissance racinaire vigoureuse est nécessaire pour assurer une bonne croissance caulinare. La forme qu'adopte la racine influence également la croissance du tronc (Wagg, 1967). Par exemple, lorsqu'un nouveau fascicule de racines latérales se forme pour remplacer celui qui se dégrade, le tronc croît toujours à un rythme régulier mais à un taux comparativement plus lent (Wagg, 1967).

La seconde hypothèse à être validée par ce projet affirme que les plants très fortement gauchis sont désavantagés par leur plus faible système racinaire et non par la classe de gauchissement de leur tige. Les travaux de Margolis *et al.* (1991) suggèrent également un problème à propos du système racinaire. Selon ces derniers, le gauchissement pourrait résulter d'une perturbation, au niveau du système racinaire, dans le processus de transformation de la phénylalanine en précurseur de la lignine. Les objectifs spécifiques de ce projet sont de vérifier les effets réels du gauchissement de la pousse de 1^{ère} année des plants d'épinette noire sur la croissance ultérieure, et de vérifier le rôle possible du système racinaire dans cette performance. Le potentiel de redressement de la tige pour les différentes classes de gauchissement de l'épinette noire est aussi étudié.

Pour atteindre ces objectifs et valider les hypothèses, deux expériences ont été réalisées. La première s'est déroulée en environnement contrôlé. Le but est de vérifier si le

potentiel de croissance des plants des différentes classes de gauchissement est similaire à celui des plants de classe 1, de vérifier si les plants gauchis se redressent après lignification, de vérifier si le gauchissement de la pousse de 1^{ère} année influence le gauchissement de la pousse annuelle de 2^e année, et de vérifier si le système racinaire se développe différemment selon la classe de gauchissement attribué en 1^{ère} année. La seconde expérience s'est déroulée en plantation. Le but est de valider certains résultats exprimés en environnement contrôlé avec des arbres plantés en 1986.

CHAPITRE II

MATÉRIEL ET MÉTHODES

2,1 EXPÉRIENCE 1: ENVIRONNEMENT CONTRÔLÉ

2,1,1 PROVENANCE DES PLANTS ET DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL

Les plants d'épinette noire (*Picea mariana* (Mill.) BSP) utilisés proviennent de graines d'un peuplement forestier naturel du Canton Anville (49° 40' N 75° 15' O) de la région écologique 12b du ministère des Forêts du Québec (MFO). Les plants ont été cultivés en serre à la Coopérative forestière de Girardville (49° 00' N 72° 32' O) dans des récipients multipots de plastique de type IPL-67 cavités de 50 ml chacune dans un substrat de tourbe recouvert de silice. L'ensemencement a été effectué le 21 mars 1991. Une période de mise en dormance, à l'aide d'un traitement de jours courts, a eu lieu du 02 au 18 juillet 1991 alors que les plants étaient âgés de 15 semaines.

Les plants expérimentaux, âgés de 27 semaines, ont été systématiquement répartis le 24 septembre 1991 à la pépinière selon quatre classes de gauchissement : classe 1 = angle de la pousse par rapport à la verticale $\leq 15^\circ$; classe 2 = angle de la pousse par rapport à la verticale $> 15^\circ$ à $\leq 45^\circ$; classe 3 = angle de la pousse par rapport à la verticale $> 45^\circ$ à $\leq 90^\circ$; classe 4 = angle de la pousse par rapport à la verticale $> 90^\circ$.

Par la suite, ils ont été entreposés pendant neuf semaines dans une serre de l'UQAC (48° 25' N 71° 04' O) sans lumière d'appoint ni chauffage ou engrais. Ils ont été irrigués au besoin.

Les plants ont été transférés dans des bassins hydroponiques les 27 et 28 novembre 1991. Les racines ont été lavées délicatement dans de l'eau froide et insérées dans des panneaux de polystyrène troués. Les plants étaient retenus en place dans les trous par de la laine de roche (Partek Insulations inc.) enroulée autour de la base de la tige; les racines flottaient librement dans la solution nutritive. Les trous étaient disposés à tous les 61 mm pour une densité de 312,5 plants m⁻².

Le dispositif expérimental comprenait 4 bassins hydroponiques identiques répartis dans quatre chambres à environnement contrôlé Conviron E-15 éclairées par un jeu de 12 lampes incandescentes I-Line de 60 W (60A/99-130 V dépoli) et un jeu de 16 fluorescents Phillips de 160 W (F72T12/CW/VHO).

Chaque système hydroponique était composé de deux bassins et fonctionnait selon les principes d'un système marée haute-marée basse (figure 1). Un bassin d'une capacité de 60 L se trouvait à l'intérieur de la chambre à environnement contrôlé et un second d'une capacité de 120 L à l'extérieur. Un diffuseur d'air et une pompe à eau électrique ont été placés dans le bassin extérieur. Cette dernière amenait la solution nutritive du bassin extérieur vers le bassin intérieur. Un contrôle de niveau situé dans le bassin intérieur arrêtait la pompe à eau lorsque le niveau supérieur du bassin intérieur était atteint. À ce moment, la solution nutritive descendait par gravité du bassin intérieur vers le bassin extérieur. Une fois que le niveau inférieur du bassin intérieur était atteint, la pompe se remettait en marche. Des supports en

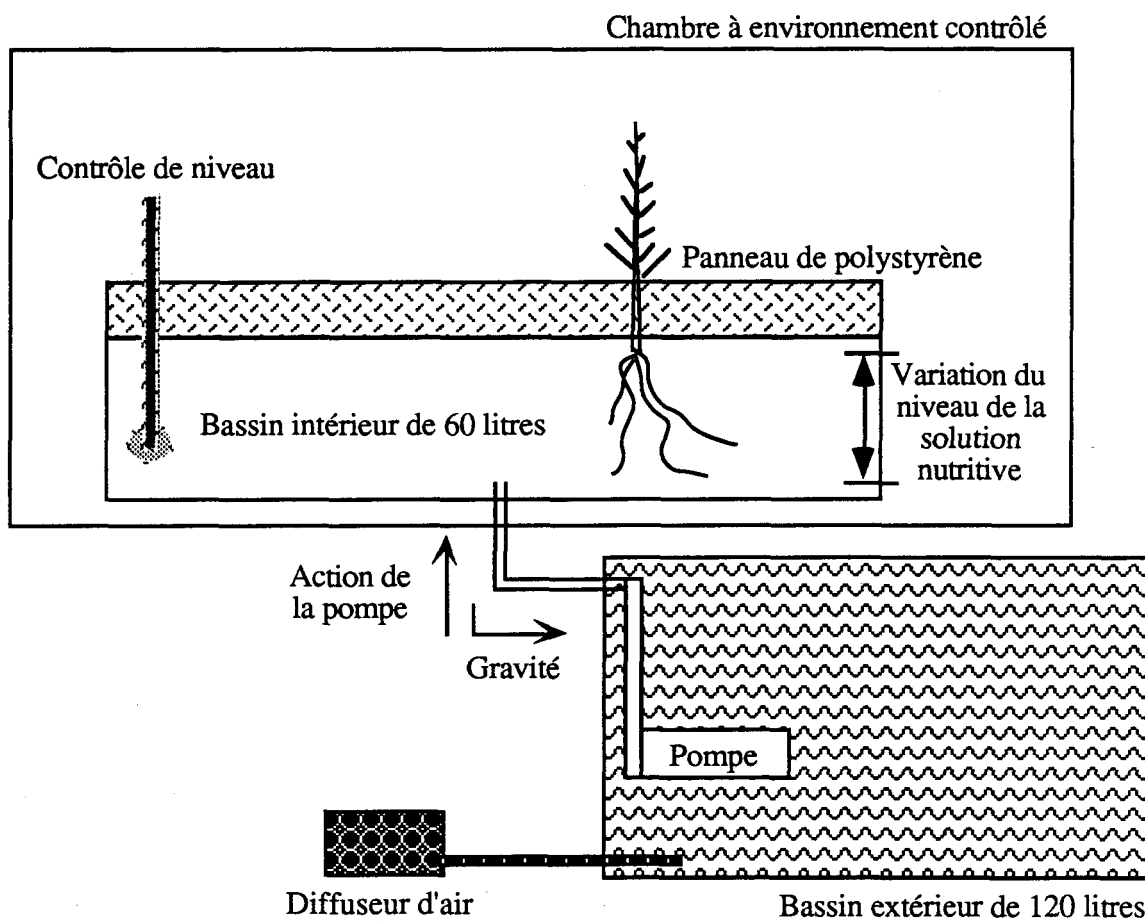


Figure 1: Schéma du système hydroponique. Non à l'échelle.

aluminium en forme de "V" inversé soutenaient les panneaux de polystyrène et empêchaient la formation de courant à l'intérieur du bassin lors des cycles marée haute-marée basse.

Le bassin intérieur a été fabriqué à partir d'une feuille d'aluminium de 0,6 mm d'épaisseur. Des analyses de solution faites à partir d'une expérience requérant le même type de bassin d'aluminium (Boucher, 1992) n'ont montré aucune différence significative dans la concentration en ion aluminium entre la solution-mère et une solution ayant passé près de 20 semaines dans le dit bassin (Boucher, communication personnelle).

Chacune des 4 chambres était divisée en 8 parcelles de 23 plants expérimentaux pour un grand total de 736 plants expérimentaux. Chaque classe de gauchissement occupait 2 parcelles disposées aléatoirement à l'intérieur de chacune des chambres. Les plants expérimentaux de chaque parcelle étaient entourés de plants de bordure.

2,1,2 CONDITIONS DE CULTURE

La période de croissance en chambre à environnement contrôlé a duré 15 semaines. De la semaine 0 à la semaine 6 inclusivement, la photopériode était composée d'une période éclairée de 18 heures et d'une période obscure de 6 heures. Les différents niveaux d'intensité lumineuse de même que les différentes températures à l'intérieur de la chambre à environnement contrôlé sont indiqués au tableau I. L'intensité lumineuse a été mesurée à l'aide d'un spectroradiomètre LI-188B de LI-COR, inc.

Lors du traitement de mise en dormance aux semaines 7 et 8, la photopériode et la thermopériode ont été modifiées (tableau I). Suite à ce traitement, les conditions initiales ont

Tableau I: Intensités lumineuses et températures maintenues à l'intérieur des chambres à environnement contrôlé lors des 15 semaines de culture hydroponique

Intensité lumineuse ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	Semaines 1 à 6 et 9 à 11		Semaines 7 et 8		Semaines 12 à 15	
	Température (°C)	Heure	Température (°C)	Heure	Température (°C)	Heure
0*	15	00:00-06:00	10	17:00-09:00	15	18:00-08:00
91,2 \pm 11,8	15	06:00-06:30	10	09:00-09:30	15	08:00-08:30
184,2 \pm 27,5	18	06:30-07:00	16	09:30-10:00	18	08:30-09:00
380,0 \pm 65,2	22	07:00-23:00	22	10:00-16:00	22	09:00-17:00
184,2 \pm 27,5	22	23:00-23:30	22	16:00-16:30	22	17:00-17:30
91,2 \pm 11,8	18	23:30-00:00	16	16:30-17:00	18	17:30-18:00

* Intensité lumineuse moyenne des 4 chambres prise au-dessus des plants.

Tableau II: Indice semi-quantitatif de Burdett (1979) modifié

Indice	Signification
0	Aucune nouvelle racine
1	1 à 30 nouvelles racines mais aucune de plus de 10 mm
2	Plus de 30 nouvelles racines mais aucune de plus de 10 mm
3	1 à 3 nouvelles racines de plus de 10 mm et moins de 30 nouvelles racines de moins de 10 mm
4	1 à 3 nouvelles racines de plus de 10 mm et plus de 30 nouvelles racines de moins de 10 mm
5	4 à 10 nouvelles racines de plus de 10 mm
6	11 à 30 nouvelles racines de plus de 10 mm
7	Plus de 30 nouvelles racines de plus de 10 mm

été réutilisées lors des semaines 9 à 11 (tableau I). La photopériode et la thermopériode ont été modifiées à nouveau par la suite pour les semaines 12 à 15 car les plants avaient démontré des signes de débourrement précoce.

Les racines baignaient dans une solution Johnson modifiée diluée de moitié (Epstein, 1972) qui a été préparée à partir de fertilisant soluble (Plant-Products), puis complétée en éléments mineurs avec des sels de grade analytique: 268 mg L⁻¹ de nitrate de potassium 12-0-44 + oligoéléments; 455 mg L⁻¹ de nitrate de calcium 15,5-0-0; 115 mg L⁻¹ de mono-ammonium de phosphate 12-62-0; 122 mg L⁻¹ de sulfate de magnésium (9,85% Mg, 13% S); 1,85 mg L⁻¹ de KCl; 0,48 mg L⁻¹ de H₃BO₃; 0,06 mg L⁻¹ de Na₂MoO₄.2H₂O; et 1,95 mg L⁻¹ de NaFeEDTA.

Des ajouts de solution nutritive ou d'eau dans les bassins extérieurs de 120 L permettaient de maintenir la conductivité électrique entre 900 (nouvelle solution) et 1200 µmhos cm⁻¹. Des mesures de pH ont aussi été faites afin d'identifier rapidement tout changement qui aurait pu survenir dans la solution. Il a varié d'un maximum de 5,50 (nouvelle solution) à un minimum de 3,20 (avant le changement de solution). La vidange complète de la solution nutritive se faisait systématiquement à toutes les trois semaines afin d'éviter toute accumulation excessive d'éléments minéraux ou de déchets d'origine végétale.

Le cycle marée haute-marée basse dans les quatre chambres durait en moyenne 15 min 29 sec ± 3 min 25 sec. De plus, un diffuseur d'air fonctionnant en permanence dans le bassin extérieur maintenait la solution nutritive à un taux d'oxygène dissous de 94% (oxygénomètre YSI Model 58 muni d'une sonde YSI Model 5739).

2,1,3 TEST DE CAPACITÉ DE CROISSANCE RACINAIRE

Conjointement à l'installation des plants dans les chambres à environnement contrôlé, un test de capacité de croissance racinaire (CCR) a été initié dans les serres expérimentales de l'UQAC. Le test de CCR a été réalisé sur un échantillon de 16 plants par classe de gauchissement. L'indice semi-quantitatif de Burdett (1979) modifié a été mesuré à la 14^e et à la 21^e journée du test de CCR (tableau II). À noter que plus un plant obtient un indice élevé, meilleur est sa capacité de croissance racinaire. Les récipients contenant les plants ont été placés dans des bassins de type marée haute-marée basse. Une fois par jour, les plants étaient irrigués avec de l'eau déchlorée à température ambiante. Les conditions de culture sont présentées au tableau III.

À la date du début du test (91-11-30), la durée de l'éclairement naturel était très courte (6 heures comparativement à 18 heures au mois de juin). Pour suppléer à ce manque de lumière, deux lampes à vapeur de sodium haute pression de 400 W ont été ajoutées pour une période éclairée de 18 heures et une période obscure de 6 heures.

Parallèlement au test de CCR effectué en serre, l'indice semi-quantitatif de Burdett (1979) modifié a été mesuré en chambre à environnement contrôlé sur 16 plants par classe de gauchissement à la 24^e journée de culture hydroponique. Le nombre de degrés-jour cumulés en environnement contrôlé était de 420 (17,5 degrés-jour pendant 24 jours).

Tableau III: Conditions de culture dans la serre de l'UQAC lors du test de capacité de croissance racinaire

Date	Température		Degrés-jour*	Degrés-jour cumulés	Humidité relative	
	maximale	minimale			maximale	minimale
	(°C)	(°C)			(%)	(%)
91-11-30	23	13	17,0	17,0	60	32
91-12-01	32	15	22,5	39,5	60	32
91-12-02	31	14	21,5	61,0	53	19
91-12-03	23	14	17,5	78,5	51	24
91-12-04	24	15	18,5	97,0	61	36
91-11-05	24	11	16,5	113,5	52	30
91-12-06	26	14	19,0	132,5	54	32
91-12-07	21	9	14,0	146,5	41	31
91-12-08	25	10	16,5	163,0	44	30
91-12-09	26	9	16,5	179,5	84	31
91-12-10	29	11	19,0	198,5	47	28
91-12-11	31	13	21,0	219,5	65	35
91-12-12	32	13	21,5	241,0	65	37
91-12-13†	28	14	20,0	261,0	85	57
91-12-14	34	15	23,5	284,5	85	45
91-12-15	24	13	17,5	302,0	67	44
91-12-16	27	13	19,0	321,0	53	34
91-12-17	30	15	21,5	342,5	52	30
91-12-18	29	15	21,0	363,5	54	34
91-12-19	28	13	19,5	383,0	57	30
91-12-20†	24	14	18,0	401,0	46	35

* Degré-jour = ((température maximale - température minimale)/2) - 1.

