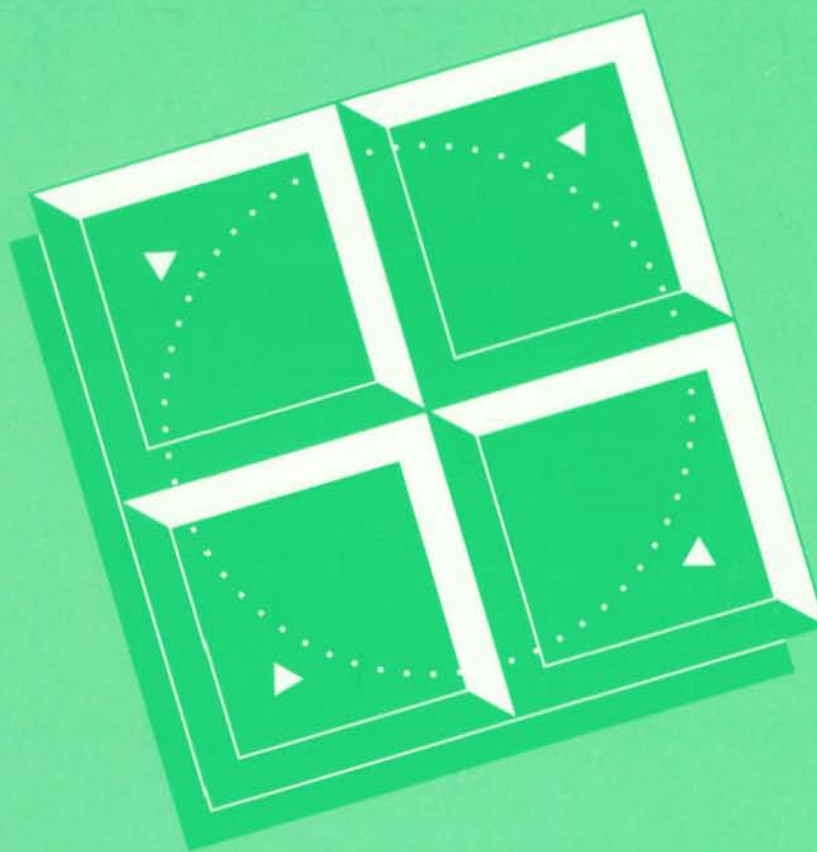


Mémoire de recherche forestière n° 127

Capacité de croissance des racines de
l'Épinette noire pendant la dormance
hivernale après l'application de trois
régies nutritionnelles différentes

par G. LAMBANY et M. RENAUD

Ce mémoire contient un errata
à la page iv du document



Gil LAMBANY est ingénieur forestier, diplômé de l'Université Laval depuis 1976. En 1978, l'Université de Sherbrooke lui décernait le diplôme de maître en environnement. À l'emploi du Ministère depuis 1984, il est actuellement affecté au Service de l'amélioration des arbres à titre de chargé de recherches en physiologie végétale.



Mario RENAUD est technicien forestier, diplômé du cégep de Sainte-Foy depuis 1978. À l'emploi du Ministère depuis 1979, il est présentement affecté à la division de R-D sur les semences, boutures et plants du Service de l'amélioration des arbres, où il assiste le chargé de recherches en physiologie végétale (production de plants).



Depuis de nombreuses années, chacun des Mémoires et des autres rapports publiés par la Recherche forestière est révisé par un comité *ad hoc* d'au moins trois membres recrutés aussi bien à l'intérieur du Ministère que dans le milieu universitaire, la fonction publique du Canada ou les autres milieux de la recherche. Les responsables de la Recherche forestière remercient les scientifiques qui ont accepté bénévolement de revoir le texte présenté ici et de participer ainsi à la diffusion des résultats des recherches menées au Ministère des Ressources naturelles.

Les publications de la Recherche forestière sont produites et diffusées à même les budgets de recherche et de développement, comme autant d'étapes essentielles à la réalisation de chaque projet ou expérience. En conséquence, ces documents sont, par définition, à *tirage limité* et à *diffusion restreinte*. Adresser toute demande à :

Publications
Direction de la recherche forestière
Ministère des Ressources naturelles du Québec
2700, rue Einstein
SAINTE-FOY (Québec)
Canada G1P 3W8

**Capacité de croissance des racines de l'Épinette noire
pendant la dormance hivernale
après l'application de trois régies nutritionnelles différentes**

*« S'asseoir, simplement s'asseoir
et l'herbe croît d'elle-même et devient verte »*

(Parole zen)

**Capacité de croissance des racines de l'Épinette noire
pendant la dormance hivernale
après l'application de trois régies nutritionnelles différentes**

Mémoire de recherche forestière n° 127

par

Gil LAMBANY, ing.f., M.Env.

et

Mario RENAUD, techn.f.

Gouvernement du Québec
Ministère des Ressources naturelles
Direction de la recherche forestière
1997

Ce texte est un rapport partiel du projet de recherche n° 0894-232S : « Méthode de qualification physiologique des plants produits en pépinière ».

LAMBANY, G. et M. RENAUD, 1997. *Capacité de croissance des racines de l'Épinette noire pendant la dormance hivernale après l'application de trois régies nutritionnelles différentes*. Mémoire de recherche forestière n° 127.

ERRATA

p. 5	Tabl.1	L. 3	K (biffer « total »)	
p. 12-13	Tabl. 4		Des lignes horizontales devraient regrouper les entêtes communes (comme dans les autres tableaux)	
p. 17	Tabl. 5	Note	... probabilité 95 %.	
p. 20	c. 1	par. 3	L. 6	... (1988) l'ont
p. 34	par. 4	L. 1	... à 60 % ± 5 %	
passim	titre courant	du verso	Capacité de croissance des racines	

RN97-3015

ISBN 2-550-31236-8

ISSN 1183-3912

Dépôt légal 1997

Bibliothèque nationale du Québec

Bibliothèque nationale du Canada

© 1997 Gouvernement du Québec

Avant-propos

Ce mémoire de recherche porte sur l'évaluation de la capacité de croissance des racines de l'épinette noire en période de dormance hivernale. Elle a été faite à partir des suivis morphologiques effectués à la pépinière d'East-Angus et des analyses physiologiques réalisées au laboratoire de morphophysiologie végétale de la Division de R-D sur les semences, boutures et plants et au Service des laboratoires de la Direction de la recherche forestière du MRN.

Nos remerciements s'adressent en premier lieu à monsieur Benoit-Marie Gingras de la Division ainsi qu'au personnel technique et professionnel de la pépinière d'East-Angus, plus particulièrement à madame France Brulotte et monsieur Alain Lebel.

Nous remercions également monsieur Charles-Gilles Langlois pour l'encadrement professionnel apporté à ce projet, monsieur Paul Berthiaume du Bureau de la Statistique du Québec pour la rigueur apportée aux analyses statistiques, le Service des laboratoires pour les mesures des concentrations dans les tissus et Agriculture Canada (Lennoxville) pour la location d'une chambre de croissance automatisée.

Nous adressons finalement nos remerciements au personnel du secrétariat pour la mise en page de ce document ainsi qu'à messieurs Fabien Caron (MRN), André L. d'Aoust (CFL), Daniel Lord (UQAC) et Guy Prigent (MRN) pour la révision complète des textes.