† Date où l'indice semi-quantitatif de Burdett (1979) modifié a été mesuré.

2,1,4 MESURES DE CROISSANCE

Un premier échantillonnage de 16 plants par classe de gauchissement a eu lieu lors de l'installation des plants dans les chambres à environnement contrôlé. Les échantillonnages subséquents se sont effectués à toutes les 3 semaines pendant 15 semaines. Deux plants par parcelle (8) par chambre à environnement contrôlé (4) étaient échantillonnés aléatoirement pour un total de 64 plants à raison de 16 plants par classe de gauchissement.

Les mesures prises sur chacun des plants étaient les longueurs de la pousse de 1^{ère} et de 2^e année, la longueur totale de la tige, le diamètre de l'hypocotyle, le nombre de racines de 1^{er} ordre ayant un diamètre ≥ 1 mm, et les biomasses sèches caulinaires et racinaires. Les rapports de biomasse sèche caulinaires/racinaires (BSC/BSR) et de hauteur/diamètre (H/D) ont été calculés à partir de ces mesures pour chacun des plants.

2,1,5 MESURES DE GAUCHISSEMENT

Les mesures de gauchissement ont été prises à toutes les trois semaines pendant 15 semaines sur un groupe permanent de 96 plants et sur les 64 plants échantillonnés lors des mesures de croissance pour un total de 160 plants par date d'échantillonnage. Le groupe permanent de 96 plants a servi pour les mesures de gauchissement tout au long de l'expérimentation. Ceux-ci ont été choisis aléatoirement à partir de trois plants par parcelle (8) par chambre à environnement contrôlé (4) à raison de 24 plants par classe de gauchissement.

Les mesures consistaient à évaluer la classe de gauchissement sur la pousse de 1^{ère} et de 2^e année de chaque plant. Les classes étaient les mêmes que celles ayant servi à sélectionner les plants à la Coopérative forestière de Girardville. Si plus d'un angle se retrouvait sur la même pousse, la classe de l'angle le plus élevé était retenue.

Afin d'éviter toute subjectivité, aucun plant ou parcelle n'était identifié ou ne pouvait permettre l'identification de la classe initiale du plant lors des mesures.

2,1,6 TRAITEMENT DES DONNÉES

Tous les résultats ont été traités à l'aide des logiciels SuperANOVA et StatView™ 512+. Les moyennes des longueurs, des diamètres, des biomasses caulinaires et racinaires, des nombres de racines de 1^{er} ordre ≥ 1 mm de diamètre, des rapports hauteur/diamètre (H/D) et des biomasses sèches caulinaire/racinaire (BSC/BSR) ont été comparées à l'aide de l'analyse de variance (ANOVA). Lorsque l'hypothèse d'égalité des moyennes était rejetée, une comparaison multiple des moyennes était calculée par le test LSD de Fisher à un seuil de signification de 5% ($\alpha = 0,05$). L'analyse statistique a été effectuée selon un plan entièrement aléatoire pour la semaine 0 car les plants n'étaient pas encore disposés dans les chambres à environnement contrôlé. Pour les semaines 3 à 15, l'analyse statistique a été effectuée selon un plan en blocs aléatoires complets.

Les fréquences de l'indice semi-quantitatif de Burdett (1979) modifié ont été comparées à l'aide du test χ^2 à un seuil de signification de 5% ($\alpha = 0,05$). Lorsque l'hypothèse d'égalité des moyennes était rejetée, elles étaient comparées une à une à l'aide du

même test. Les résultats des quatre chambres ont été regroupés pour effectuer l'analyse statistique du test de CCR en environnement contrôlé.

2,2 EXPÉRIENCE 2: PLANTATION

2,2,1 PROVENANCE DES PLANTS ET DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL

Un dispositif expérimental mis en place en 1986 par l'Unité de recherche et de développement forestier de l'Abitibi-Témiscamingue (URDFAT) a servi de terrain d'échantillonnage pour la seconde expérience à l'automne 1991.

Les plants expérimentaux de l'URDFAT ont été produits dans les Serres coopératives de Guyenne (48° 47' N 78° 28' O) à partir de graines d'épinettes noires (*Picea mariana* (Mill.) BSP) de deux provenances. Elles ont été désignées par Béland et Lapierre (1992) sous les noms de provenance 1 et 4. La provenance 1 se situe entre les latitudes 49° 30' N et 48° 10' N de la région de l'Abitibi-Témiscamingue alors que la provenance 4 se situe entre les latitudes 48° 10' N et 47° 10' N de cette même région.

L'ensemencement a été effectué à la mi-décembre 1985 dans des récipients multipots de plastique de type IPL-67 cavités de 50 ml chacune dans un substrat de tourbe recouvert de silice. Après trois mois de croissance, les plants ont été classifiés selon six catégories: catégorie 1 = plants ayant une cime descendante et une pousse de 1^{ère} année croche; catégorie 2 = plants ayant une cime descendante et une pousse de 1^{ère} année droite; catégorie 3 = plants ayant une cime montante mais dont l'angle par rapport à la verticale est supérieur à 15° et dont

la pousse de 1^{ère} année est droite; catégorie 4 = plants ayant une cime verticale mais une pousse de 1^{ère} année avec courbe forte; catégorie 5 = plants ayant une cime verticale mais une pousse de 1^{ère} année avec courbe faible; catégorie 6 = plants témoins droits (Béland et Lapierre, 1992).

Un traitement de jours courts a été donné de la fin du mois d'avril au début du mois de mai afin d'initier la dormance des plants. Ces derniers ont été reboisés les 11 et 12 juillet 1986 dans le canton de Guyenne sur trois sites se différenciant par le type de substrat: argileux, sablonneux et organique (Béland et Lapierre, 1992). L'échantillonnage, pour la présente expérience, s'est limité aux plantations sur substrat sablonneux et organique. Un hectare d'un peuplement de pin gris d'une trentaine d'années a été coupé afin de recevoir le dispositif expérimental du site sablonneux (Béland et Lapierre, 1992). Le site organique (sol organique mince sur argile) était une ancienne terre agricole ayant déjà bénéficié de travaux de drainage.

Un désherbage manuel des graminées a été entrepris à chaque année sur le site organique, alors que le site sablonneux n'a pas fait l'objet de traitement annuel particulier (Béland et Lapierre, 1992).

Le site organique n'était pas protégé des grands vents contrairement au site sablonneux. Au moment de l'échantillonnage, des graminées cachaient souvent les épinettes plantées sur le site organique, lequel était mal drainé malgré les travaux antérieurs de drainage. Le broutage des plants d'épinette par les lièvres n'a été observé que dans le site sablonneux.

Un dispositif en blocs aléatoires complets a été installé en 1986 sur ces sites. Sur chaque emplacement, on retrouve 4 blocs contenant 12 parcelles chacun. Ces dernières correspondent à la combinaison des 2 provenances et des 6 catégories de gauchissement. Chaque parcelle contient 16 plants d'une même provenance et d'une même classe de gauchissement, pour un total de 768 plants par site espacés à tous les 2 m. Des plants de bordure ont été ajoutés en périphérie (Béland et Lapierre, 1992).

2,2,2 MESURES DE CROISSANCE

Des mesures de longueur de la tige et de diamètre de l'hypocotyle ont été prises sur place sur 384 plants (4 plants * 6 catégories * 2 provenances * 4 blocs * 2 sites). De plus, vingt-quatre plants du site sablonneux (4 plants * 6 catégories) et quatorze plants du site organique (soit 3, 2, 2, 2, 1 et 4 plants des catégories 1 à 6 respectivement) de la provenance 1 ont été extraits afin de déterminer leurs biomasses sèches caulinaires et racinaires et le nombre de racines de 1^{er} ordre ayant un diamètre ≥ 2 mm. La biomasse sèche des racelles (< 2 mm) et des racines (≥ 2 mm) ont également été mesurées. Seuls les plants de la provenance 1 ont été extraits.

Le volume de sol recueilli pour chaque plant était de 13 500 ml. Pour extraire les plants, une plaque d'aluminium délimitait un carré de 300 mm de côté, la tige du plant se trouvant au centre du carré. La profondeur du sol recueilli était de 150 mm puisque les racines des plants se trouvaient dans les 100 premiers mm. Les racines des plants ont ensuite été lavées à l'aide d'un jet d'eau. La matière organique résiduelle entre les racines a été enlevée à l'aide d'une aiguille et d'un scalpel.

2,2,3 MESURES DE GAUCHISSEMENT

Les mesures de gauchissement ont été prises selon les quatre classes de l'UQAC sur les mêmes plants qui ont servi aux mesures de croissance sur le terrain. Trois types de mesures ont été prises: 1) à la base du plant afin de vérifier s'il y avait eu correction ou non du gauchissement initial, 2) sur la pousse de 6^e et dernière année, et 3) sur l'ensemble du plant.

Les six catégories de gauchissement utilisées en 1986 par l'URDFAT ont été regroupées en trois classes d'angle de gauchissement afin de comparer les plants aux quatre classes de l'UQAC utilisées en 1991: classe $\leq 15^\circ$ correspond aux catégories 5 et 6 de l'URDFAT; classe $> 15^\circ$ à $\leq 90^\circ$ correspond aux catégories 3 et 4 de l'URDFAT; classe $> 90^\circ$ correspond aux catégories 1 et 2 de l'URDFAT.

2,2,4 FORME RACINAIRE

Les quatre formes générales de racine déterminées par Wagg (1967) ont servi de base à la description du système racinaire selon six formes: forme 1 = racine pivotante longue; forme 2 = racine pivotante courte; forme 3 = un seul verticille de racine avec une racine pivotante longue; forme 4 = un seul verticille de racine avec une racine pivotante courte; forme 5 = un système racinaire multi-verticillé avec une racine pivotante longue; forme 6 = un système racinaire multi-verticillé avec une racine pivotante courte.

L'expression racine pivotante longue désigne ici une racine pivotante qui est verticale et bien proportionnée sur le plan du développement par rapport aux autres racines.

L'expression de racine pivotante courte désigne ici une racine pivotante courte, absente, recourbée ou peu développée par rapport aux autres racines.

2,2,5 TRAITEMENT DES DONNÉES

Tous les résultats ont été traités à l'aide du logiciel StatView™ 512+. Les moyennes des longueurs, des diamètres, des biomasses sèches caulinaires et racinaires, du nombre de racines de 1^{er} ordre ≥ 2 mm de diamètre, des rapports hauteur/diamètre (H/D), des rapports biomasse sèche caulinaires/racinaires (BSC/BSR) et des rapports biomasse sèche des racines ≥ 2 mm / < 2 mm ($BSR \geq 2$ mm / $BSR < 2$ mm) ont été comparées à l'aide de l'analyse de variance (ANOVA). Lorsque l'hypothèse d'égalité des moyennes était rejetée, une comparaison multiple des moyennes était calculée par le test LSD de Fisher à un seuil de signification de 5% ($\alpha = 0,05$). Le dispositif expérimental de chaque site a été considéré comme un plan entièrement aléatoire lors de l'analyse statistique. Premièrement, parce que les six classes de gauchissement utilisées en 1986 ont été regroupées en trois classes en 1991 et, par conséquent, cela modifiait le plan d'expérience. Et finalement, pour ce qui est de l'expérience où des plants de provenance 1 ont été extraits, le nombre de plants par blocs et par site étaient inégaux.

Les fréquences des classes de gauchissement et des formes racinaires ont été comparées à l'aide du test χ^2 à un seuil de signification de 5% ($\alpha = 0,05$). Lorsque l'hypothèse d'égalité des moyennes était rejetée, elles étaient comparées une à une à l'aide du même test. Lorsqu'il n'y avait pas de différence significative entre les sites ou entre les provenances, les résultats étaient combinés.

CHAPITRE III

RÉSULTATS

3,1 EXPÉRIENCE 1: ENVIRONNEMENT CONTRÔLÉ

3,1,1 TEST DE CAPACITÉ DE CROISSANCE RACINAIRE

Les résultats du test de capacité de croissance racinaire (CCR) sont présentés à la figure 2. Les deux premières parties présentent les résultats obtenus en serre et la troisième partie présente ceux obtenus en chambre à environnement contrôlé. Le nombre de racines augmente en fonction du temps du test de CCR (figure 2a et 2b). La répartition des plants de la classe 1 est significativement différente de ceux des classes 2 ($p = 0,0068$) et 4 ($p = 0,0452$) au jour 14 du test de CCR. La répartition des plants n'est pas significativement différentes aux jours 21 et 24.

Les plants de la classe 1 ont atteint un indice semi-quantitatif de Burdett (1979) modifié plus élevé que ceux des autres classes aux jours 14 et 21 du test de CCR en serre. Dans le test de 24 jours en culture hydroponique, les plants de toutes les classes ont atteint l'indice le plus élevé. Le test de CCR en culture hydroponique a été significativement supérieur à celui effectué en serre. L'indice moyen était de 5,44 au jour 21 en serre et de 6,19 au jour 24 en environnement contrôlé chez les plants de classe 1. Dans le même ordre,

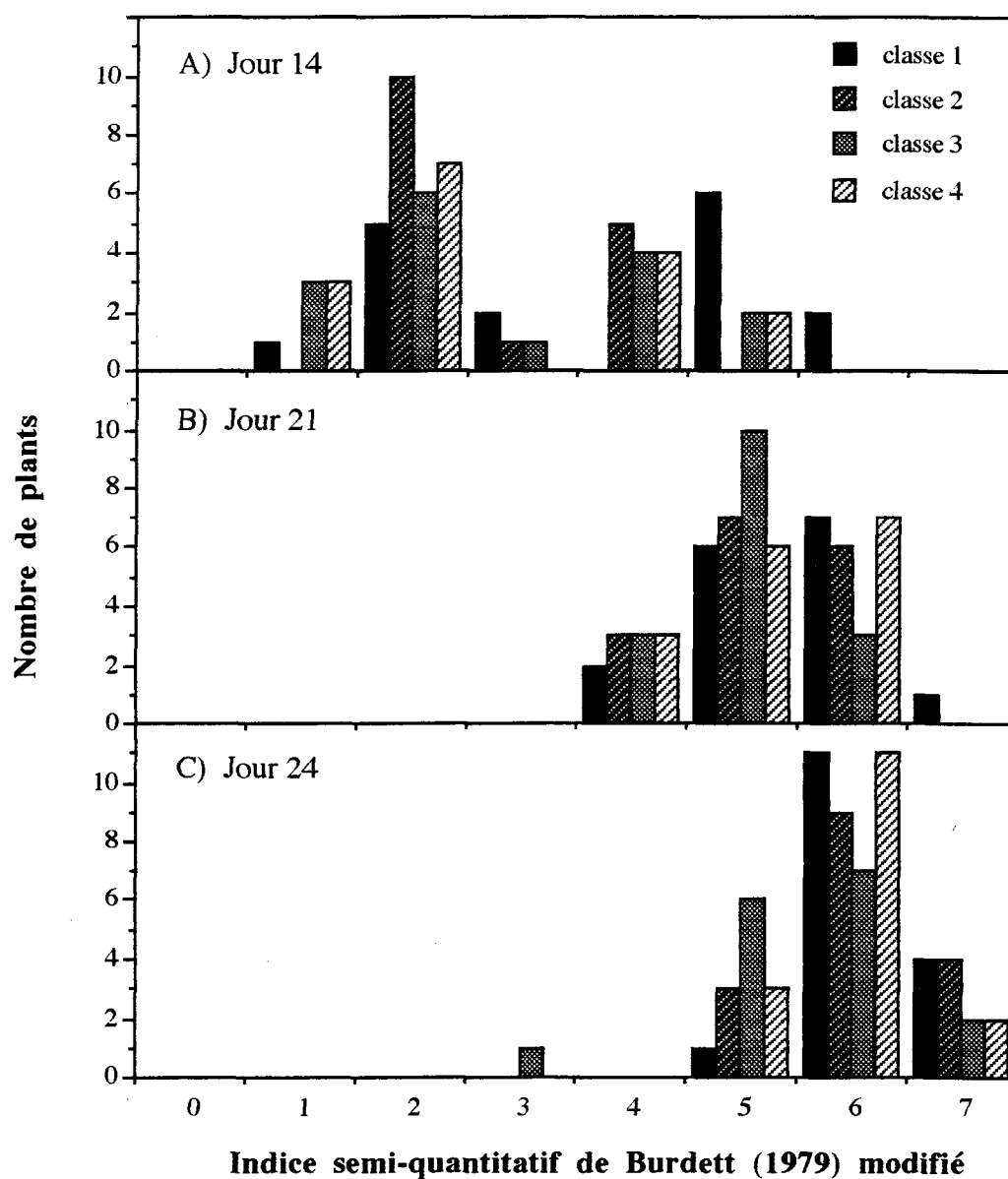


Figure 2: Nombre de plants par classe de gauchissement en fonction de l'indice semi-quantitatif de Burdett (1979) modifié (tableau II) lors des tests de capacité de croissance racinaire en serre (A et B) et en environnement contrôlé (C). N = 16 plants par classe de gauchissement et par journée d'échantillonnage.

il est de 5,19 et de 6,06 chez les plants de classe 2, de 5,00 et de 5,56 chez les plants de classe 3, et de 5,25 et de 5,94 chez les plants de classe 4.

3,1,2 CROISSANCE DES PLANTS

Le taux de survie lors de la période de croissance en environnement contrôlé a été de 98,24% (1116/1136). À noter que la mort est survenue dans les trois premières semaines de croissance en environnement contrôlé chez 55,0% (11/20) des plants morts.

Le nombre de racines de 1^{er} ordre ayant un diamètre ≥ 1 mm a varié énormément entre les plants d'une même classe de gauchissement. À la semaine 0, les plants de classe 1 à 4 ont présenté un nombre de racines de 1^{er} ordre ≥ 1 mm de $0,88 \pm 0,72$, de $0,75 \pm 1,13$, de $0,31 \pm 0,48$ et de $0,06 \pm 0,25$ respectivement. Les plants de classe 1 étaient significativement différents des plants de classe 3 et 4. Les plants de classe 2 étaient significativement différents des plants de classe 4. À la semaine 15, où aucune différence significative n'a été notée, les plants des classes 1 à 4 ont présenté un nombre de racines de 1^{er} ordre ≥ 1 mm de $3,25 \pm 2,30$, de $4,56 \pm 2,63$, de $4,31 \pm 1,96$, et de $4,00 \pm 2,88$ respectivement. Les racines de 1^{er} ordre se sont développées davantage dans le tiers supérieur du système racinaire.

Des racines adventives prenant assises au niveau de l'hypocotyle et de la tige ont été observées. Ces racines se développaient le plus souvent dans la laine de roche humide entourant la base du plant.

L'analyse des mesures de croissance prise au départ sur les populations de plants des différentes classes de gauchissement montrent que les populations étaient significativement

différentes avant la période de croissance en environnement contrôlé (tableau IV). Les coefficients de variation élevés indiquent cependant que la variabilité des plants à l'intérieur d'une même classe de gauchissement était importante. Les plants des classes 3 et 4 ont généralement présenté un coefficient de variation de 3 à 20% plus élevé que ceux des classes 1 et 2. Les coefficients de variation des quatre classes calculés pour les biomasses sèches caulinaires et racinaires ont été plus élevés que ceux des autres paramètres mesurés.

Lors de la période de croissance en environnement contrôlé, les biomasses sèches caulinaires des plants des quatre classes de gauchissement n'étaient pas significativement différentes les unes des autres, à l'exception des semaines 0 et 9 (tableau V). La biomasse sèche caulaire des plants des classes 1 et 2 a été significativement différente de celle des plants des classes 3 et 4 lors des semaines 0 et 9 (figure 3). En 15 semaines de culture hydroponique, les plants des classes 1 à 4 ont en moyenne multiplié leur biomasse sèche caulaire d'un facteur de 5,71, de 6,42, de 5,70 et de 7,32 respectivement.

La biomasse sèche racinaire des plants des différentes classes de gauchissement n'était pas significativement différente aux semaines 6 et 15 (tableau VI). De plus, les plants des classes 3 et 4 ont présenté des valeurs qui n'étaient pas significativement différentes pour l'ensemble de la période de croissance en environnement contrôlé, tout comme ceux des classes 1 et 2, sauf exception de la semaine 0 où les plants de la classe 2 ont présenté une biomasse sèche racinaire significativement supérieure (figure 4). En 15 semaines de culture hydroponique, les plants des classes 1 à 4 ont en moyenne multiplié leur biomasse racinaire d'un facteur de 2,44, de 2,00, de 3,09 et de 2,96 respectivement.

Tableau IV: Comparaison de la moyenne, de l'écart-type et du coefficient de variation des paramètres de croissance des plants gauchis avant la période de croissance en environnement contrôlé

Classe	Moyenne*				Écart-type				Coefficient de variation (%)			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Biomasse sèche caulinaire (g)	0,76a	0,77a	0,61b	0,60b	0,20	0,20	0,19	0,17	26	26	31	28
Biomasse sèche racinaire (g)	0,40a	0,55b	0,30c	0,28c	0,11	0,15	0,13	0,11	28	27	43	39
Rapport BSC/BSR	1,92a	1,41b	2,21ac	2,36c	0,34	0,17	0,74	0,63	18	12	33	27
Longueur totale de la tige (mm)	205,6 a	187,1 b	177,4 bc	171,8 c	22,7	19,3	19,8	22,9	11	10	11	13
Diamètre de l'hypocotyle (mm)	1,61a	1,65a	1,72a	1,60a	0,20	0,28	0,41	0,26	12	17	24	16
Rapport H/D ((mm mm ⁻¹) + 10)	12,88a	11,48b	10,81b	10,91b	1,71	1,28	2,50	1,87	13	11	23	17

* Chaque valeur correspond à la moyenne de 16 plants. Les valeurs d'une même rangée suivies d'une même lettre ne sont pas significativement différentes ($p < 0,05$).

Tableau V: Analyse de variance de la biomasse sèche caulinaire pour les différentes dates d'échantillonnage lors de la période de croissance en environnement contrôlé

Nature de la variation	Semaine 0			DL	Semaine 3		Semaine 6		Semaine 9		Semaine 12		Semaine 15	
	DL*	VAR†	P		VAR	P	VAR	P	VAR	P	VAR	P	VAR	P
Bloc	-	-	-	3	0,394	0,0738	2,281	0,0441	2,411	0,0162	8,203	0,0066	2,398	0,4673
Classe	3	0,129	0,0185	3	0,375	0,0820	1,009	0,2169	4,901	0,0017	3,182	0,0817	1,870	0,5641
Erreur expérimentale	60	0,036		9	0,121		0,560		0,406		1,025		2,592	
Erreur résiduelle	-	-	-	48	0,123		0,743		1,172		2,246		2,852	
Total	63			63										

* Degrés de liberté

† Variance estimée

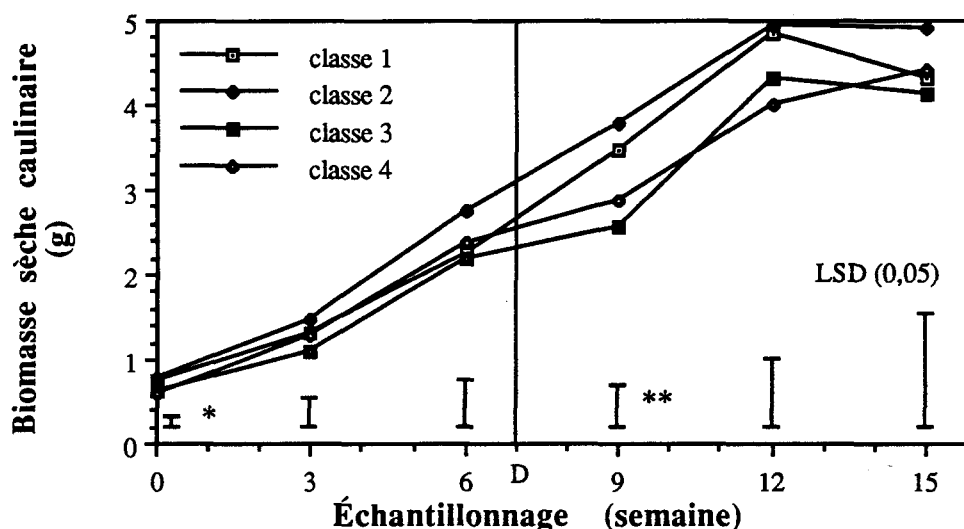


Figure 3: Évolution de la biomasse sèche caulinare des plants lors de la période de croissance en environnement contrôlé. La lettre D indique le début du traitement de dormance d'une durée de deux semaines. Les symboles *, ** et *** indiquent que le test F de l'ANOVA est significatif à un niveau de probabilité $P < 0,05$, $P < 0,01$ et $P < 0,001$ respectivement. Les barres verticales représentent la valeur critique du test LSD ($\alpha = 0,05$). $N = 16$ plants par classe de gauchissement et par date d'échantillonnage.

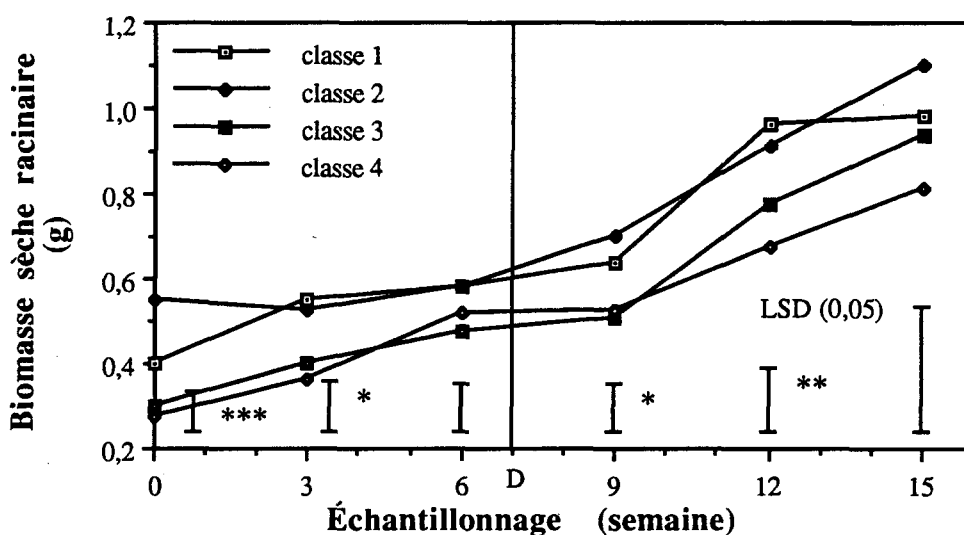


Figure 4: Évolution de la biomasse sèche racinaire des plants lors de la période de croissance en environnement contrôlé. Même légende que la figure 3.

Tableau VI: Analyse de variance de la biomasse sèche racinaire des plants pour les différentes dates d'échantillonnage lors de la période de croissance en environnement contrôlé

Nature de la variation	Semaine 0			DL	Semaine 3		Semaine 6		Semaine 9		Semaine 12		Semaine 15	
	DL*	VAR†	P		VAR	P	VAR	P	VAR	P	VAR	P	VAR	P
Bloc	-	-	-	3	0,006	0,8761	0,109	0,0284	0,012	0,6808	0,420	0,0015	0,189	0,3763
Classe	3	0,248	0,0001	3	0,135	0,0252	0,041	0,2097	0,140	0,0173	0,270	0,0068	0,229	0,3027
Erreur expérimentale	60	0,016		9	0,027		0,022		0,024		0,034		0,163	
Erreur résiduelle	-	-	-	48	0,023		0,040		0,032		0,059		0,154	
Total	63			63										

* Degrés de liberté

† Variance estimée

Le rapport de la biomasse sèche caulinare sur la biomasse sèche racinaire (BSC/BSR) a augmenté dans le temps jusqu'à la 12^e semaine de la période de croissance en environnement contrôlé (figure 5). Aucune différence significative n'a été notée aux 9^e et 12^e semaines, soit après la période de mise en dormance (tableau VII). À la 6^e semaine de la période de croissance en environnement contrôlé, les plants de la classe 1 ont présenté un rapport BSC/BSR significativement plus bas que les autres. Aux semaines 3 et 15, les plants de la classe 4 ont présenté un rapport BSC/BSR significativement plus élevé. Les plants des classes 1, 2 et 3 ont présenté à la 15^e semaine le même rapport moyen (4,529) alors que les plants de classe 4 ont présenté un rapport de 5,629.

Les plants des classes 1 à 4 ont présenté à la fin de l'expérimentation une longueur totale moyenne de la tige de 339, 371, 334 et 312 mm, soit une augmentation moyenne de 133, 184, 157 et 140 mm respectivement (figure 6). La baisse de croissance de la longueur totale du plant, lors de la semaine 12, des plants de classe 2 est la résultante de celle observée chez la pousse de 2^e année de ces mêmes plants (données non présentées) et n'est due qu'à un échantillonnage au milieu de la période de dormance où la tige ne pousse pratiquement plus en longueur. Les autres classes de plants n'ont pas montré ce genre de résultat. Des différences significatives ont été observées entre les plants des différentes classes de gauchissement pour l'ensemble de la période de croissance en environnement contrôlé (tableau VIII). À noter que la longueur totale de la tige des plants de classe 4 a été significativement différente de celle des plants de classe 3 seulement lors de la semaine 12. Les plants de classe 2 ont été significativement différents de ceux de classe 1 seulement lors des semaines 0 et 9. À la 15^e semaine, les plants de classe 1 n'ont pas été significativement différents de ceux des trois autres classes.

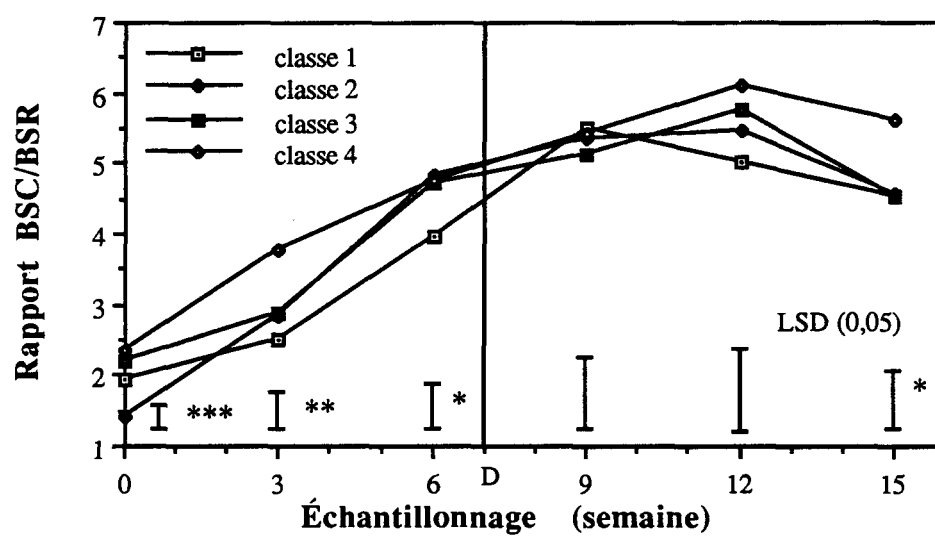


Figure 5: Évolution du rapport de la biomasse sèche caulinaires/racinaire (BSC/BSR) des plants lors de la période de croissance en environnement contrôlé. Même légende que la figure 3.

Tableau VII: Analyse de variance du rapport BSC/BSR pour les différentes dates d'échantillonnage lors de la période de croissance en environnement contrôlé

Nature de la variation	Semaine 0			DL	Semaine 3		Semaine 6		Semaine 9		Semaine 12		Semaine 15	
	DL*	VAR†	P		VAR	P	VAR	P	VAR	P	VAR	P	VAR	P
Bloc	-	-	-	3	1,383	0,0625	0,317	0,5930	2,816	0,1578	2,288	0,4191	0,164	0,9047
Classe	3	2,832	0,0001	3	4,970	0,0014	2,551	0,0214	0,390	0,8213	3,554	0,2521	4,843	0,0210
Erreur expérimentale	60	0,275		9	0,394		0,474		1,280		2,191		0,894	
Erreur résiduelle	-	-	-	48	0,373		0,703		0,740		1,240		0,730	
Total	63			63										

* Degrés de liberté

† Variance estimée

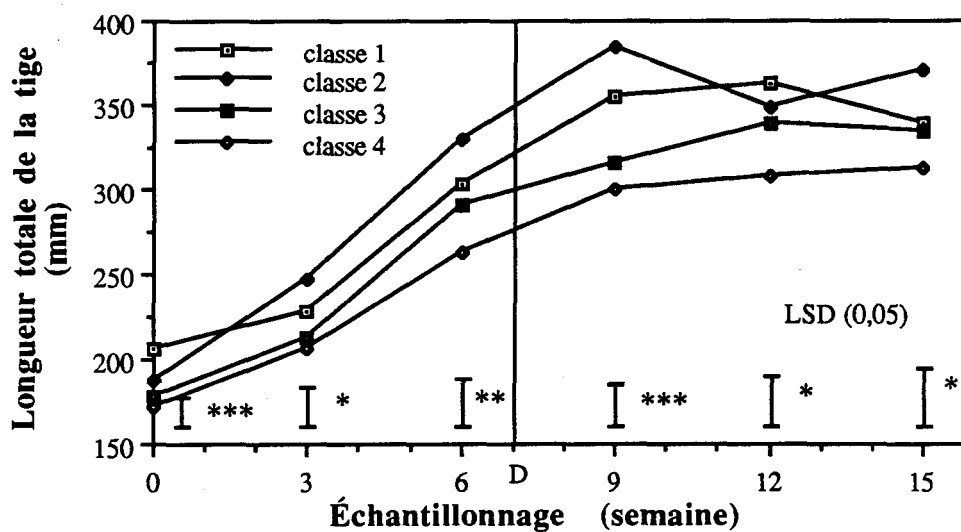


Figure 6: Évolution de la longueur totale de la tige des plants lors de la période de croissance en environnement contrôlé. Même légende que la figure 3.