Résumé

Des semis d'épinette noire cultivés en *Multipots* ont fait l'objet d'une évaluation de leur capacité à développer de nouvelles racines blanches (capacité de croissance des racines ou CCR) en cabinet de croissance au cours de la dormance hivernale. Dans le but éventuel d'intégrer la CCR comme norme de qualification des plants avant le reboisement, la variabilité et la sensibilité de ce paramètre ont été étudiées dans un premier temps. Deux provenances génétiques d'épinette noire (1 + 0) cultivées selon trois calendriers de fertilisation différents ont fait l'objet d'une caractérisation morpho-physiologique de leurs racines (nombre de racines blanches ≥ 1 cm) pendant sept mois. Au cours de la saison de culture, l'application des trois calendriers de fertilisation (N1, N3 et N5) a permis de produire des lots d'épinette morphologiquement (hauteur, diamètre et masse) et physiologiquement (concentrations tissulaires en azote) différents ; les provenances ont présenté des patrons de croissance et des niveaux de concentration d'azote dans les tissus semblables. Contrairement aux résultats obtenus par certains chercheurs de l'Ouest canadien et de l'Ontario, l'analyse détaillée de la CCR confirme que ce paramètre ne présente pas un profil évolutif caractéristique en forme de courbe convexe. Cette constatation est associée en partie à l'importante variabilité des résultats obtenus. Deuxièmement, les analyses confirment que ni les provenances ni les calendriers de fertilisation n'ont eu une incidence significative sur les patrons de la CCR. Dans un contexte de protocole expérimental rigoureux, ces résultats remettent en question la faisabilité d'introduire ce paramètre comme norme éventuelle de qualification des plants.

Mot-clés : capacité de croissance des racines, épinette noire, azote, plants en contenant, fertilisation, provenance.

Abstract

Growth capacity of Black Spruce roots during winter dormancy after the application of three different fertilization schedules. This study is an evaluation of the capacity of black spruce seedlings grown in container conditions to develop new white roots (Root Growth Capacity or RGP) in growth chamber during winter dormancy. The variability and sensitivity of RGP were studied with the eventual aim of integrating this parameter as a qualification standard for containerized seedlings before reforestation. Two genetic stocks of black spruce (1 + 0), cultivated according to three different fertilization schedules, were subjected to a morpho-physiological characterization of the development of their root system (number of white roots ≥ 1 cm) over a seven-month period. During the growing season, the application of three fertilization schedules (N1, N3 and N5) allowed the production of spruce lots that were morphologically (height, diameter and weight) and physiologically (nitrogen concentration in tissues) different ; the stocks presented similar growth patterns and levels of nitrogen concentration in their tissues. Unlike results obtained by some scientists of western Canada and Ontario, the detailed analysis of the RGP confirms that this parameter does not show a typical development profile in the form of a convex curve. This finding is attributed partly to the significant variability of the results. Secondly, the analysis confirms that neither the stocks or the fertilization schedules have had a significant effect on the RGP patterns. These results, yielded in the context of a rigorous experimental protocol, call into question the usefulness of introducing this parameter as a possible standard for seedlings qualification.

Key words : root growth capacity, black spruce, nitrogen, containerized seedlings, fertilization, seedlot.

Table des matières

Avant-propos	v
Résumé	vii
<i>Abstract</i>	vii
Liste des tableaux	xi
Liste des figures	xiii
Introduction	1
Chapitre premier	
Matériel et méthodes	3
1.1 Dispositif expérimental	3
1.1.1 Dispositif été-automne 1991	3
1.1.2 Dispositif hiver-printemps 1992	3
1.1.3 Analyses statistiques	4
1.2 Matériel	4
1.2.1 Morphologie des plants	4
1.2.2 Physiologie des plants	4
1.2.2.1 Contenus tissulaires	4
1.2.2.2 Capacité de croissance des racines (CCR)	4
1.2.3 Calendriers de fertilisation	5
Chapitre deux	
Résultats	7
2.1 Morphologie des plants	7
2.2 Physiologie des plants	11
2.2.1 Concentrations tissulaires	11
2.2.2 Capacité de croissance des racines (CCR)	16

2.2.2.1 Effets de la période d'évaluation sur la CCR	16	Annexe 6	
2.2.2.2 Effets des régies azotées sur la CCR	16		Représentation d'un graphique en boîte (<i>box plot</i>) schématisant le décompte des racines blanches ≥ 1 cm de 96 plants d'un même calendrier de fertilisation (provenances confondues)
2.2.2.3 Effet de la provenance sur la CCR	16		36
Chapitre trois			
Discussion	19		
3.1 Caractéristiques de l'épinette noire cultivée selon un calendrier de fertilisation standard « N3 »	19		
3.2 Effets des trois régies azotées sur la morphologie et la physiologie du plant	20		
3.3 Analyse de la capacité de croissance des racines	20		
3.3.1 Profils hivernaux	20		
3.3.2 Effets des régies azotées sur la CCR	21		
3.3.3 Effets de la provenance sur la CCR	22		
Conclusion	23		
Bibliographie	25		
Annexe 1			
Dispositif expérimental : été-automne 1991 pépinière d'East-Angus (tunnel n° 17)	29		
Annexe 2			
Dispositif expérimental : hiver-printemps 1992 pépinière d'East-Angus (tunnel n° 16)	30		
Annexe 3			
Analyse de variance (ANOVA) : dispositif expérimental implanté à la pépinière d'East-Angus, été 1991	31		
Annexe 4			
Méthode d'échantillonnage et paramètres d'analyse	32		
Annexe 5			
Acclimatation et optimisation des conditions de culture des plants en chambre de croissance	34		

Liste des tableaux

Tableau 1	Synthèse des fertilisations hebdomadaires en N, P et K réalisées sur deux provenances d'épinette noire soumises à trois régies azotées différentes	5
Tableau 2	Analyse de variance testant l'effet de trois niveaux de fertilisation sur la morphologie de plants d'épinette noire récoltés en juillet 1991	8
Tableau 3	Paramètres morphologiques de deux provenances d'épinette noire cultivées selon trois régies azotées différentes et mesurés à trois dates	9
Tableau 4	Concentrations en azote (N), phosphore (P) et potassium (K) évaluées à trois dates de récolte dans les parties aériennes et dans les racines de deux provenances d'épinette noire cultivées selon trois régies azotées différentes	12-13
Tableau 5	Nombre de racines blanches ≥ 1 cm de deux provenances d'épinette noire cultivées selon trois régies azotées différentes	17

Liste des figures

Figure 1	Variation de la hauteur et du diamètre de plants d'épinette noire cultivés selon trois calendriers de fertilisation (provenances confondues)	8
Figure 2	Variation de la masse de la partie aérienne et des racines de plants d'épinette noire cultivés selon trois calendriers de fertilisation (provenances confondues)	10
Figure 3	Variation de la masse totale de plants d'épinette noire cultivés selon trois calendriers de fertilisation (provenances confondues)	11
Figure 4	Concentrations en azote (N) dans la partie aérienne et dans les racines de plants d'épinette noire cultivés selon trois calendriers de fertilisation (provenances confondues)	14
Figure 5	Concentrations en phosphore (P) dans la partie aérienne et dans les racines de plants d'épinette noire cultivés selon trois calendriers de fertilisation (provenances confondues)	14
Figure 6	Concentrations en potassium (K) dans la partie aérienne et dans les racines de plants d'épinette noire cultivés selon trois calendriers de fertilisation (provenances confondues)	15
Figure 7	Graphiques en boîtes (<i>boxplot</i>) représentant les profils hivernaux de la CCR de plants d'épinette noire cultivés selon trois régions azotées (provenances confondues)	15

Table des matières

Introduction

1. Les racines et leur rôle

2. Les facteurs limitant la croissance racinaire

3. Les méthodes d'évaluation de la croissance racinaire

4. Les applications de la mesure de la croissance racinaire

5. Conclusion

Bibliographie

Annexes

Introduction

Depuis plusieurs années, la qualification des plants cultivés en pépinière se base sur certains critères spécifiques : dimensions, configuration, aspect général et état phytosanitaire. Bien que généralement adéquats, il ressort selon Sutton (1983) que ces critères ne peuvent pas évaluer à eux seuls le potentiel de croissance d'un plant et expliquer totalement le succès ou l'échec d'une plantation.

Dans ce contexte général, il est donc pertinent d'évaluer la faisabilité d'introduire de nouveaux critères physiologiques de qualification des plants (Gadgil et Harris 1980, Durya 1985 et Brulotte et Prégent 1991). Les objectifs d'une telle démarche visent d'une part à accroître la qualité des lots livrables et d'autre part à améliorer progressivement les techniques de production des plants en pépinière afin de produire des plants munis de racines qui possèdent une capacité de croissance élevée.

Parmi les paramètres physiologiques qui ont été étudiés au cours des dernières années, la capacité de croissance des racines (CCR) retient particulièrement l'attention parce que le développement de cette partie du plant demeure un des critères les plus liés à la survie et au développement des semis en plantation (Feret et Kreh 1985, Dunsworth 1986, Larsen *et al.* 1986, Landis et Skakel 1988, Simpson *et al.* 1988, Johnsen *et al.* 1989, Burdett 1990, Simpson 1990).

Au Québec, Brulotte et Prégent (1991) ont particulièrement fait ressortir la variabilité de la croissance des racines de l'épinette noire et de l'épinette blanche en fonction de l'origine des lots analysés et de la durée du test en serre. Dans une étude sur le genre *Picea*, d'Aoust *et al.* (1991) ont observé que les variables

morphologiques expliquent plus de 50 % de la variabilité totale chez des semis d'épinette alors que les paramètres physiologiques demeurent moins corrélés aux variables mesurées. Puisque le choix d'un paramètre opérationnel de qualification des plants dépend avant tout de l'obtention de valeurs moyennes présentant une faible variabilité, l'objectif général de cet essai consiste à évaluer en tout premier lieu la fiabilité et la sensibilité de la CCR.

Trois objectifs ont été définis dans le cadre de cette étude. Le premier vise à confirmer ou à infirmer les résultats obtenus par plusieurs chercheurs démontrant une dynamique saisonnière caractéristique de la CCR. Le second but tente de préciser si l'application d'un facteur exogène (régie azotée) produisant un impact sur la morphologie et la physiologie du plant affecte la CCR. Le troisième objectif a pour but de vérifier l'effet d'un facteur endogène (provenance génétique) sur le développement des racines.

Dans le but de répondre à ces objectifs, un essai intégré a été réalisé de mai 1991 à mai 1992 à la pépinière d'East-Angus afin d'évaluer, au cours d'une année, l'évolution de différents paramètres morphologiques et physiologiques. Le chapitre premier du présent rapport décrit les dispositifs implantés à la pépinière (été et hiver), explique la méthode d'application des calendriers de fertilisation et décrit les paramètres morphologiques et physiologiques retenus. Le deuxième chapitre fait état des résultats des analyses morphologiques (hauteur, diamètre, masse) et physiologiques (concentrations tissulaires et CCR). Finalement, le troisième chapitre présente, à l'aide d'une revue bibliographique élargie, une discussion des résultats en fonction des trois objectifs visés.

Chapitre premier

Matériel et méthodes

1.1 Dispositif expérimental

Afin de répondre aux trois objectifs de cette étude, un dispositif expérimental, fonctionnel de mai à novembre 1991, a été élaboré à la pépinière d'East-Angus. Il avait pour but de produire des lots de plants morphologiquement et physiologiquement différents de deux provenances d'épinette noire à la suite de l'application de trois calendriers de fertilisation. La capacité de croissance des racines étant un paramètre dont on veut caractériser l'évolution au cours de l'hiver, le dispositif a été rebâti à la fin de l'automne afin de faciliter l'extraction des plants sous le couvert de neige.

1.1.1 Dispositif été-automne 1991

En mai 1991, on a implanté un dispositif en parcelles partagées (*split plot*) réparti à l'intérieur de quatre blocs aléatoires (parcelles principales : trois régies azotées différentes ; parcelles secondaires : deux provenances génétiques) à l'intérieur d'un tunnel (annexe 1). Chaque unité de provenance et de régie est constituée de deux rangées de 15 *Multipots* (récipients IPL 45-110 de 45 cavités de 110 cm³ chacune; IPL, Saint-Damien-de-Bellechasse, Québec) dans lesquels l'épinette noire commence sa deuxième année de croissance. Le dispositif complet est constitué de 720 *Multipots* (deux provenances x trois régies nutritionnelles x quatre blocs x 30 récipients). Comme l'application du calendrier de fertilisation est réalisée à l'aide d'un robot tout au long de la saison de croissance, des drapeaux de couleurs différentes permettent de distinguer adéquatement les trois régies azotées du dispositif expérimental ; de plus, à cause des risques de dérive par grand vent,

des *Multipots* « tampons » (deux rangées x 30 récipients) sont disposés de part et d'autre de chaque unité (régie-provenance) ; chacune de ces dernières est identifiée à l'aide d'un bâtonnet (régie et provenance). Finalement, en mai, avant l'implantation du dispositif, les plants d'épinette noire (provenances 88-K-92G : latitude 45° 35', longitude 70° 56', et 88-I-20G : latitude 45° 54', longitude 70° 32') sont triés afin d'uniformiser les populations en début de traitement. De mai à novembre, six récoltes mensuelles de matériel végétal ont permis d'analyser les différents lots d'épinette sur le plan morphologique et physiologique. L'annexe 3 décrit brièvement le tableau d'analyse de variance (ANOVA) associé à ce dispositif.

1.1.2 Dispositif hiver-printemps 1992

Parce qu'il est difficile d'extraire les *Multipots* sous la neige, le dispositif en parcelles partagées a été rebâti au début de novembre en cinq grands blocs (annexe 2) correspondant chacun à une date de récolte (novembre, décembre, janvier, mars et mai). Ces blocs sont formés de 24 récipients (deux provenances x trois régies x quatre blocs) contenant 45 plants choisis aléatoirement (annexe 4) à l'intérieur du dispositif d'été. Pour éviter tout risque de gel et de dessiccation, chaque bloc de récolte (date) a fait l'objet d'une protection en pourtour à l'aide de *Multipots* tampons contre lesquels on a appliqué un isolant de type styromousse. Afin de faciliter l'extraction des récipients au cours des cinq récoltes, ces derniers sont déposés sur une toile noire filtrante. Des repères aux quatre coins des unités de récoltes (date) complétaient l'identification du dispositif d'hiver.