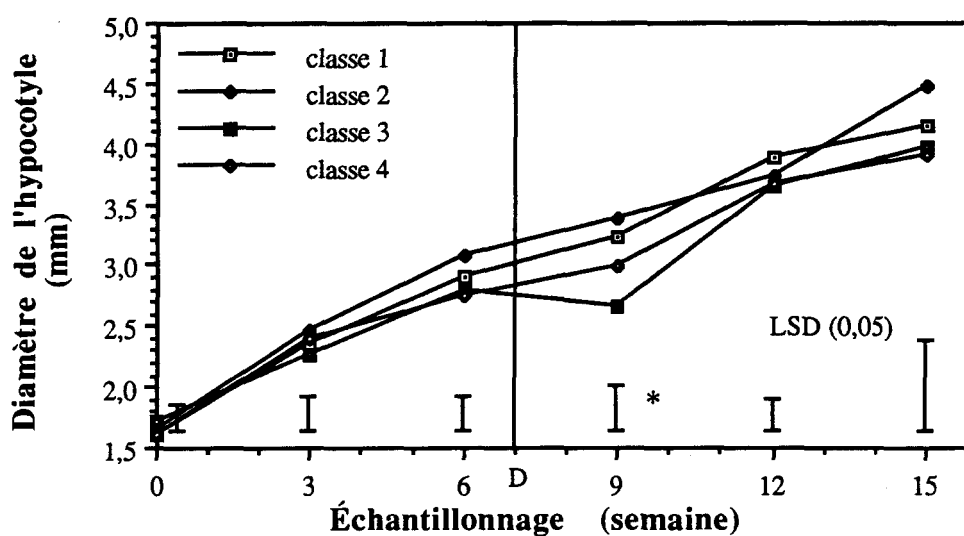


Figure 7: Évolution du diamètre de l'hypocotyle des plants lors de la période de croissance en environnement contrôlé. Même légende que la figure 3.

Tableau VIII: Analyse de variance de la longueur totale de la tige pour les différentes dates d'échantillonnage lors de la période de croissance en environnement contrôlé

Nature de la variation	Semaine 0			Semaine 3			Semaine 6		Semaine 9		Semaine 12		Semaine 15	
	DL*	VAR†	P	DL	VAR	P	VAR	P	VAR	P	VAR	P	VAR	P
Bloc	-	-	-	3	2712	0,1162	10716	0,0113	17487	0,0006	26526	0,0005	27510	0,0008
Classe	3	3520	0,0002	3	5306	0,0248	12359	0,0073	23358	0,0002	8873	0,0184	9329	0,0268
Erreur expérimentale	60	452		9	1041		1596		1089		1563		1886	
Erreur résiduelle	-	-	-	48	570		1553		2594		1716		2160	
Total	63			63										

* Degrés de liberté

† Variance estimée

Le diamètre de l'hypocotyle des plants des différentes classes de gauchissement n'a pas montré de différence significative, à l'exception de la semaine 9 (tableau IX). Immédiatement après la période de mise en dormance, le diamètre des plants de classe 3 a été significativement différent de celui des plants des classes 1 et 2 (figure 7). À la fin de l'expérimentation les plants des classes 1 à 4 ont présenté un diamètre moyen de l'hypocotyle de 4,15, 4,48, 3,98 et 3,91 mm, ce qui correspond à une augmentation moyenne respective de 2,54, 2,83, 2,26 et 2,31 mm.

Des différences significatives ont été observées entre les rapports H/D des plants des différentes classes de gauchissement lors des semaines 0 à 6 de la période de croissance en environnement contrôlé (tableau X). Le rapport H/D des plants des quatre classes de gauchissement a diminué à deux reprises lors de la période expérimentale, l'une du début à la 3^e semaine et une autre de la 9^e à la 15^e semaine (figure 8). La seconde baisse du rapport H/D est survenue après la période de mise en dormance. Les plants ont présenté un rapport H/D de 8,45, de 8,52, de 8,48 et de 8,18 pour les plants de classe 1 à 4, ce qui correspond à une diminution respective de 4,43, de 2,96, de 2,33 et de 2,73 depuis le début de l'expérience.

3,1,3 GAUCHISSEMENT

Dès la semaine 0, i.e. neuf semaines après la sélection initiale, la pousse de 1^{ère} année des plants des différentes classes de gauchissement a commencé à se redresser ou à gauchir davantage (figure 9). Les mouvements de la pousse de 1^{ère} année ont été accélérés dans les chambres à environnement contrôlé puisque, dès la 6^e semaine, 80% (128/160) des pousses

Tableau IX: Analyse de variance du diamètre de l'hypocotyle pour les différentes dates d'échantillonnage lors de la période de croissance en environnement contrôlé

Nature de la variation	Semaine 0			DL	Semaine 3		Semaine 6		Semaine 9		Semaine 12		Semaine 15	
	DL*	VAR†	P		VAR	P	VAR	P	VAR	P	VAR	P	VAR	P
Bloc	-	-	-	3	0,340	0,1508	1,048	0,0143	2,458	0,0047	3,330	0,0001	1,940	0,1506
Classe	3	0,045	0,6773	3	0,099	0,5997	0,339	0,1840	1,556	0,0188	0,203	0,2222	1,017	0,3691
Erreur expérimentale	60	0,089		9	0,151		0,169		0,276		0,115		0,859	
Erreur résiduelle	-	-	-	48	0,146		0,337		0,439		0,432		0,812	
Total	63			63										

* Degrés de liberté

† Variance estimée

Tableau X: Analyse de variance du rapport H/D pour les différentes dates d'échantillonnage lors de la période de croissance en environnement contrôlé

Nature de la variation	Semaine 0			Semaine 3			Semaine 6		Semaine 9		Semaine 12		Semaine 15	
	DL*	VAR†	P	DL	VAR	P	VAR	P	VAR	P	VAR	P	VAR	P
Bloc	-	-	-	3	2,746	0,2267	6,045	0,0263	2,218	0,7121	8,633	0,0064	4,772	0,0522
Classe	3	14,498	0,0108	3	6,162	0,0482	5,076	0,0412	9,880	0,1728	3,586	0,0688	0,374	0,8263
Erreur expérimentale	60	3,571		9	1,571		1,214		4,743		1,067		1,258	
Erreur résiduelle	-	-	-	48	1,592		1,891		3,491		1,553		1,986	
Total	63			63										

* Degrés de liberté

† Variance estimée

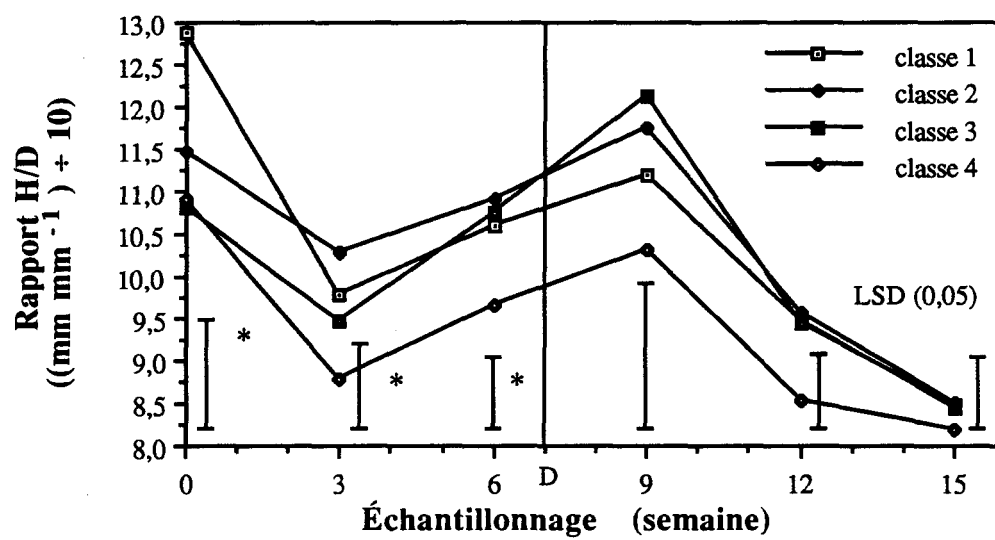


Figure 8: Évolution du rapport hauteur/diamètre (H/D) des plants lors de la période de croissance en environnement contrôlé. Même légende que la figure 3.

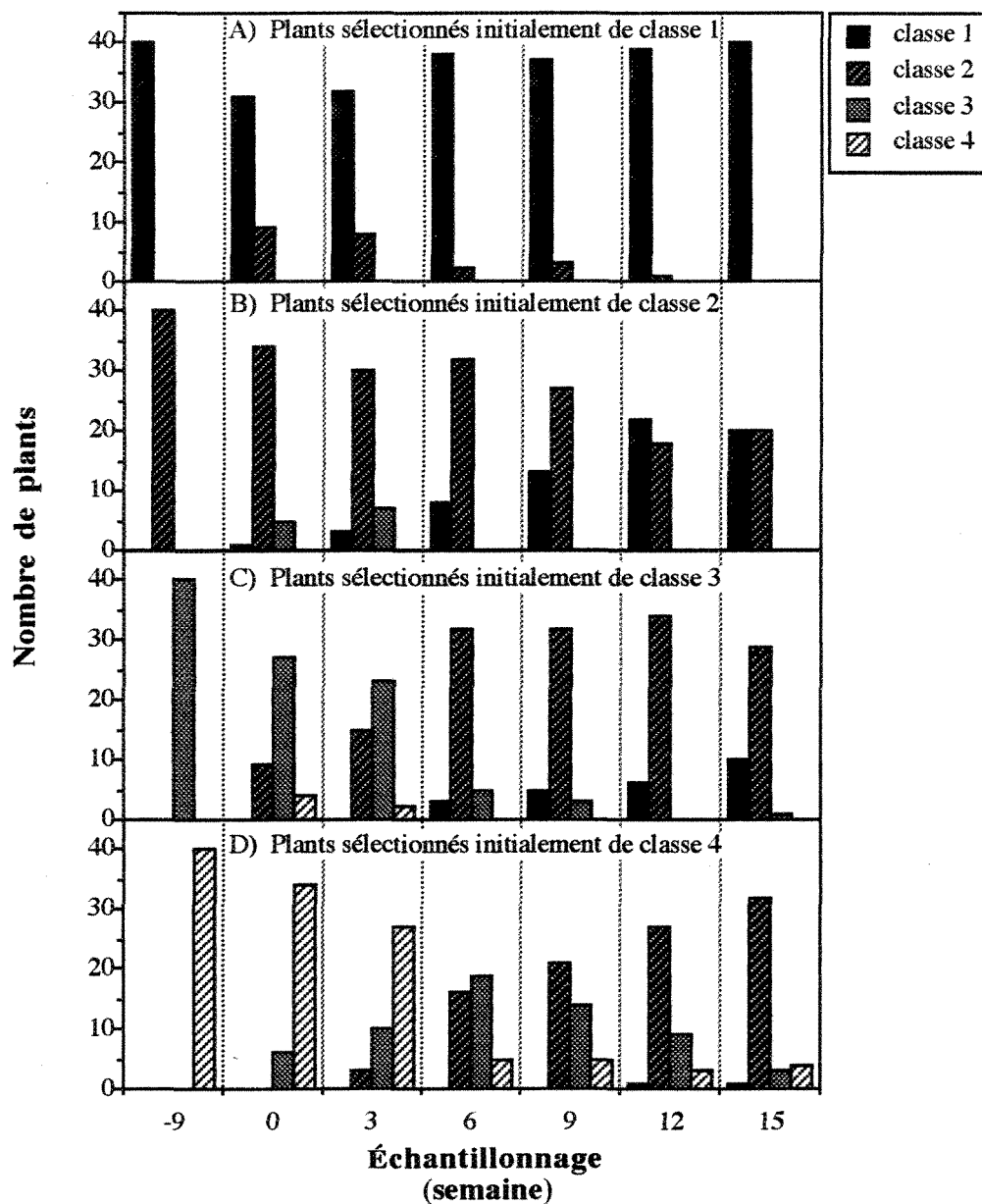


Figure 9: Évolution de la fréquence de gauchissement des pousses de première année en fonction de leur sélection initiale lors de la période de croissance en environnement contrôlé. N = 40 plants par classe de gauchissement sélectionnée et par date d'échantillonnage. La sélection des plants s'est faite neuf semaines avant (-9) l'expérience en environnement contrôlé.

de 1^{ère} année des plants des différentes classes de gauchissement se sont retrouvées dans les classes 1 et 2; à la 15^e semaine, 95% (152/160), dont 46,7% (71/152) étaient de classe 1.

Les plants dont la pousse de 1^{ère} année était plus gauchie à la semaine 0 que lors de la sélection effectuée à la Coopérative forestière de Girardville se sont tous redressés avant la fin de la période de croissance en environnement contrôlé. Chez ces derniers, les plants sélectionnés initialement de classe 2 et 3 se sont redressés plus rapidement que ceux sélectionnés initialement de classe 1.

Suite aux mouvements de la pousse de 1^{ère} année lors de la période de croissance en environnement contrôlé, la totalité des plants sélectionnés de classe 1 ont gardé à la fin un angle $\leq 15^\circ$. La moitié des plants sélectionnés de classe 2 se sont redressés pour atteindre la classe 1, alors que l'autre moitié a gardé sa classification initiale. Chez les plants sélectionnés de classe 3, 97,5% (39/40) des plants ont atteint un angle $\leq 45^\circ$. De ces plants, 25% (10/40) et 72,5% (29/40) ont atteint respectivement les classes 1 et 2. Chez les plants sélectionnés de classe 4, 90% (36/40) des plants ont présenté un angle $\leq 90^\circ$ dont 88,9% (32/36) et 2,5% (1/36) ont atteint respectivement les classes 2 et 1. De plus, le redressement de la pousse de 1^{ère} année s'est fait plus rapidement chez les plants sélectionnés de classe 3 et 4 que ceux de classe 2.

La croissance de la pousse de 2^e année a débuté dans les trois premières semaines de croissance en environnement contrôlé pour la majorité des plants (figure 10). Lors de la semaine 3, un plant de la classe 1 et un autre de la classe 3 n'avaient pas encore de pousse de 2^e année. De la semaine 3 à la semaine 15, plus de 85,0% des pousses de 2^e année des plants des différentes classes de gauchissement ont présenté une classe de gauchissement de 1 ou de

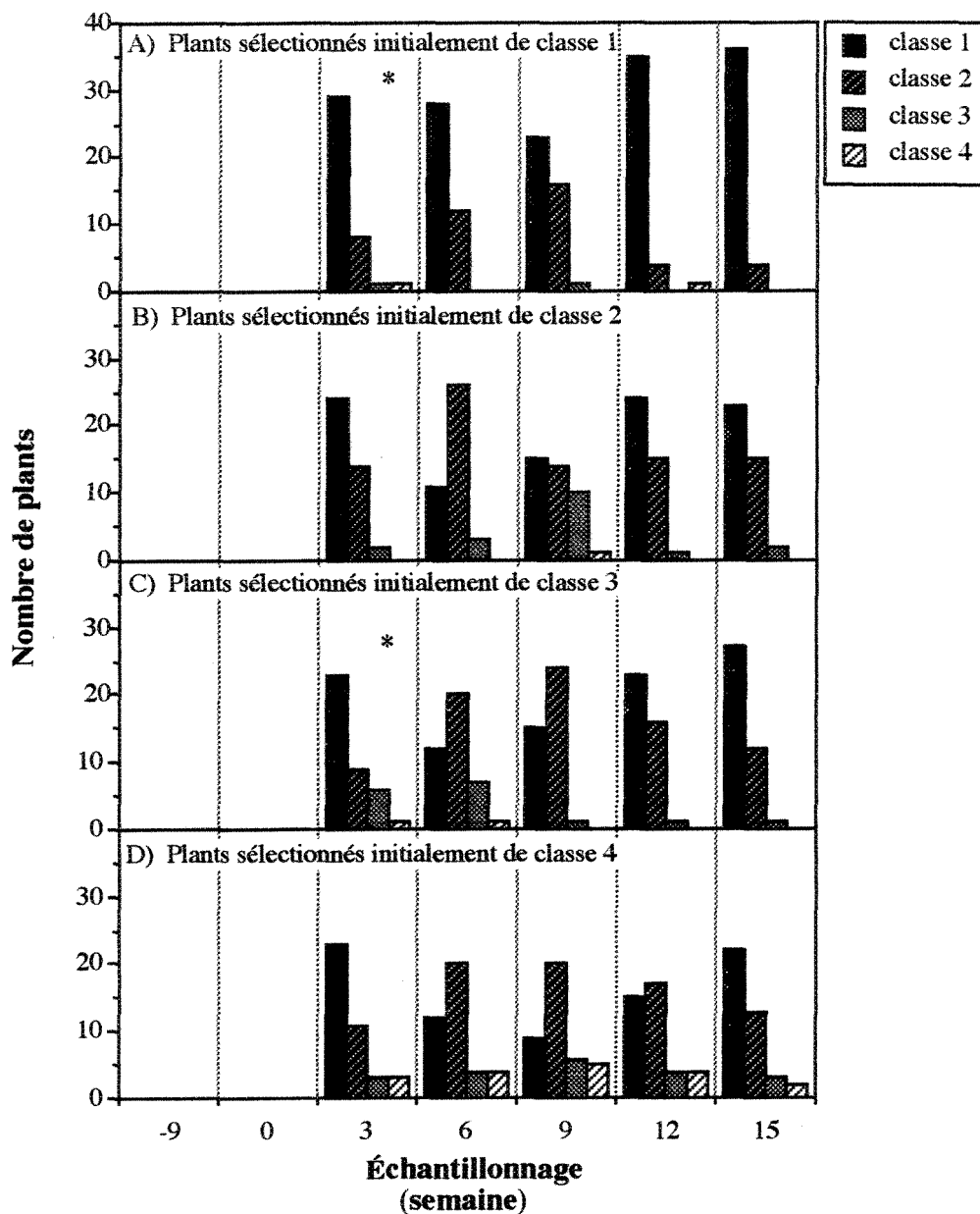


Figure 10: Évolution de la fréquence de gauchissement des pousses de deuxième année en fonction de la sélection initiale des pousses de première année lors de la période de croissance en environnement contrôlé. N = 40 plants par classe de gauchissement sélectionnée et par date d'échantillonnage, sauf pour celles marquées d'un * où N = 39. La sélection des plants s'est faite neuf semaines avant (-9) l'expérience en environnement contrôlé.

2. À la 15^e semaine 95,0% (152/160) des pousses de 2^e année ont présenté une classe de 1 ou de 2 dont 71,1% (108/152) ont présenté un gauchissement de classe 1.

Les taux de gauchissement des pousses de 2^e année des plants des différentes classes de gauchissement ont été relativement similaires lors de la 3^e semaine (figure 10). Ceci démontre que le gauchissement n'est pas restreint à une classe de plant en particulier.

La figure 11 présente la combinaison des résultats des figures 9 et 10. L'évolution de la fréquence de gauchissement des pousses de 2^e année est présentée en fonction de la fréquence de gauchissement des pousses de 1^{ère} année prise à chaque date d'échantillonnage. La classe de gauchissement initiale des plants n'est donc pas prise en considération. Le nombre de plants dont la pousse de 1^{ère} année a été classée 3 ou 4 (figure 11c et 11d) diminue fortement en fonction des semaines d'échantillonnage, car la pousse de 1^{ère} année de ces plants se redresse et atteint la classe 1 ou 2.

À l'échantillonnage de la semaine 15 (figure 11a), 44,3% (71/160) de tous les plants ont présenté, indépendamment de leur classe initiale, une pousse de 1^{ère} année de classe 1. De ces 71 plants, 80,3% (57/71) ont présenté une pousse de 2^e année de classe 1. Donc 35,6% (57/160) de tous les plants ont une courbure de la tige $< 15^\circ$. À la semaine 15, 50,6% (81/160) de tous les plants ont présenté une pousse de 1^{ère} année de classe 2 (figure 11b), dont 54,3% (44/81), 38,3% (31/81), 4,9% (4/81) et 2,5% (2/81) ont respectivement présenté une pousse de 2^e année de classe 1, 2, 3 et 4. Toujours à la semaine 15, 5,0% (8/160) des plants ont présenté une pousse de 1^{ère} année de classe 3 ou 4 (figure 11c et 11d). De ces 8 plants, un seul a présenté une pousse de 2^e année de classe 3 alors que les sept autres ont tous présenté une pousse de 2^e année de classe 1.

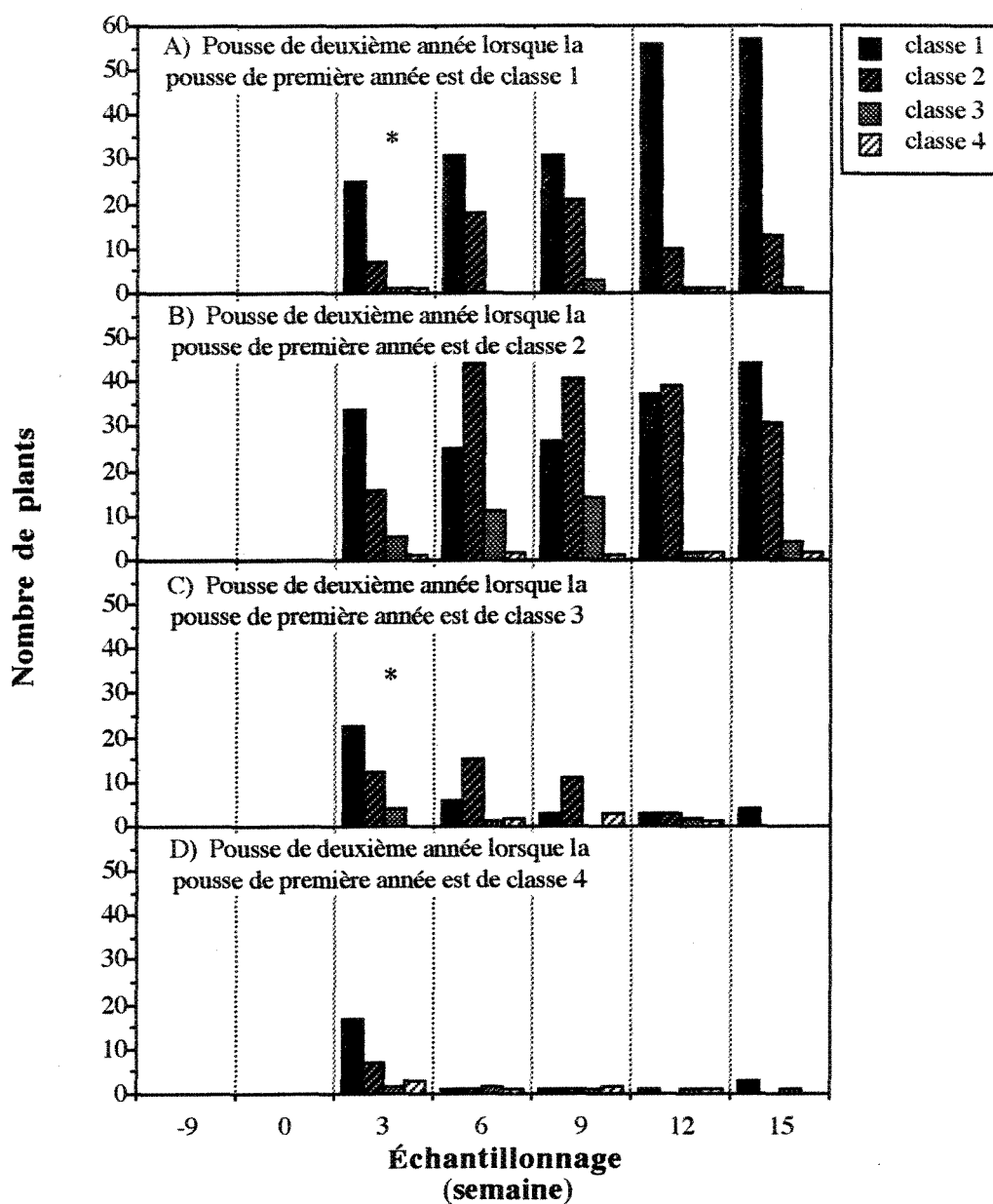


Figure 11: Évolution de la fréquence de gauchissement des pousses de deuxième année en fonction de la fréquence de gauchissement des pousses de première année prise à chaque date d'échantillonnage lors de la période de croissance en environnement contrôlé. La sélection initiale des plants n'est pas prise en considération. N = 40 plants par classe de gauchissement sélectionnée et par date d'échantillonnage, sauf pour celles marquées d'un * où N = 39. La sélection des plants s'est faite neuf semaines avant (-9) l'expérience en environnement contrôlé.

3,2 EXPÉRIENCE 2: PLANTATION

3,2,1 CROISSANCE DES PLANTS

Les plants du site organique ont présenté des résultats plus élevés que ceux du site sablonneux pour tous les paramètres de croissance mesurés sur place sur les plants reboisés en 1986 en Abitibi (tableau XI). Aucune différence significative n'a été observée entre les provenances 1 et 4 du site sablonneux pour les divers paramètres (analyse statistique non présentée). Seul le rapport H/D du site organique n'a pas montré de différence significative entre les provenances 1 et 4 (analyse statistique non présentée). Les paramètres de longueur totale de la tige et du diamètre de l'hypocotyle de la provenance 1 sont significativement supérieurs à ceux de la provenance 4 (analyse statistique non présentée).

Des différences significatives ont été observées entre les plants occupant les deux sites pour les paramètres de biomasse sèche caulinare et racinaire, du nombre de racines de 1^{er} ordre ≥ 2 mm, de longueur de la tige, du diamètre de l'hypocotyle et du rapport $BSR \geq 2$ mm/ $BSR < 2$ mm (analyse statistique non présentée). Les rapports BSC/BSR et H/D ont été les mêmes pour les deux sites. En aucun cas à l'intérieur d'un site il n'y a eu des différences significatives entre les plants des différentes classes de gauchissement pour les différents paramètres de croissance analysés (tableau XII). Les plants du site organique ont généralement présenté le double des valeurs de croissance de ceux du site sablonneux.

Les mesures de longueur de la tige, du diamètre de l'hypocotyle et du rapport H/D des plants qui ont été extraits (tableau XII) n'ont pas montré de différence significative avec celles prises sur les plants non extraits de même provenance (tableau XI) (analyse statistique non

Tableau XI: Comparaison de moyenne des paramètres de croissance des plants mesurés en 1991 en fonction de leur classe de gauchissement initiale prise en 1986

	Classe $\leq 15^\circ$	Classe $> 15^\circ$ à $\leq 90^\circ$	Classe $> 90^\circ$
Site sablonneux - Provenance 1			
Longueur totale de la tige (mm)	437,3 \pm 111,5 a	375,5 \pm 94,0 b	324,8 \pm 86,9 c
Diamètre de l'hypocotyle (mm)	8,96 \pm 2,57a	8,21 \pm 2,30a	6,90 \pm 2,04b
H/D ((mm mm ⁻¹) + 10)	5,03 \pm 0,96a	4,69 \pm 0,99a	4,85 \pm 1,14a
Site sablonneux - Provenance 4			
Longueur totale de la tige (mm)	397,7 \pm 72,7 a	422,8 \pm 110,1 a	315,7 \pm 95,8 b
Diamètre de l'hypocotyle (mm)	8,28 \pm 2,00a	8,34 \pm 2,72a	7,98 \pm 4,43a
H/D ((mm mm ⁻¹) + 10)	4,92 \pm 0,79a	5,28 \pm 1,10a	4,33 \pm 1,07b
Site organique - Provenance 1			
Longueur totale de la tige (mm)	732,9 \pm 192,9 a	717,2 \pm 129,8 a	731,0 \pm 185,3 a
Diamètre de l'hypocotyle (mm)	13,34 \pm 4,02a	13,31 \pm 3,75a	14,16 \pm 4,63a
H/D ((mm mm ⁻¹) + 10)	5,60 \pm 0,81a	5,60 \pm 0,96a	5,36 \pm 1,01a
Site organique - Provenance 4			
Longueur totale de la tige (mm)	658,8 \pm 137,0 a	637,7 \pm 172,6 a	701,8 \pm 127,4 a
Diamètre de l'hypocotyle (mm)	11,15 \pm 2,91a	11,76 \pm 3,45ab	13,10 \pm 2,88b
H/D ((mm mm ⁻¹) + 10)	6,02 \pm 0,95a	5,54 \pm 0,96b	5,45 \pm 0,79b

Note: Chaque valeur correspond à la moyenne \pm écart-type de 32 plants. Les valeurs d'une même rangée suivies d'une même lettre ne sont pas significativement différentes ($p < 0,05$).

Tableau XII: Comparaison de moyenne des paramètres de croissance des plants de provenance 1 extraits en 1991 en fonction de leur classe de gauchissement initiale prise en 1986

	Classe $\leq 15^\circ$		Classe $>15^\circ$ à $\leq 90^\circ$		Classe $> 90^\circ$	
Site sablonneux						
Biomasse sèche caulinare (g)	42,33	$\pm 41,28a$	38,42	$\pm 33,14a$	26,52	$\pm 26,16a$
Biomasse sèche racinaire (g)	8,11	$\pm 8,70a$	5,81	$\pm 4,88a$	4,38	$\pm 4,35a$
BSC/BSR	5,34	$\pm 0,86a$	6,50	$\pm 1,49a$	6,04	$\pm 0,64a$
BSR ≥ 2 mm (g)	7,42	$\pm 8,66a$	5,11	$\pm 4,77a$	3,42	$\pm 3,72a$
BSR < 2 mm (g)	0,69	$\pm 0,22a$	0,70	$\pm 0,38a$	0,95	$\pm 0,68a$
BSR ≥ 2 mm/BSR < 2 mm	10,89	$\pm 10,91a$	9,22	$\pm 10,30a$	2,98	$\pm 2,25a$
Nb de racine 1 ^{er} ordre ≥ 2 mm	6,00	$\pm 1,31a$	5,38	$\pm 1,69a$	5,50	$\pm 3,74a$
Longueur totale de la tige (mm)	421,3	$\pm 187,3 a$	394,4	$\pm 115,0 a$	331,4	$\pm 88,5 a$
Diamètre de l'hypocotyle (mm)	8,88	$\pm 3,46a$	8,52	$\pm 3,16a$	7,43	$\pm 2,76a$
H/D ((mm mm ⁻¹) + 10)	4,81	$\pm 1,02a$	4,79	$\pm 0,79a$	4,60	$\pm 0,65a$
Site organique						
Biomasse sèche caulinare (g)	119,33	$\pm 81,19a$	79,96	$\pm 34,36a$	117,40	$\pm 59,27a$
Biomasse sèche racinaire (g)	20,59	$\pm 14,44a$	12,36	$\pm 6,00a$	18,57	$\pm 9,13a$
BSC/BSR	5,90	$\pm 1,02a$	6,84	$\pm 1,50a$	6,44	$\pm 0,78a$
BSR ≥ 2 mm (g)	19,47	$\pm 14,29a$	11,53	$\pm 5,60a$	17,03	$\pm 8,42a$
BSR < 2 mm (g)	1,12	$\pm 0,26a$	0,84	$\pm 0,45a$	1,54	$\pm 1,05a$
BSR ≥ 2 mm/BSR < 2 mm	16,43	$\pm 11,26a$	14,57	$\pm 3,79a$	13,72	$\pm 9,06a$
Nb de racine 1 ^{er} ordre ≥ 2 mm	8,80	$\pm 4,21a$	8,50	$\pm 1,73a$	13,40	$\pm 3,36a$
Longueur totale de la tige (mm)	826,0	$\pm 235,3 a$	683,8	$\pm 56,2 a$	711,0	$\pm 178,5 a$
Diamètre de l'hypocotyle (mm)	14,54	$\pm 4,63a$	13,60	$\pm 2,00a$	16,42	$\pm 4,30a$
H/D ((mm mm ⁻¹) + 10)	5,78	$\pm 0,69a$	5,07	$\pm 0,44a$	4,46	$\pm 1,02a$

Note: Chaque valeur correspond à la moyenne \pm écart-type de 8 plants pour le site sablonneux. Pour le site organique, chaque valeur correspond à la moyenne \pm écart-type de 5, 4 et 5 plants pour la classe $\leq 15^\circ$, la classe $>15^\circ$ à $\leq 90^\circ$ et la classe $> 90^\circ$ respectivement. Les valeurs d'une même rangée suivies d'une même lettre ne sont pas significativement différentes ($p < 0,05$).

présentée). Par conséquent, les résultats de biomasses sèches obtenus à partir des plants extraits peuvent être considérés comme représentatifs des plants non extraits.