1.1.3 Analyses statistiques

Afin de comparer les résultats obtenus des paramètres morphologiques et physiologiques, on a retenu le modèle linéaire suivant applicable à un plan à parcelles partagées :

$$Y_{ijk} = \mu + \tau_i + \beta_j + (\tau\beta)_{ij} + Y_k + (\tau Y)_{ik} + (\beta Y)_{jk} + (\tau\beta Y)_{ijk}$$

où :

Y_{ijk} représente la valeur d'un paramètre morphologique ou physiologique provenant d'un échantillon issu du $i^{\text{ième}}$ bloc ($i = 1, 2, 3, 4$), de la $j^{\text{ième}}$ région ($j = 1, 2, 3$) et de la $k^{\text{ième}}$ provenance ($K = 1, 2$) ;

τ_i , β_j et $(\tau\beta)_{ij}$ correspondent respectivement aux facteurs Bloc et Région et au terme d'erreur de la parcelle principale ;

Y_k , $(\tau Y)_{ik}$, $(\beta Y)_{jk}$ et $(\tau\beta Y)_{ijk}$ correspondent respectivement aux facteurs Provenance, aux interactions Bloc x Provenance et Région x Provenance et au terme d'erreur de la sous-parcelle.

Trois hypothèses ont été vérifiées statistiquement :

1. H_0 = Aucune différence entre les régions nutritionnelles
2. H_0 = Aucune différence entre les provenances génétiques
3. H_0 = Interaction nulle Région - Provenance.

Pour les régions nutritionnelles, on emploie le test de Duncan pour différencier les trois niveaux alors que pour les provenances génétiques, on réalise une comparaison. L'interaction est vérifiée graphiquement. Le seuil de rejet des hypothèses a été fixé à $\alpha \leq 0,05$. L'ensemble des analyses statistiques a été réalisé au moyen du logiciel SAS.

1.2 Matériel

Des plants d'épinette noire commençant une deuxième année de production en *Multipots* (45-110) ont été triés en mai 1991 parmi deux lots de provenances différentes : 88-I et 88-K. Une fois par mois, à six reprises, de mai à octobre 1991 et à cinq reprises de novembre 1991 à mai 1992, on a récolté des semis à l'intérieur des récipients et de cavités préalablement choisis. La méthode d'échantillonnage réalisée en été et en hiver est décrite à l'annexe 4.

1.2.1 Morphologie des plants

Pour chacune des six récoltes, de mai à la fin septembre, dix-huit plants par bloc (quatre) et par traitement (deux provenances x trois régions azotées) sont systématiquement récoltés à l'intérieur du dispositif expérimental. Au laboratoire, chaque semis est par la suite lavé puis coupé au collet ; la hauteur (cm) et le diamètre (mm) sont mesurés individuellement. Par la suite, un regroupement distinct de trois unités de tiges et de racines et un séchage à l'étuve (60 °C) permettent de quantifier les masses sèches des parties aériennes et des racines (en mg, six mesures par bloc et par traitement ; 24 mesures par traitement).

1.2.2 Physiologie des plants

1.2.2.1 Contenus tissulaires

La mesure des masses des tiges et des racines complétée, tout le matériel végétal d'un même bloc (18 tiges et 18 racines) est ensuite broyé. Après une extraction double à l'acide sulfurique et au peroxyde, les concentrations tissulaires en azote (N), en phosphore (P) et en potassium (K) sont mesurées sur un appareil à plasma (une mesure par bloc, par élément et par tissu, quatre mesures par traitement et par élément). Tout comme pour les analyses morphologiques, on évalue les concentrations à l'intérieur des six traitements chaque mois de mai à octobre (deux provenances x trois régions) et à cinq reprises pendant la période hivernale. Pour les fins de présentation, les résultats sont exprimés en pourcentage.

1.2.2.2 Capacité de croissance des racines (CCR)

Comme la CCR représente l'élément principal d'évaluation de la qualité du plant au cours de l'hiver, une plus grande attention est apportée à cette partie de l'étude.

À chaque récolte et dans chacun des 24 récipients (deux provenances x trois régions x quatre blocs), 12 des 45 plants sont choisis au hasard afin d'évaluer le développement des racines ; 26 autres plants permettent la quantification de paramètres morphologiques et physiologiques spécifiques (annexe 4). Les sept plants résiduels du *Multipot* sont utilisés comme semis de remplacement en cas de bris d'une tige. Comme l'expression de l'activité des racines demeure sensible au substrat employé, aux conditions environnementales en chambre de croissance (Nambiar *et al.* 1979, Nambiar *et al.* 1982, Carlson 1986), à la durée du test proprement dit (Burr *et al.* 1987, Brulotte et Prégent 1991) et à la méthode expérimentale retenue (Ritchie 1985, Day *et al.* 1985, Landis et Skakel 1988), on a élaboré un calendrier rigoureux d'acclimatation, d'empotage et de culture des plants. L'annexe 5 décrit chronologiquement les conditions et les opérations

appliquées pour chacun des cinq inventaires afin d'assurer des conditions homogènes et reproductibles et ainsi permettre le développement adéquat des méristèmes des racines.

La période de croissance de 17 jours terminée, chacun des 288 plants est dépoté à la main. Ensuite, à l'aide d'un petit pinceau, on débarasse la motte de toute trace de tourbe. Enfin, chaque nouvelle racine blanche est délicatement excisée au moyen d'une petite pince. Ce travail terminé, on applique un critère d'acceptation basé sur la longueur de la racine blanche : supérieure ou égale à un centimètre, la racine est comptée ; plus petite, elle est rejetée (Sutton 1983 et 1987, Simpson *et al.* 1988).

Comme ce paramètre présente souvent une importante variabilité (Sutton 1980, Nambiar *et al.* 1982, Binder *et al.* 1988), on utilise des graphiques en boîte (boxplot) afin de mieux représenter la dispersion des données (Ford 1989). Chaque boîte permet de représenter le 10^e, le 25^e, le 50^e, le 75^e et le 90^e percentile de la CCR (annexe 6). De façon générale, des sections interquantiles qui s'étirent de part et d'autre de la médiane et des lignes qui s'étirent pour les portions 10^e-25^e percentile et 75^e-90^e percentile indiquent une augmentation de la variabilité des résultats.

1.2.3 Calendriers de fertilisation

L'application de régies nutritionnelles distinctes vise à engendrer, en fin de saison de croissance, trois populations d'épinette noire distinctes tant sur le plan morphologique que physiologique. Pour atteindre cet objectif, un calendrier de fertilisation adaptée a été élaboré en mai 1991 (Gingras, communication personnelle, Langlois 1990a et 1990b). Le tableau 1 présente la synthèse des amendements en N, P et K appliqués sur les semis à l'aide d'une rampe d'arrosage au cours de la saison 1991.

Les applications sont réalisées chaque semaine jusqu'à la fin du mois d'octobre 1991. Le calendrier de fertilisation est bâti avec comme base de référence la régie N3 dont l'objectif est de produire un plant de 22 cm de hauteur, de 3,2 mm de diamètre, une masse de la partie aérienne et des racines de 1 425 mg et de 575 mg respectivement en fin de saison. Pour chaque fertilisation, on a appliqué des engrais de formule 20-8-20 et 15-30-15, avec un ajustement entre les régies azotées de 50 % (la référence étant le standard de la régie N3) avec du 34-0-0. Comme l'indique le tableau 1, on maintient les apports totaux en phosphore et en potassium à des niveaux identiques pour les trois régies nutritionnelles au cours de la saison de culture.