3,2,2 GAUCHISSEMENT

Quelle que soit la classification des plants en 1986, on retrouve en 1991 un plus fort pourcentage de plants ayant une pousse de 1^{ère} année de classe 1, à l'exception des plants du site sablonneux classifiés $> 90^\circ$ en 1986 (figure 12). Les plants du site organique ont présenté davantage de plants de classe 1 en 1991 que ceux du site sablonneux, indépendamment de leur classification initiale. Un plus grand nombre de plants du site sablonneux ont été classés 3 en 1991 par rapport à ceux du site organique. De plus, tous les plants classés $> 90^\circ$ dans les deux sites en 1986 se sont redressés, puisqu'aucune pousse de 1^{ère} année ne fait maintenant partie de la classe 4.

Quelle que soit la classification initiale du plant, les pousses de 6^e année se retrouvent surtout dans la classe 1 (figure 13). Le nombre de pousses de 6^e année de classe 1 a également été plus élevé dans le site sablonneux (93,5% (174/186)) que dans le site organique (68,2% (131/192)). Six pousses de 6^e année étaient manquantes dans le site sablonneux lors des mesures (apex mort ou brouté par les lièvres). Seuls les plants ayant eu une classification de classe $> 90^\circ$ en 1986 ont donné, en 1991, un plant avec une pousse de 6^e année classée 4, et ce dans les deux sites.

Les provenances 1 et 4 du site sablonneux se sont révélées être significativement différentes ($p = 0,0137$) pour la fréquence de gauchissement prise sur l'ensemble des pousses annuelles (figure 14). La majorité des plants ont présenté en 1991 une classification

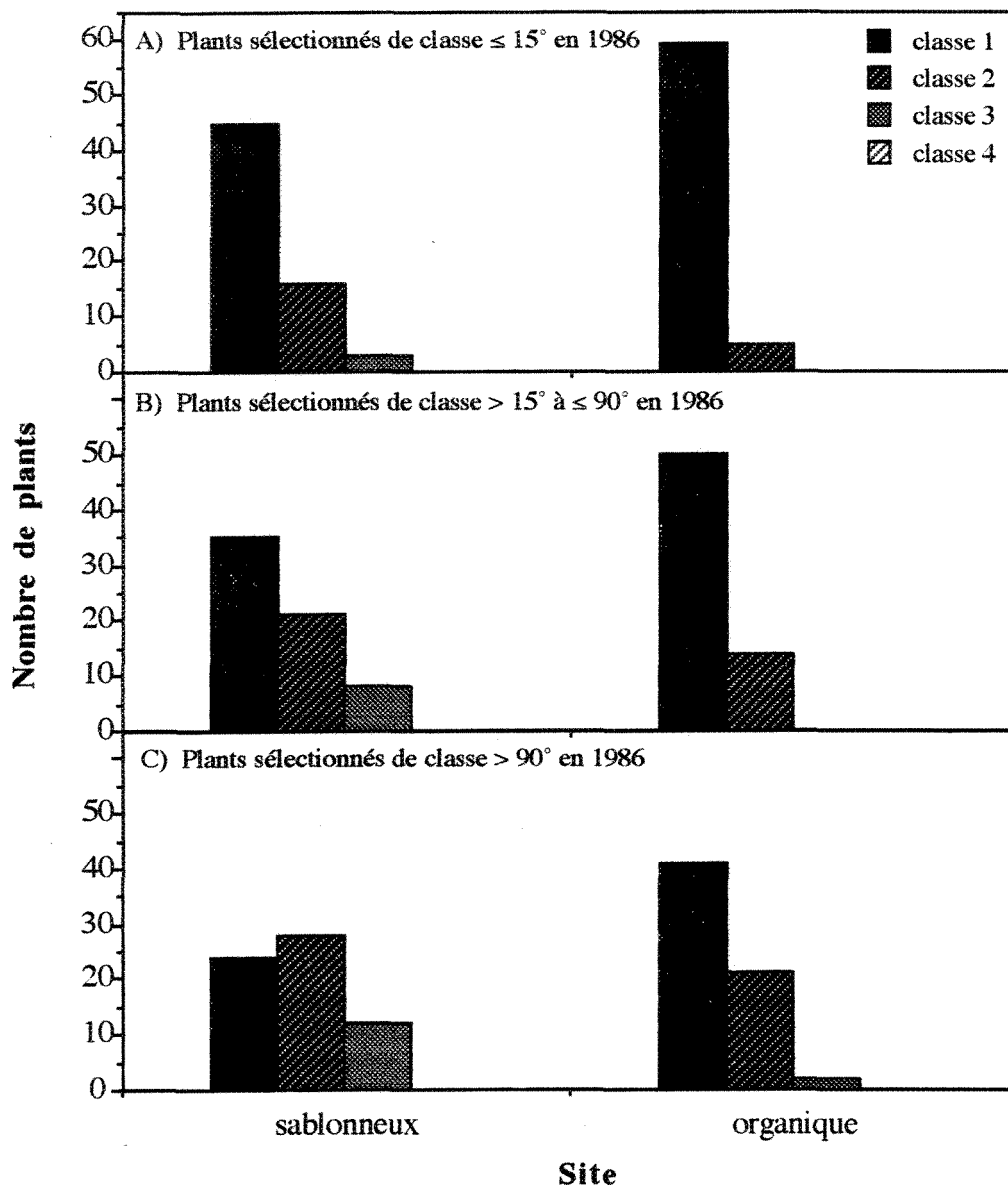


Figure 12: Fréquence de gauchissement en 1991 des pousses de première année en fonction de la classe de gauchissement initiale prise en 1986. Aucune colonne de classe 4 n'apparaît sur la figure car aucune pousse de première année n'a présenté de classe 4 en 1991. $N = 64$ plants par classe de gauchissement sélectionnée en 1986 et par site.

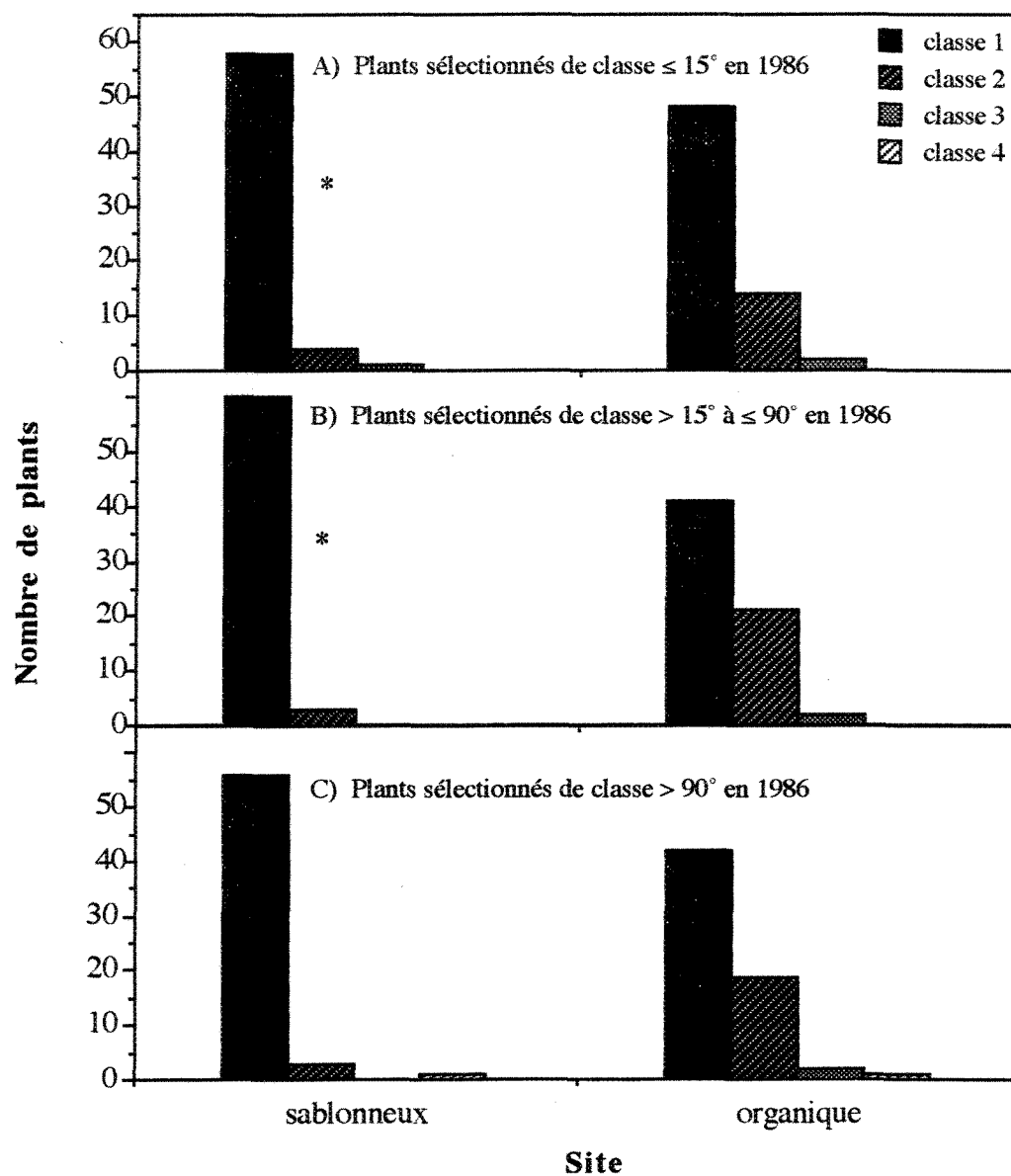


Figure 13: Fréquence de gauchissement en 1991 des pousses de sixième année en fonction de la classe de gauchissement initiale des pousses de première année prise en 1986. $N = 64$ plants par classe de gauchissement sélectionnée en 1986 et par site, sauf pour celles du site sablonneux marqués d'un * où $N = 63$.

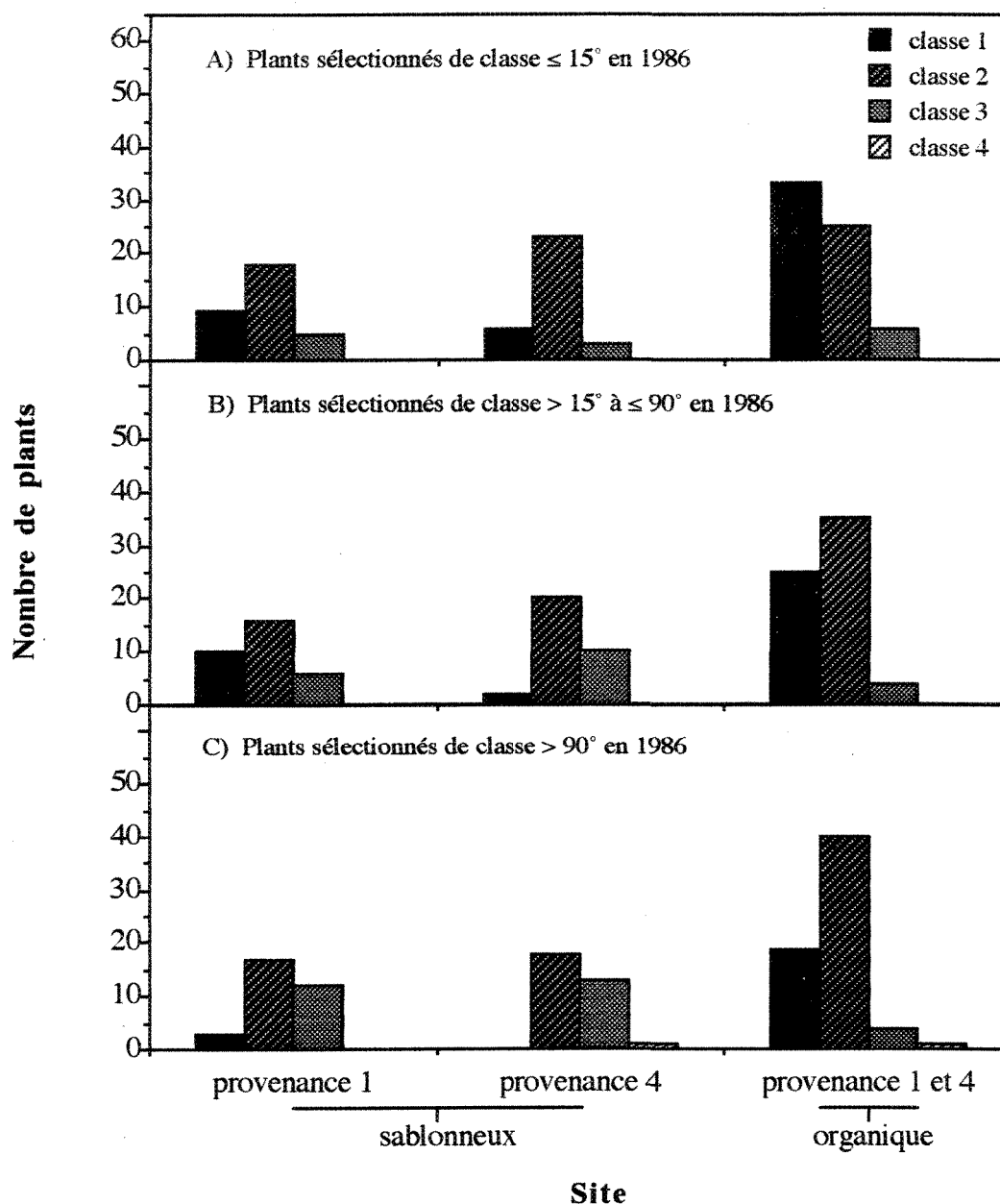


Figure 14: Fréquence de gauchissement en 1991 de l'ensemble des pousses annuelles du plant en fonction de la classe de gauchissement initiale des pousses de première année prise en 1986. Seule la classe de gauchissement la plus élevée parmi les six années de croissance de la tige a servi de mesure pour bâtir la figure. $N = 32$ plants par classe de gauchissement, par provenance et par site. Les provenances 1 et 4 du site sablonneux sont significativement différentes ($p < 0,05$) et n'ont pas été regroupées.

de 2, indépendamment du site, de la provenance ou de la classification initiale, à l'exception des plants de classe $\leq 15^\circ$ en 1986 du site organique où la classe 1 a été majoritaire. Un gauchissement de classe 4 a été noté chez un plant du site sablonneux de provenance 4 et chez un plant du site organique de provenance 4. Ils possédaient une pousse de 1^{ère} année de classe $> 90^\circ$ en 1986. La pousse de 6^e année était responsable de cette classification (figure 13), les autres pousses ne montrant pas de courbures aussi sévères.

3,2,3 FORME RACINAIRE

La classe de gauchissement initiale n'a pas influencé significativement la forme racinaire des plants dans aucun des sites, puisque les plants du site sablonneux ont présenté une valeur de probabilité $p = 0,1104$, alors que celle des plants du site organique était de $p = 0,1835$. Par contre, l'indice racinaire a été significativement différent entre les deux sites ($p = 0,0320$).

La figure 15 présente les résultats de la caractérisation du système racinaire des plants extraits de provenance 1 en fonction du site de reboisement. La presque totalité des plants du site sablonneux, soit 95,8% (23/24), n'a pas présenté une des formes verticillées comparativement à 64,3% (9/14) des plants du site organique. Sans tenir compte de la présence de verticille, la proportion de plants ayant présenté une racine pivotante courte ou absente a été de 75,0% (18/24) et de 85,7% (12/14) chez les plants des sites sablonneux et organique.

Le système racinaire qui s'était développé dans les récipients en 1986 était encore facilement reconnaissable en 1991 chez les plants du site sablonneux. Par contre, chez les

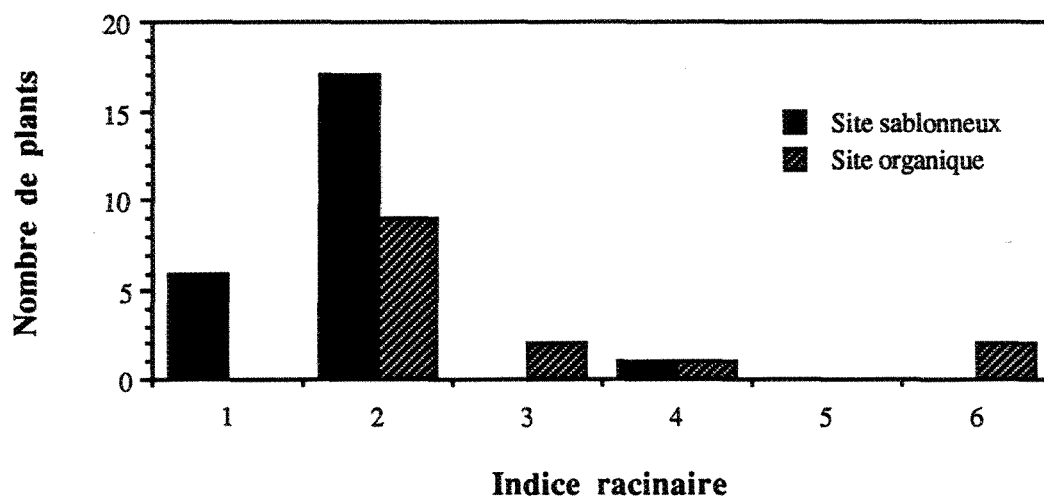


Figure 15: Caractérisation du système racinaire des plants de provenance 1, cinq ans après plantation (site sablonneux n = 24; site organique n = 14). L'indice racinaire correspond à: 1 = racine pivotante longue (RPL); 2 = racine pivotante courte (RPC); 3 = un seul verticille de racine + RPL; 4 = un seul verticille de racine + RPC; 5 = un système racinaire multi-verticillé + RPL; 6 = un système racinaire multi-verticillé + RPC.

plants du site organique, l'ajout de nouvelles racines latérales rendait plus ou moins méconnaissable le système racinaire original. Chez ces derniers, les nouvelles racines se sont principalement développées près de la surface. De plus, certaines de ces racines ont pu être identifiées comme étant adventives, i.e. qu'elles prennent assises au niveau de l'hypocotyle ou de la tige.

Le nombre de racines de 1^{er} ordre ≥ 2 mm et le rapport $BSR \geq 2$ mm/ $BSR < 2$ mm ont été significativement différents entre les deux sites et non entre les classes de gauchissement initiales (tableau XII). Les plants du site organique ont présenté en moyenne un peu plus de racine de 1^{er} ordre ≥ 2 mm que ceux du site sablonneux. Chez les plants du site sablonneux, les racines ayant un diamètre ≥ 2 mm comptaient pour 91,5%, 87,9% et 78,2% de la biomasse sèche racinaire totale des plants de classe $\leq 15^\circ$, de classe $> 15^\circ$ à $\leq 90^\circ$, et de classe $> 90^\circ$ respectivement. Chez les plants du site organique cette proportion était de 94,5%, de 93,2% et de 91,7%.

CHAPITRE IV

DISCUSSION

4,1 POTENTIEL DE CROISSANCE

L'ensemble des résultats obtenus en environnement contrôlé et sur le terrain indiquent que le potentiel de croissance racinaire et caulinaire ne varient pas entre les plants des différentes classes de gauchissement. En fait, dans l'expérience en plantation, les différences entre les plants s'expliquaient davantage par les différences entre les sites que par la classe de gauchissement initiale.

La capacité de croissance racinaire (CCR) est considérée comme un important paramètre physiologique de la qualité des plants (Glerum, 1990). Chez les plants nouvellement reboisés, le stress hydrique est la principale cause de mortalité ou de retard de croissance (Örlander *et al.*, 1989; Burdett, 1990). La survie des plants reboisés est alors dépendante de la croissance rapide de nouvelles racines après le reboisement (Glerum, 1990; Troeng, 1991).

Sutton (1990) mentionne que les résultats d'un test de CCR sont influencés par les caractéristiques de l'échantillon de plant au début du test, l'environnement dans lequel le test est effectué, la durée du test, et les critères utilisés pour quantifier la capacité de croissance racinaire. Les biomasses sèches plus faibles des plants des classes 3 et 4 observées au début

de l'expérience en environnement contrôlé n'ont pas influencé la capacité de croissance racinaire et la survie de ces plants par rapport à celles des classes 1 et 2. Même si le test de CCR en hydroponique et en environnement contrôlé a donné un résultat significativement plus élevé que celui effectué en serre, et ce probablement parce que le test a duré trois jours de plus dans un meilleur environnement, les résultats indiquent que les plants des différentes classes de gauchissement possèdent un même potentiel de croissance racinaire. De plus, ce potentiel est élevé dans chacune des quatre classes de gauchissement initiales; l'indice moyen a toujours été plus grand que 5,0 sur 7,0 aux jours 21 et 24 du test de CCR en serre et en environnement contrôlé.

L'évaluation du nombre de racines de 1^{er} ordre ≥ 1 mm de diamètre n'a pas permis de différencier le système racinaire des plants des différentes classes de gauchissement, ni même d'indiquer quelle serait la classe de plant la plus apte à développer un système racinaire adéquat. Les principales racines des plants se sont développées davantage dans le tiers supérieur du système racinaire. Le système hydroponique en est probablement la cause. Le tiers supérieur des systèmes racinaires était généralement immergé dans la solution nutritive pendant un laps de temps très court, voire jamais. L'air humide aurait permis la forte croissance racinaire dans cette zone. Il est vrai que le système racinaire de l'épinette noire se développe en surface (Lyr et Hoffmann, 1967; Strong et La Roi, 1983; Sims *et al.*, 1990) mais il est également vrai que ses racines peuvent croître, selon le type de substrat, à partir du tiers central et inférieur de la carotte (Bossé, 1989).

La classe de gauchissement initiale des plants n'a pas influencé significativement, à l'intérieur d'un même site sur le terrain, le rapport $BSR \geq 2$ mm/ $BSR < 2$ mm. Par contre, les plants du site sablonneux ont développé un peu plus de radicelles, soit un rapport $BSR \geq$

2 mm/BSR < 2 mm plus faible, comparativement à ceux du site organique (tableau XII). La qualité du substrat semble influencer davantage la croissance des racines que le gauchissement. Les résultats obtenus sont en accord avec ceux de Olsthoorn (1991). Celui-ci a démontré qu'un site de pauvre qualité favoriserait la croissance d'une plus grande quantité de radicelles.

Cinq ans après plantation, seuls les plants du site organique ont développé un nouveau système racinaire. Encore une fois, le facteur site revêt davantage d'importance que la classe de gauchissement initiale. Les épinettes noires que McClain (1982) a photographié dix ans après plantation avaient également développé un nouveau système racinaire. Celui-ci se retrouvait majoritairement sur la tige (racines adventives), alors que le système racinaire original restait peu développé ou vestigial. McClain (1982) mentionne que les sites étudiés étaient bien drainés et possédaient un potentiel élevé de productivité. Dans une expérience réalisée six ans après plantation, Carlson *et al.* (1980) ont trouvé que 30 à 35% des systèmes racinaires des épinettes de Sitka (*Picea sitchensis* (Bong.) Carr.) développaient une racine pivotante verticale. Les autres plants possédaient un système racinaire ayant une racine pivotante courbée ou absente. Ils expliquent la variation dans la configuration du système racinaire par l'effet de l'environnement sur les plants après le reboisement. Dans l'expérience réalisée en Abitibi, les plants du site sablonneux ont développé davantage de racines pivotantes longues (25%) que ceux du site organique (14%), lequel était mal drainé. Selon Wagg (1967), une nappe phréatique élevée favorise la formation de système racinaire verticillé et sans racine pivotante. La présence d'un nouveau système racinaire sans racine pivotante dans le site organique s'expliquerait donc par les conditions environnementales du site, soit une nappe phréatique plus élevée et une plus forte productivité que le site sablonneux, et non par la classe de gauchissement initiale des plants.

Selon les coefficients de variation présentés au tableau IV, la variabilité des plants à l'intérieur d'une même classe de gauchissement était importante. On pourrait croire à première vue qu'il s'agit d'un nombre insuffisant de plants échantillonnés. En fait, la variation est probablement liée à l'espèce elle-même. Sutton (1987) a d'ailleurs obtenu, pour des mesures similaires de longueur de la tige et de diamètre, des coefficients de variation 10% plus élevés que ceux mentionnés dans cette étude, et ce pour un nombre de plants d'épinette noire échantillonnés égal à 30 et à 60.

La biomasse sèche est considérée comme l'un des meilleurs paramètres pour juger de la performance des jeunes plantations d'épinette noire et de pin gris (*Pinus banksiana* Lamb.) (Morris *et al.*, 1990). Les différences de biomasse sèche caulinare et racinaire présentes au début de l'expérience en environnement contrôlé pourraient justifier à première vue le rejet des plants ayant un gauchissement de plus de 45° lors de l'évaluation de ceux-ci. Or, après 15 semaines de croissance en environnement contrôlé dans des conditions optimales, aucune différence significative n'a été observée entre les plants. Même si les plants très fortement gauchis (> 90°) ont développé significativement moins de racines par rapport à la totalité du plant (rapport BSC/BSR), cela ne les a pas empêchés de bien performer selon les autres critères de croissance mesurés dans cette expérience.

Dans la seconde expérience, aucun résultat concernant les biomasses sèches des plants avant la plantation n'est disponible. Il est donc impossible de faire le parallèle entre les deux expériences, à savoir que les différences significatives à propos des biomasses sèches s'estompent également avec le temps en plantation. Cependant, l'absence de différences significatives entre les biomasses sèches caulinaires et racinaires des plants des différentes classes initiales de gauchissement lors de l'échantillonnage effectué six ans après plantation

démontre bien que le facteur gauchissement de la pousse de 1^{ère} année avant plantation n'est pas un critère permettant de prévoir la croissance ultérieure des plants.

Le facteur site a eu beaucoup plus d'influence sur les biomasses sèches des plants de six ans que le facteur gauchissement initial de la pousse de 1^{ère} année. Les biomasses sèches caulinaires et racinaires des plants du site organique étaient supérieures à celles du site sablonneux. Toutefois, on note que le développement racinaire par rapport au plant total, soit le rapport BSC/BSR, était identique dans les deux sites à l'étude. Munson et Timmer (1990) ont également obtenu des rapports BSC/BSR similaires entre différents sites chez des plants d'épinette noire, après un et deux ans de croissance sur le terrain. Dans cette expérience, le rapport BSC/BSR s'est aussi avéré plus fortement lié au patron de développement du plant qu'à la productivité d'un site donné, et *a fortiori* qu'à la classe de gauchissement initiale de la pousse de 1^{ère} année.

Des résultats préliminaires obtenus par l'équipe de recherche de l'UQAC ont démontré que les plants très fortement gauchis ($> 90^\circ$) présentaient un système racinaire moins développé et ce, tant au niveau de la biomasse que du volume (Allaire, communication personnelle). On peut supposer, à partir de ces résultats, que les plants très fortement gauchis ne peuvent réaliser pleinement le transport des éléments nutritifs de la tige vers les racines à cause de la forte courbure dans la tige. Ce problème, s'il est réel, s'estompe avec le temps. En effet, le redressement de la pousse de 1^{ère} année fait en sorte que la courbure devient $< 90^\circ$ (figure 12). Ce qui, hypothétiquement, rétablit le transport des nutriments, car les plants des diverses classes de gauchissement ne sont pas significativement différents les uns des autres en termes des biomasses sèches caulinaires et racinaires et du rapport BSC/BSR après cinq ans sur le terrain.

En environnement contrôlé et sur le terrain, la variabilité de la longueur de la tige à l'intérieur des différents échantillons d'une même classe de gauchissement et entre les différentes classes de gauchissement a été plus importante que celle retrouvée dans les biomasses sèches et les rapports BSC/BSR et H/D. Ce genre de résultat est en accord avec les travaux de Morris *et al.* (1990) et Munson et Timmer (1989) où la biomasse sèche et le rapport H/D sont des mesures beaucoup plus fiable que la hauteur totale de la tige pour quantifier la réponse des plants aux conditions du site.

La longueur totale de la tige des plants en environnement contrôlé était presque équivalente à celle des plants du site sablonneux. Les biomasses sèches de la tige n'étaient toutefois pas comparables. Les rapports H/D des plants en environnement contrôlé étaient très élevés comparativement à ceux en plantation. Il faut dire que la forte densité à l'intérieur des chambres à environnement contrôlé favorisait la croissance en longueur. Boyer et South (1984) ont montré que les plants de pin loblolly (*Pinus taeda* L.) cultivés en récipients et en serre sont morphologiquement différents de ceux cultivés en récipients à l'extérieur. Les plants cultivés à l'intérieur avaient tendance à être plus grands et plus minces.

Après un suivi de quatre ans de ces plants, Béland et Lapierre (1992) en sont venus à la conclusion que le gauchissement avait une influence minime sur la croissance en hauteur et en diamètre. Les plants de six ans du site organique ont toutefois présenté des valeurs supérieures à ceux du site sablonneux en ce qui a trait à la longueur totale de la tige, au diamètre de l'hypocotyle et au nombre de racines de 1^{er} ordre ≥ 2 mm de diamètre. Les plants du site sablonneux étaient plus robustes d'après les rapports H/D.

L'augmentation plus rapide du diamètre par rapport à la longueur de la tige observée dans les trois premières semaines de croissance en environnement contrôlé a amené la diminution du rapport H/D des plants des différentes classes de gauchissement. Ce phénomène s'expliquerait par une croissance ou une initiation de la croissance en diamètre plus rapide que la croissance en hauteur de la tige. Selon Arnup *et al.* (1988 dans Sims *et al.*, 1990), la croissance radiale commence sur le terrain deux semaines avant la croissance en hauteur. Le développement des plants en environnement contrôlé ne devrait pas être différent de celui sur le terrain. La baisse du rapport H/D entre la 12^e et la 15^e semaine est bien sûr associée au traitement de mise en dormance.

À partir de l'analyse des paramètres de croissance utilisés, il est possible de conclure que les plants des différentes classes initiales de gauchissement ne montrent pas ou peu de différence entre eux. Les différences existantes s'expliquent par les différences entre les sites; les conditions environnementales jouent donc un très grand rôle sur le développement des plants mais pas sur le patron de développement des plants d'épinette noire, celui-ci restant toujours le même. En somme, les plants ont poussé et se sont développés selon la capacité du site où ils ont été reboisés quel que soit leur classe de gauchissement au point de départ.

4,2 POTENTIEL DE REDRESSEMENT

Les résultats obtenus en environnement contrôlé et sur le terrain indiquent que les pousses lignifiées des plants continuent de bouger autour de l'axe vertical, la résultante étant le plus souvent un redressement de la pousse plutôt qu'une verse plus prononcée. L'expérience en environnement contrôlé montre que les plants des classes 3 et 4 améliorent

leur angle de gauchissement initial plus rapidement que ceux de la classe 2. Une plus longue période de croissance en environnement contrôlé aurait possiblement permis de connaître la proportion de plants gauchis des classes 3 et 4 pouvant atteindre la classe 1. Les résultats sur le terrain indiquent que les plants ayant eu un gauchissement $> 90^\circ$ atteignent autant la classe 1 que ceux ayant eu un angle $> 15^\circ$ à $\leq 90^\circ$. De plus, la classe de gauchissement initiale des plants n'influence pas le gauchissement de la pousse de 2^e année exprimé en environnement contrôlé, ni celui de la pousse de 6^e année exprimé en plantation sur les deux sites à l'étude. La qualité du site est un critère plus important que la classe de gauchissement initiale ou la provenance du plant pour obtenir des plants de qualité en terme de gauchissement.

L'angle de gauchissement de la pousse de 1^{ère} année s'est amélioré pour la majorité des plants en environnement contrôlé et sur le terrain. Les plants dont la pousse de 1^{ère} année a été sélectionnée $> 15^\circ$ ont montré un meilleur taux de redressement sur le terrain que ceux en environnement contrôlé. Ceci peut s'expliquer par une plus longue période de temps entre les mesures initiale et finale, laissant ainsi plus de temps aux plants pour se redresser. Les plants de six ans des deux sites à l'étude ayant été sélectionnés $\leq 15^\circ$ n'ont pas tous garder leur pousse droite contrairement à ceux d'un an cultivés en environnement contrôlé. Les différences qui existent entre les deux expériences quant au nombre de plant s'étant redressé ou gauchi s'explique surtout par un environnement totalement différent. Selon Chavasse (1980), Sutton (1987) et Burdett (1990), la performance d'une plantation établie est principalement fonction de facteurs génétiques, d'interactions entre les plantes et des conditions du site. Le moment où la prise de mesure du gauchissement servant à la sélection a été effectuée est également important. Les mesures de sélection des plants utilisés en Abitibi ont été faites avant la période de mise en dormance. Il est fort probable qu'une partie des plants sélectionnée n'avait plus la même classe de gauchissement lors de la mise en terre, tout

comme cela a été observée à la semaine 1, après la période de sélection, pour l'expérience en environnement contrôlé (figure 9). La proportion de plants ayant changé de classe après la sélection est fort probablement plus élevée pour les plants de l'Abitibi car la pousse n'était pas lignifiée contrairement à ceux de l'expérience en environnement contrôlé. Campagna et Margolis (1989) mentionnent que le gauchissement survient lorsqu'il y a croissance rapide de la pousse de 1^{ère} année et insuffisance de lignification, la pousse tombant alors sous son propre poids.