Tableau 1. Synthèse des fertilisations hebdomadaires en N, P et K réalisées sur deux provenances d'épinette noire soumises à trois régies azotées différentes

		Régie N1	Régie N3	Régie N5
N	mg/cavité	15	30,03	45,03
	g/m ²	86,1	113,13	140,13
P	mg/cavité	13,96	13,96	13,96
K total	mg/cavité	29,34	29,34	29,34

Chapitre deux

Résultats

Au cours d'une période d'un an, onze récoltes de plants de deux provenances d'épinette noire cultivées selon trois calendriers de fertilisation ont permis d'établir des profils morphologiques (hauteur, diamètre, masse) et physiologiques (concentrations tissulaires en N, P et K, et CCR) caractéristiques. Comme les résultats confirment l'absence de différences entre les deux provenances d'épinette, les données ont été fusionnées et les profils morphologiques et physiologiques sont analysés en fonction des trois régies nutritionnelles.

2.1 Morphologie des plants

La croissance de la hauteur des plants d'épinette noire présente une dynamique caractéristique de mai 1991 à mai 1992 (figure 1a). Dès la fin de juillet, on observe une bonne distinction entre les lots de plants cultivés selon les régies N1, N3 et N5. Les profils présentés à la figure 1a indiquent que ce paramètre atteint une croissance maximale au cours de la période juin-juillet. Dès le début de l'automne, le développement apical est à toute fin pratique terminé. À partir de septembre, les trois principales régies permettent de produire des lots d'épinette de hauteurs différentes. Les résultats inscrits au tableau 2 confirment qu'à la fin de juillet, les calendriers de fertilisation produisent un effet significatif sur la hauteur des plants, toutes provenances confondues. Le tableau 3a indique qu'en mai 1991, au début de l'essai, aucune différence n'est observée entre les plants et ce pour les deux provenances à l'étude ; ceci reflète le triage initial effectué sur les deux lots. En novembre, six mois plus tard, les analyses de variance confirment l'effet des régies sur la hauteur des plants. Les valeurs s'échelonnent de 23,1 cm (N1) à 32,4 cm (N5) pour la provenance 88I et de 24,7 cm (N1) à 35,3 cm

(N5) pour la provenance 88K. En mai 1992, un an après le début de l'essai, les tendances observées en novembre 1991 sont confirmées bien qu'aucune différence significative de hauteur n'ait été observée entre les régies N3 et N5 de chaque provenance. De plus, le tableau 3b confirme que, pour une même régie azotée, aucune différence de hauteur n'est observée entre les deux provenances à l'étude en mai 1991 et en mai 1992. En novembre, bien que significatives, les hauteurs ne présentent que de faibles écarts de 0,3 cm (N3) à 2,9 cm (N5) entre les deux lots.

Au point de vue du diamètre, les résultats illustrés à la figure 1b présentent des tendances analogues à celles qu'on observe pour la hauteur. En effet, on note un accroissement rapide au printemps, particulièrement au cours de la période juin-juillet, et ce pour les trois régies azotées. En juillet, l'analyse de variance confirme la présence de différences de diamètre entre les semis des trois lots (tableau 2). Dès le mois d'août et jusqu'en mai 1992, la croissance du diamètre est demeurée à peu près nulle. La figure 1b indique cependant peu de différences, contrairement au paramètre hauteur, entre les plants soumis aux régies N3 et N5.

Le tableau 3a confirme cette observation : alors que les valeurs de diamètre ne présentent pas de différences significatives entre les plants des trois régies en mai 1991, les récoltes de novembre 1991 et de mai 1992 indiquent une bonne caractérisation des lots des plants de la régie N1 d'une part et des plants des régies N3 et N5 d'autre part. Par contre, indépendamment de la date et de la régie azotée, aucune différence de diamètre n'est apparue entre les provenances (tableau 3b).

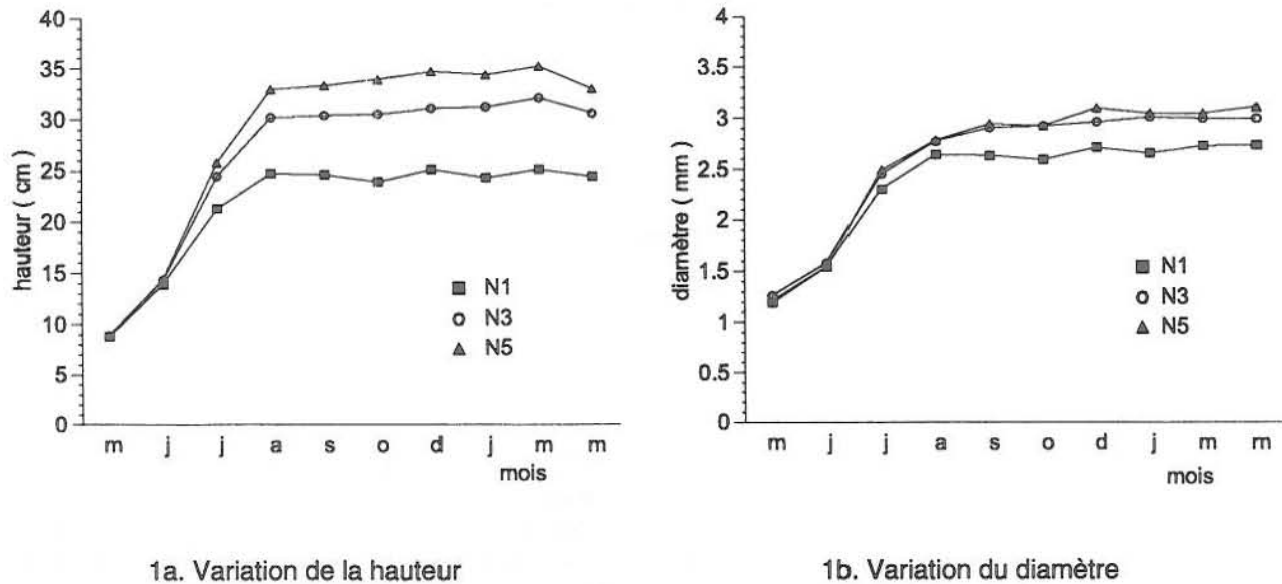


Figure 1. Variation de la hauteur et du diamètre de plants d'épinette noire cultivés selon trois calendriers de fertilisation (provenances confondues).

L'application de trois calendriers de fertilisation a produit un effet marqué sur la masse de la partie aérienne des plants et dès le mois de juillet (Figure 2a). Tout comme pour la hauteur, la figure 2a indique une bonne différenciation de la masse de la partie aérienne entre les lots de plants soumis aux régies N1, N3 et N5 dès les mois de juillet ; cette tendance est confirmée par l'analyse de variance réalisée sur les données colligées à cette période (tableau 2). Cependant, alors que la hauteur des semis atteint un maximum dès le mois d'août pour les trois régies, les résultats indiquent que plus les amendements en azote sont élevés, plus les masses aériennes continuent d'augmenter au cours de l'automne. D'octobre à décembre cependant, un arrêt de

l'accroissement est observé pour les trois régies, situation qui apparaît plus précocement en août-septembre pour le paramètre hauteur. Les analyses de variance (tableau 3a) confirment qu'à la fin de la saison de croissance, des différences significatives apparaissent entre les plants des trois régies, situation absente en mai 1991. Pour les deux provenances, on observe un écart de plus d'un gramme par plant entre les plants des régies N1 et N5. Les résultats en mai 1992 ne font que confirmer les données colligées en novembre 1991. Tout comme pour le diamètre, les analyses de variance indiquent que les deux provenances d'épinette noire soumises à une même régie azotée présentent à chaque récolte des masses aériennes semblables (tableau 3b).

Tableau 2. Analyse de variance testant l'effet de trois niveaux de fertilisation sur la morphologie de plants d'épinette noire récoltés en juillet 1991

Paramètres	Effets des régies	Type d'effet
hauteur	$p = 0,0001$	quadratique; $p = 0,0083$
diamètre	$p = 0,0047$	quadratique; $p = 0,0460$
masse tige	$p = 0,0002$	quadratique; $p = 0,0021$

Tableau 3. Paramètres morphologiques de deux provenances d'épinette noire cultivées selon trois régies azotées différentes et mesurées à trois dates

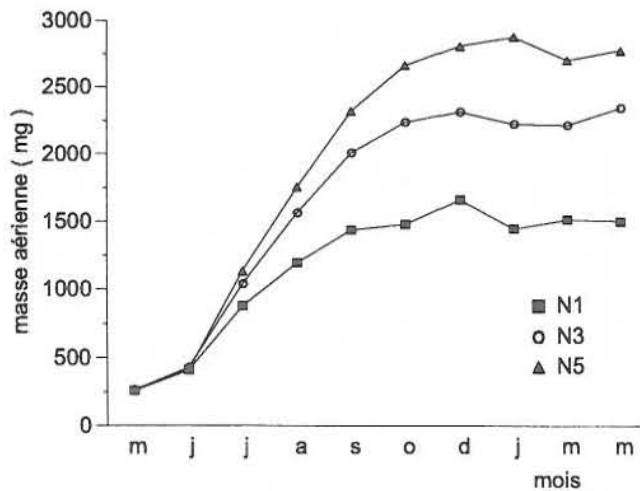
3a. Comparaisons entre les régies (provenances fixées)

Date de récolte	Provenance	Hauteur (cm)			Diamètre (mm)			Masse tiges (mg)			Masse racines (mg)			Masse totale (mg)		
		régie azotée			régie azotée			régie azotée			régie azotée			régie azotée		
		N1	N3	N5	N1	N3	N5	N1	N3	N5	N1	N3	N5	N1	N3	N5
mai 1991	88i	8,9a	8,9a	8,8a	1,19a	1,26a	1,19a	247,2a	243,6a	258,6a	76,4a	71,7a	79,1a	323,6a	315,3a	337,7a
	88k	8,7a	8,7a	9,0a	1,19a	1,26a	1,23a	265,4a	278,6a	271,1a	97,3a	107,7a	100,8a	362,7a	386,3a	371,9a
novembre 1991	88i	23,1a	30,3b	32,4c	2,55a	2,93b	2,91b	1445,4a	2232,1b	2591,9c	695,3b	628,6b	446,0a	2140,7a	2860,7b	3037,9c
	88k	24,7a	30,6b	35,3c	2,63a	2,90b	2,92b	1510,3a	2236,5b	2725,1c	697,7b	631,7b	408,8a	2208,0a	2868,2b	3133,9c
mai 1992	88i	22,7a	30,0b	32,5b	2,72a	3,00b	3,04b	1453,5a	2318,0b	2755,9c	810,2a	642,7a	478,3a	2263,7a	2960,7b	3234,2c
	88k	24,1a	31,1b	33,5b	2,73a	2,98b	3,16b	1542,0a	2361,1b	2782,6c	815,8a	571,3a	599,5a	2357,8a	2932,4b	3382,1c

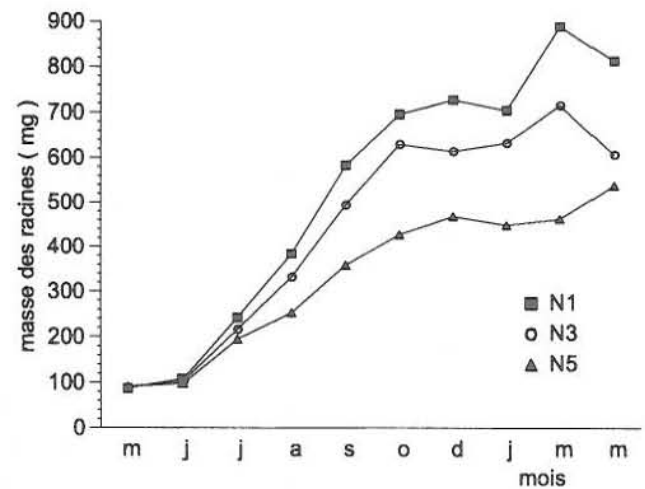
3b. Comparaisons entre les provenances (régies fixées)

Date de récolte	Régie azotée	Hauteur (cm)		Diamètre (mm)		Masses tiges (mg)		Masse racines (mg)		Masse totale (mg)	
		88i	88k	88i	88k	88i	88k	88i	88k	88i	88k
mai 1991	N1	8,9a	8,7a	1,19a	1,19a	247,2a	265,4a	76,4a	97,3b	323,6a	362,7a
	N3	8,9a	8,7a	1,26a	1,26a	243,6a	278,6a	71,7a	107,7b	315,3a	386,3a
	N5	8,8a	9,0a	1,19a	1,23a	258,6a	271,1a	79,1a	100,8b	337,7a	371,9a
novembre 1991	N1	23,1a	24,7b	2,55a	2,63a	1445,4a	1510,3a	695,3a	697,7a	2140,7a	2208,0a
	N3	30,3a	30,6b	2,93a	2,90a	2232,1a	2236,5a	628,6a	631,7a	2860,7a	2868,2a
	N5	32,4a	35,3b	2,91a	2,92a	2591,9a	2725,1a	446,0a	408,8a	3037,9a	3133,9a
mai 1992	N1	22,4a	24,1a	2,72a	2,73a	1453,5a	1542,0a	810,2a	815,8a	2263,7a	2357,8a
	N3	30,0a	31,1a	3,00a	2,98a	2318,0a	2361,1a	642,7a	571,3a	2960,7a	2932,4a
	N5	32,5a	33,5a	3,04a	3,16a	2755,9a	2782,6a	478,3a	599,5a	3234,2a	3382,1a

* Pour chaque date et pour chaque provenance, les lettres différentes rencontrées sur une même ligne représentent des différences significatives à $\alpha = 0,05$; probabilité 95 %.



2a. Variation de la masse de la partie aérienne



2b. Variation de la masse des racines

Figure 2. Variation de la masse de la partie aérienne et des racines de plants d'épinette noire cultivés selon trois calendriers de fertilisation (provenances confondues).