Sans tenir compte du mouvement de la pousse de 1^{ère} année, les plants des différentes classes de gauchissement produisent, à un moment ou l'autre de la période de croissance, une pousse de 2^e année ayant une classe de 1 à 4. Le gauchissement n'est donc pas restreint à une certaine catégorie de plants. Les plants ayant eu une pousse de 1^{ère} année de classe 1 ont donné un pourcentage de gauchissement (angle $> 15^\circ$) de 25% chez la pousse de 2^e année en environnement contrôlé, de 7% et de 25% chez la pousse de 6^e année sur des sites sablonneux et organique, soit l'équivalent d'une production en serre ou en tunnel lors de la première année (Margolis *et al.*, 1988; Lord *et al.*, 1990). Il semble difficile de prévoir, au point de vue gauchissement, quelle sera la qualité future des plants reboisés, puisque les pousses annuelles de ces derniers conservent leur susceptibilité au phénomène du gauchissement.

Le fait que l'expression du gauchissement ne soit pas restreinte d'une année à l'autre à une classe de plant en particulier suggère que le gauchissement n'est pas d'origine génétique au plan individuel. Par contre, si l'on ne tient compte que du gauchissement d'une pousse en particulier tout en faisant abstraction du gauchissement des pousses précédentes, les

pourcentages de plants gauchis observés varient toujours de 5 à 25% d'une expérience à l'autre et peuvent suggérer la présence d'une expression génétique au plan de l'espèce.

À notre avis, le gauchissement n'est pas un phénomène génétique car la courbure de la tige est un phénomène dont l'ampleur dépend en bonne partie d'actions environnementales lors du développement de la tige. Les pourcentages de plants gauchis similaires qui ont été observés seraient tout simplement aléatoires. Des travaux antérieurs ont d'ailleurs montré que le taux de gauchissement pouvait être augmenté ou diminué par divers facteurs environnementaux (Lord *et al.*, 1990, 1991).

L'expression de la forme de croissance de la pousse de 2^e année ne semble pas reliée à celle de 1^{ère} année. Par contre, la pousse de 2^e année est influencée par les mouvements de la pousse de 1^{ère} année, lesquels se poursuivent en 2^e année, même après lignification. Et justement parce que la pousse de 1^{ère} année n'est pas statique, le nombre de pousses de 2^e année fortement gauchies ($> 45^\circ$) augmente avec le temps, le mouvement de correction de la pousse de 1^{ère} année amplifiant le mouvement de la pousse de 2^e année (figure 10). Chez la pousse de 1^{ère} année, les mouvements semblent être plus prononcés entre la 3^e et la 6^e semaine de croissance en environnement contrôlé, alors que la pousse de 2^e année semble se corriger à partir de la 9^e semaine, soit lorsque la pousse de 1^{ère} année s'est redressée.

La durée de l'expérience en environnement contrôlé n'a pas permis de connaître la proportion de plants des classes 3 et 4 qui auraient éventuellement pu atteindre la classe 1. Les résultats obtenus sur le terrain indiquent cependant que les plants ayant présenté un gauchissement $> 90^\circ$ ont autant atteint la classe 1 que ceux ayant présenté un angle initial $> 15^\circ$ à $\leq 90^\circ$. De plus, les plants des classes 3 et 4 ont amélioré leur angle de gauchissement

initial plus rapidement que ceux de la classe 2 (figure 9). Il est fréquent chez les plants de classe 2 que leur classification soit dû à une courbure dans la tige alors qu'ils possèdent une cime verticale. Dans ce cas-ci, la courbure risque d'être permanente, ne pouvant disparaître que par la croissance radiale du tronc. Les résultats d'expériences précédentes ont démontré que plus un plant est gauchit à un moment donné de sa croissance moins il montrera de capacité à se relever totalement (Lord *et al.*, 1990). Ces expériences de caractérisation se sont toutefois déroulées sous des conditions automnales, conditions difficiles de croissance et de développement pour les plants. De plus, les derniers résultats ont été mesurés avant même que les plants n'aient un an. Il est donc plausible de croire que les plants se seraient redressés par la suite, comme il est le cas pour les plants de six ans de ce présent travail.

En supposant la présence d'un signal hormonal ou d'autre nature qui donne l'information de l'angle de gauchissement de la tige, tout comme il en existe un dans les courbures phototropiques, et que ce signal soit directement proportionnel à l'angle de gauchissement de la tige, il est alors possible que la vitesse de redressement de la tige d'un plant soit proportionnelle à la force du signal. Ceci expliquerait le fait que les plants fortement gauchis se redressent plus rapidement que les autres. La croissance ultérieure de la tige, de par la masse qu'elle ajoute, pourrait expliquer que ce ne sont pas tous les plants qui se corrigent complètement. Par contre, les présents résultats ne supporte pas cette hypothèse. En effet, les plants initialement gauchis ($> 15^\circ$) et plantés dans le site organique ont présenté un meilleur taux de correction d'angle comparativement à ceux plantés dans le site sablonneux (figure 12) alors que leur biomasse caulinaires était la plus élevée (tableau XII). De plus, ce sont les plants droits ($\leq 15^\circ$) du site organique qui ont présenté le plus faible taux de déformation alors que leur biomasse caulinaires était la plus élevée. Les pousses de 1^{ère} année de l'expérience en environnement contrôlé n'ont pas montré non plus d'augmentation d'angle

suite à la croissance de la pousse de 2^e année (figure 11). À notre avis, ce sont les mouvements de correction de la pousse annuelle et des pousses précédentes qui pourraient expliquer que ce ne sont pas tous les plants qui se corrigent complètement.

Le site sablonneux a davantage favorisé la croissance de pousses annuelles droites que le site organique (figure 13). Une vitesse de croissance plus lente pourrait en être la cause. Langlois et Carrier en 1984 proposaient de réduire le gauchissement en réduisant le rythme de croissance du plant. Lord *et al.* (1990) ont montré que le taux de gauchissement n'est pas toujours lié à un rythme rapide de croissance, mais à des facteurs influençant la croissance des plantes en général. Par exemple, si l'on augmente le rythme de croissance par un ajout de CO₂ le taux de gauchissement augmente, alors qu'il diminue s'il s'agit de lumière artificielle. Le site organique, où la croissance en hauteur a été plus importante, a davantage favorisé le redressement de la pousse de 1^{ère} année que le site sablonneux (figure 12). La question qui se pose est: faut-il favoriser le redressement ou la croissance de pousses annuelles droites pour obtenir davantage de plants droits? À notre avis, si les conditions environnementales ont toujours été les mêmes pendant six ans pour les deux sites à l'étude, il faut favoriser le redressement. Car ce sont les plants du site organique qui ont présenté davantage de plant de classe 1 pour la mesure de gauchissement prise en 1991 sur l'ensemble du plant (figure 14). Par conséquent, l'effet du site sur la qualité de la tige, en terme de gauchissement, est très important.

CHAPITRE V

CONCLUSIONS

Les résultats obtenus dans les deux expériences confirment l'hypothèse que, mêmes lignifiés, les plants peuvent se redresser. Les résultats sur le terrain indiquent que les plants ayant présenté un gauchissement $> 90^\circ$ atteignent autant la classe 1 que ceux ayant montré un angle initial $> 15^\circ$ à $\leq 90^\circ$. La vitesse de redressement semble être plus rapide lorsque l'angle de gauchissement est plus grand. Une plus longue période de croissance en environnement contrôlé aurait probablement permis aux plants fortement gauchis de faire de même. Des conditions de croissance de meilleure qualité ont favorisé le redressement des plants gauchis. Le facteur site joue un rôle plus important sur la qualité des plants au point de vue gauchissement que le facteur provenance. De plus, quel que soit le gauchissement initial de la pousse de 1^{ère} année, celui-ci n'influence pas l'expression du gauchissement chez les pousses annuelles subséquentes.

Les potentiels de croissance des plants des différentes classes de gauchissement sont similaires entre eux et ce autant au niveau de la partie aérienne que de la partie souterraine. Les conditions environnementales des deux sites à l'étude n'ont pas modifié les potentiels de croissance des plants des différentes classes de gauchissement observés dans les quatre chambres à environnement contrôlé. La croissance des plants a été beaucoup plus affectée par les conditions environnementales des sites que par le gauchissement des plants. Le système racinaire s'est développé différemment selon le site et non selon les différentes

classes de gauchissement des plants ou selon la provenance. Notre hypothèse stipulant qu'un développement racinaire plus faible chez les plants très fortement gauchis ($> 90^\circ$) affecterait leur potentiel de croissance est donc infirmée.

Finalement, le gauchissement de la tige de l'épinette noire ne diminue pas significativement la performance des plants d'épinette noire en plantation. Les résultats de cette étude indiquent que la classification des plants à partir d'un angle de courbure de la tige lors de l'opération de triage n'est sûrement pas le critère le plus important pour estimer la croissance à long terme d'une population de plant. En fait, ils indiquent même que ce critère devrait être modifié en profondeur, sinon éliminé étant donné les coûts importants associés à son application.

CHAPITRE VI

RÉFÉRENCES

- Béland, M. et Lapierre, J. 1992. Influence du gauchissement de semis d'épinette noire (*Picea mariana* (Mill.) BSP) produits en serre sur leur performance en plantation. For. Chron. 68: 365-370.
- Bossé, R. 1989. Potentiel de développement de plants 1-0 de *Picea mariana* (Mill.) BSP après plantation dans des chambres à environnement contrôlé. Rapport d'initiation à la recherche. Département des sciences fondamentales. Université du Québec à Chicoutimi. 33 p.
- Boucher, J.-F. 1992. Évolution du système racinaire de semis d'épinette noire (*Picea mariana* (Mill.) BSP) cultivés en récipients. Rapport d'initiation à la recherche. Département des sciences fondamentales. Université du Québec à Chicoutimi. 35 p.
- Boyer, J. N. and South, D. B. 1984. A morphological comparison of greenhouse-grown loblolly pine seedlings with seedlings grown outdoors. Tree planter's notes summer: 15-18.
- Brouillette, J. G., Tétreault, J. P. et Lortie, J. 1987. Guide d'évaluation de la qualité des plants de reboisement produits en récipients. Gouvernement du Québec. Ministère de l'Énergie et des Ressources. Service de la régénération forestière. 43 p.
- Burdett, A. N. 1979. New methods for measuring root growth capacity: their value in assessing lodgepole pine stock quality. Can. J. For. Res. 9: 63-67.

- Burdett, A. N. 1990. Physiological processes in plantation establishment and the development of specifications for forest planting stock. *Can. J. For. Res.* 20: 415-427.
- Campagna, M. A. and Margolis, H. A. 1989. Influence of short-term atmospheric CO₂ enrichment on growth, allocation patterns, and biochemistry of black spruce seedlings at different stages of development. *Can. J. For. Res.* 19: 773-782.
- Carlson, W. C., Preisig, C. L. and Promnitz, L. C. 1980. Comparative root system morphologies of seeded-in-place, bareroot, and container-cultured plug Sitka spruce seedlings after outplanting. *Can. J. For. Res.* 10: 250-256.
- Chavasse, C. G. R. 1980. Planting stock quality: a review of factors affecting performance. *N. Z. Journal of forestry* 25: 144-171.
- Dancause, A. 1990. Seedling production in Québec. Paper read at the Northeastern State, Federal and Provincial Nurserymen's Conference, Montréal, Québec, July 24 to July 27. p. 7-18.
- Epstein, E. 1972. Mineral nutrition of plants: principles and perspectives. John Wiley and Sons inc., New-York. 412 p.
- Glerum, C. 1990. Stock production research in Canada: a historical perspective. *For. Chron.* 66: 103-111.
- Langlois, C.-G. et Carrier, C. 1984. La culture en récipients - croissance, conditions culturales et fertilisation. p. 36-64. Dans: Deuxième atelier de travail sur la culture des semis en récipients. Service canadien des forêts, Ministère de l'Énergie et des Ressources, Ordre des ingénieurs forestiers du Québec. 29-30 novembre 1984. Sainte-Foy, Québec.

- Lord, D. et Allaire, J. 1992a. Mouvements de la tige des semis d'épinette noire et le gauchissement. Recueil des résumés de communications. Annales de l'ACFAS, volume 60.
- Lord, D. et Allaire, J. 1992b. Utilisation de retardants de croissance dans la culture en récipients de semis d'épinette noire et de pin gris. Recueil des résumés de communications. Annales de l'ACFAS, volume 60.
- Lord, D., Allaire, J., Brousseau, H., Gagnon, D., Morissette, S. et Walsh, D. 1990. Le point sur le gauchissement. p. 93-113. Dans: Colloque: Troisième atelier québécois sur la culture des plants forestiers en récipients. Les 9 et 10 novembre 1988 à Chicoutimi. Gouvernement du Québec, Ministère de l'Énergie et des Ressources (forêts), Direction de la Recherche et du Développement, Service du Transfert de Technologie.
- Lord, D., Allaire, J., Gagnon, D., Walsh, D., Lamontagne, M., Morissette, S. *et al.* 1991. Compréhension et recherche de solutions au problème du gauchissement de la tige de l'épinette noire: rapport final. Projet RDC-661-067/86. Programme de recherche et développement coopératif (RDC). Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie. 92 p.
- Lyr, H. and Hoffmann, G. 1967. Growth rates and growth periodicity of tree roots. Int. Rev. For. Res. 2: 181-206.
- Margolis, H. A. and Lord, D. 1990. Deformation of the stem of containerized black spruce seedlings. Paper read at the Northeastern State, Federal and Provincial Nurserymen's Conference, Montréal, Québec, July 24 to July 27. p. 107-118.

- Margolis, H. A., Bégin, J., Beeson, R. and Bellefleur, P. 1988. The influence of metal halide and high-pressure sodium lamps during photoperiod extension on the allocation of carbon between lignin and cellulose in black spruce seedlings. *Can. J. For. Res.* 18: 962-964.
- Margolis, H. A., Delaney, S., Vézina, L.-P. and Bellefleur, P. 1991. The partitioning of ^{14}C between growth and differentiation within stem-deformed and healthy black spruce seedlings. *Can. J. Bot.* 69: 1225-1231.
- McClain, K. M. 1982. Growth, nutrition and root development of Ontario tubelings, plugs and 3+0 bare-root black spruce. p. 331-341. In: *Proceedings of the Canadian Containerized Tree Seedling Symposium*, sept 14-16, 1981, Toronto, Ontario.
- Morris, D. M., MacDonald, G. B. and McClain, K. M. 1990. Evaluation of morphological attributes as response variables to perennial competition for 4-year-old black spruce and jack pine seedlings. *Can. J. For. Res.* 20: 1696-1703.
- Munson, A. D. and Timmer, V. R. 1989. Site-specific growth and nutrition of planted *Picea mariana* in the Ontario Clay Belt. I. Early performance. *Can. J. For. Res.* 19: 162-170.
- Munson, A. D. and Timmer, V. R. 1990. Site-specific growth and nutrition of planted *Picea mariana* in the Ontario Clay Belt. III. Biomass and nutrient allocation. *Can. J. For. Res.* 20: 1165-1171.
- Olsthoorn, A. F. M. 1991. Fine root density and root biomass of two Douglas-fir stands on sandy soils in the Netherlands. 1. Root biomass in early summer. *Netherlands J. Agric. Sci.* 39: 49-60.
- Örlander, G., Egnell, G. and Forsén, S. 1989. Infrared thermography as a means of assessing seedling quality. *Scand. J. For. Res.* 4: 215-222.

- Sims, R. A., Kershaw, H. M. and Wickware, G. M. 1990. The autecology of major tree species in the North Central Region of Ontario. Ontario Ministry of Natural Resources Publication 5310. 126 p.
- Strong, W. L. and La Roi, G. H. 1983. Root-system morphology of common boreal forest trees in Alberta, Canada. Can. J. For. Res. 13: 1164-1173.
- Sutton, R. F. 1987. Root growth capacity and field performance of jack pine and black spruce in boreal stand establishment in Ontario. Can. J. For. Res. 17: 794-804.
- Sutton, R. F. 1990. Root growth capacity in coniferous forest trees. HortScience 25: 259-266.
- Troeng, E. 1991. Photosynthesis and root respiration of *Pinus sylvestris* and *Picea abies* seedlings after different root freezing and storage temperatures. Scand. J. For. Res. 6: 53-58.
- Wagg, J. W. B. 1967. Origin and development of white spruce root-forms. Canada Department of Forestry and Rural Development. Forestry Branch. Departmental publication 1192. 45 p.
- Walsh, D. 1993. Gauchissement de la tige et croissance de semis de conifères traités à l'éthylène et soumis à l'anaérobiose racinaire. Mémoire présenté à l'Université du Québec à Chicoutimi comme exigence partielle de la maîtrise en ressources renouvelables. Université du Québec.