La masse des racines (figure 2b) indique des profils inverses de ceux qu'on observe pour la masse des tiges. Ainsi, plus la régie azotée est élevée, plus la masse diminue. Ce résultat est observable dès le mois d'août. En novembre, les racines de plants soumis à la régie N1 pèsent de 250 à 300 mg par plant de plus que celles de la régie N5. À partir d'octobre, l'accroissement de la masse des racines est à toute fin pratique terminé pour les plants cultivés selon les trois régies. Curieusement, au cours de la période janvier-mars, on note une augmentation de la masse des plants des régies N1 et N3. Bien que graphiquement des différences de masses semblent évidentes, particulièrement pour les régies N1 et N5, les résultats indiquent peu d'effets significatifs de régies azotées sur la masse des racines (Tableau 3a). La variabilité élevée de ce paramètre peut expliquer en bonne partie cette situation. D'autre part, les résultats inscrits au tableau 3b confirment que la provenance n'a pas eu d'effet significatif sur ce paramètre indépendamment de la régie ou de la date.

Finalement, la figure 3 illustre les profils saisonniers de la masse totale des plants en fonction des trois calendriers de fertilisation. Comme la masse relative

de la partie aérienne est près de quatre fois supérieure à celle des racines, les courbes de la masse totale s'apparentent à celles obtenues pour la partie aérienne du plant (figure 2a). Le poids relatif plus important des tiges fait aussi en sorte que plus la régie azotée augmente, plus la masse totale s'accroît au cours de la saison, masquant du même coup la situation inverse observée pour les racines. Du point de vue statistique, les résultats sont en tout point semblables à ceux obtenus pour la partie aérienne (tableau 3a). Les récoltes de novembre 1991 et de mai 1992 confirment une bonne différenciation des lots de plants cultivés selon les trois régies azotées. De plus, le tableau 3b indique que, pour une même récolte et une même régie, les deux provenances présentent un profil semblable sur le plan de la masse totale.

Cette première partie de l'étude confirme qu'il est possible de produire, par l'application de calendriers de fertilisation appropriés, des lots distincts de plants d'épinette noire tant sur le plan de la hauteur et du diamètre que de la masse. Les données confirment de plus que les deux provenances d'épinette présentent des profils morphologiques semblables tout au cours de l'année.

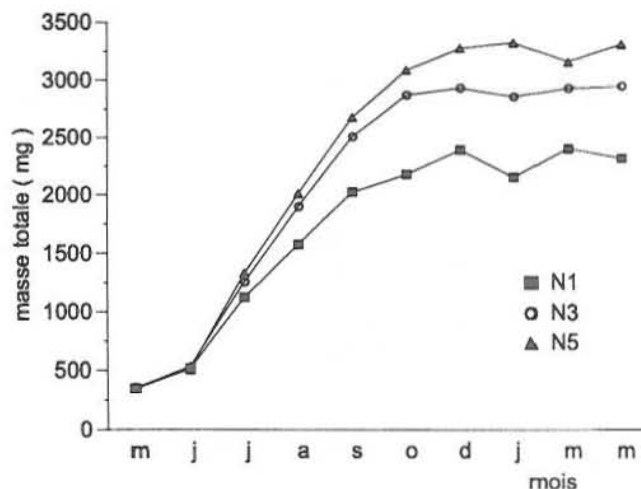


Figure 3. Variation de la masse totale de plants d'épinette noire cultivés selon trois calendriers de fertilisation (provenances confondues).

2.2 Physiologie des plants

2.2.1 Concentrations tissulaires

La figure 4 illustre les variations des concentrations en azote dans la partie aérienne et dans les racines de l'épinette noire cultivée selon trois régies nutritionnelles. On note que les profils saisonniers sont à peu près identiques, avec des niveaux de concentration atteignant des valeurs maximales en juin. Après cette période d'accumulation, qui précède l'élongation des tiges, les concentrations en azote dans les tissus décroissent progressivement pour atteindre des valeurs à peu près constantes dès le mois de septembre dans les racines et en octobre dans la partie aérienne et ce, pour les trois régies. En mai 1991, au début de l'essai, les résultats (tableau 4a) confirment que les concentrations en azote sont légèrement différentes (parties aériennes, $p = 0,04$) ou semblables (racines, $p = 0,32$). Six mois plus tard, l'application des trois calendriers de fertilisation produit une différenciation significative des lots sur le plan des concentrations en azote dans les tissus (tableau 4a) ; entre les régies N1 et N5, les écarts atteignent respectivement 0,33 % (tiges) et 0,45 % (racines) d'azote (toutes provenances confondues). En mai 1992, les différences significatives entre les trois traitements se sont maintenues uniquement dans les racines des plants de la prove-

nance 881 ; dans tous les autres cas, on observe des concentrations tissulaires semblables dans les plants soumis aux régies N3 et N5. Finalement, le tableau 4b indique que, pour chacune des récoltes effectuées et pour chaque tissu analysé, les deux provenances d'épinette enregistrent des concentrations en azote semblables. Ainsi, les trois calendriers de fertilisation appliqués de mai à novembre 1991 permettent de produire des lots d'épinette noire physiologiquement différents sur le plan des concentrations en azote sans effet significatif de la provenance.

Les résultats du suivi du phosphore sont présentés à la figure 5. Comme nous l'avons mentionné précédemment, les applications de cet élément sont identiques pour les trois calendriers de fertilisation. Le profil saisonnier est caractérisé en juin par une augmentation des concentrations dans la partie aérienne mais plus particulièrement dans les racines ; par la suite, une baisse rapide de la concentration s'observe jusqu'en octobre dans la partie aérienne, suivie de profils rectilignes de novembre 1991 à mai 1992 ; dans les racines, la baisse est moins accentuée de juin à août mais se maintient jusqu'en décembre. Au cours de l'hiver, on observe une légère remontée. Globalement, les concentrations de phosphore dans les

Tableau 4. Concentrations en azote (N), phosphore (P) et potassium (K) évaluées à trois dates de récolte dans les parties aériennes et dans les racines de deux provenances d'épinette noire cultivées selon trois régies azotées différentes

4a. Comparaison entre les régies (provenances fixées)

Date de récolte	Provenance	Azote (%)					
		tiges régie azotée			racines régie azotée		
		N1	N3	N5	N1	N3	N5
mai 1991	88i	1,11a	1,12a	1,03b	1,15a	1,15a	1,06a
	88k	1,00b	1,01b	0,97a	1,16a	1,17a	1,18a
novembre 1991	88i	0,80a	0,97b	1,12c	0,85a	1,06b	1,33c
	88k	0,78a	0,95b	1,13c	0,89a	1,01b	1,31c
mai 1992	88i	0,79a	0,97b	1,11b	0,92a	1,07b	1,38c
	88k	0,76a	0,97b	1,06b	0,89a	1,18b	1,22b

4b. Comparaison entre les provenances (régies fixées)

Date de récolte	Régie azotée	Azote (%)			
		tiges		racines	
		88i	88k	88i	88k
mai 1991	N1	1,11a	1,00b	1,15a	1,16a
	N3	1,12a	1,01b	1,15a	1,17a
	N5	1,03a	0,97b	1,06a	1,18a
novembre 1991	N1	0,80a	0,78a	0,85a	0,89a
	N3	0,97a	0,95a	1,06a	1,01a
	N5	1,12a	1,13a	1,33a	1,31a
mai 1992	N1	0,79a	0,76a	0,92a	0,89a
	N3	0,97a	0,97a	1,07a	1,18a
	N5	1,11a	1,06a	1,38a	1,22a

* Pour chaque date et pour chaque provenance, les lettres rencontrées sur une même ligne représentent des différences significatives à $\alpha = 0,5$; probabilité 95 %.

Tableau 4 (fin). Concentrations en azote (N), phosphore (P) et potassium (K) évaluées à trois dates de récolte dans les parties aériennes et dans les racines de deux provenances d'épinette noire cultivées selon trois régies azotées différentes

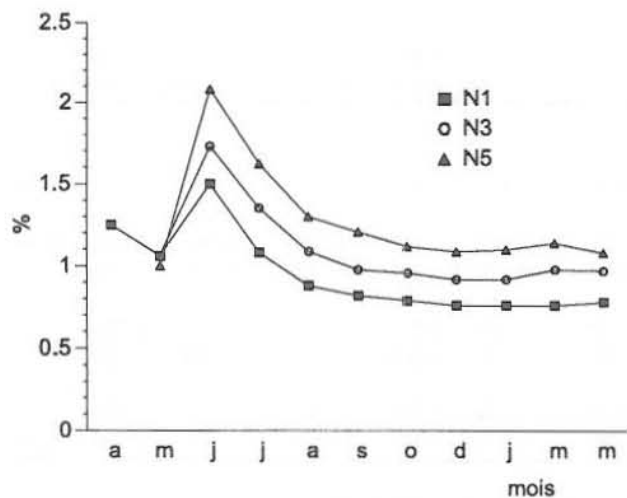
4a. Comparaison entre les régies (provenances fixées)

Date de récolte	Provenance	Phosphore (%)						Potassium (%)					
		tiges régie azotée			racines régie azotée			tiges régie azotée			racines régie azotée		
		N1	N3	N5	N1	N3	N5	N1	N3	N5	N1	N3	N5
mai 1991	88i	0,20a	0,18a	0,18a	0,23a	0,22a	0,22a	0,81c	0,80b	0,77a	0,64a	0,66a	0,64a
	88k	0,20a	0,18a	0,18a	0,26a	0,25a	0,24a	0,76c	0,73b	0,71a	0,68a	0,70a	0,63a
novembre 1991	88i	0,20b	0,19b	0,18a	0,27a	0,29a	0,30a	0,64c	0,58b	0,51a	0,70a	0,75a	0,75a
	88k	0,21b	0,22b	0,21a	0,30ab	0,32b	0,28a	0,68c	0,63b	0,55a	0,73a	0,76a	0,72a
mai 1992	88i	0,20b	0,19a	0,18a	0,28a	0,29a	0,28a	0,74a	0,73a	0,64a	0,81a	0,96a	0,91a
	88k	0,20b	0,18a	0,18a	0,28a	0,29a	0,29a	0,77a	0,67a	0,65a	0,79a	0,88a	0,86a

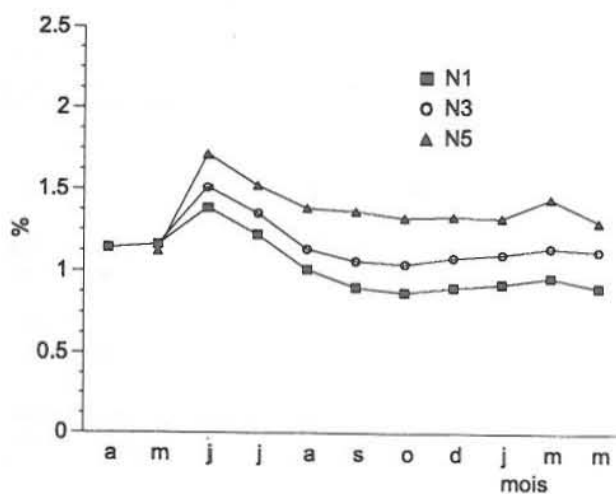
4b. Comparaison entre les provenances (régies fixées)

Date de récolte	Régie azotée	Phosphore (%)				Potassium (%)			
		tiges		racines		tiges		racines	
		88i	88k	88i	88k	88i	88i	88i	88k
mai 1991	N1	0,20a	0,20a	0,23a	0,26a	0,81a	0,76a	0,64a	0,68a
	N3	0,18a	0,18a	0,22a	0,25a	0,80a	0,73a	0,66a	0,70a
	N5	0,18a	0,18a	0,22a	0,24a	0,77a	0,71a	0,64a	0,63a
Novembre 1991	N1	0,20b	0,21a	0,27a	0,30b	0,64a	0,68b	0,70a	0,73a
	N3	0,19b	0,22a	0,29a	0,32a	0,58a	0,63b	0,75a	0,76a
	N5	0,18b	0,21a	0,30a	0,28a	0,51a	0,55b	0,75a	0,72a
mai 1992	N1	0,20a	0,20a	0,28a	0,28a	0,74a	0,77a	0,81a	0,79a
	N3	0,19a	0,18a	0,29a	0,29a	0,73a	0,67a	0,96a	0,88a
	N5	0,18a	0,18a	0,28a	0,29a	0,64a	0,65a	0,91a	0,86a

* Pour chaque date et pour chaque provenance, les lettres rencontrées sur une même ligne représentent des différences significatives à $\alpha = 0,5$; probabilité 95 %.

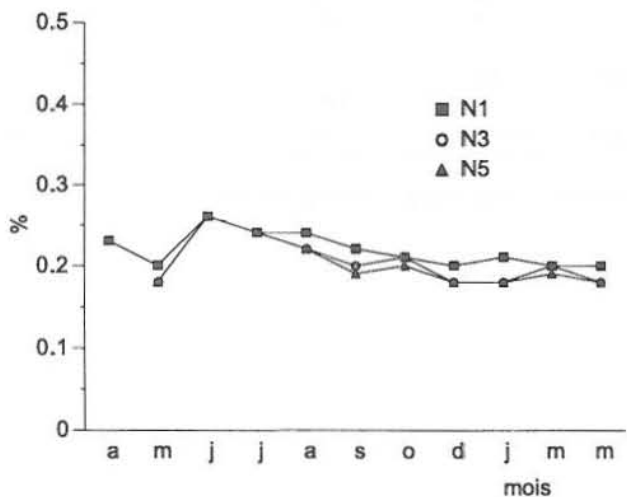


4a. Partie aérienne

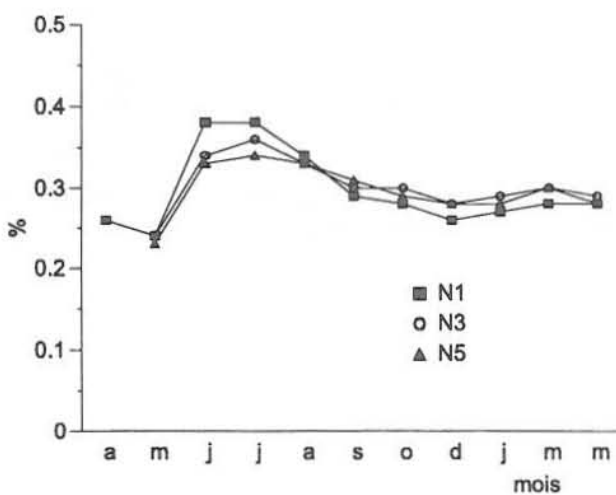


4b. Racines

Figure 4. Concentrations en azote (N) dans la partie aérienne et dans les racines de plants d'épinette noire cultivés selon trois calendriers de fertilisation (provenances confondues).



5a. Partie aérienne



5b. Racines

Figure 5. Concentrations en phosphore (P) dans la partie aérienne et dans les racines de plants d'épinette noire cultivés selon trois calendriers de fertilisation (provenances confondues).

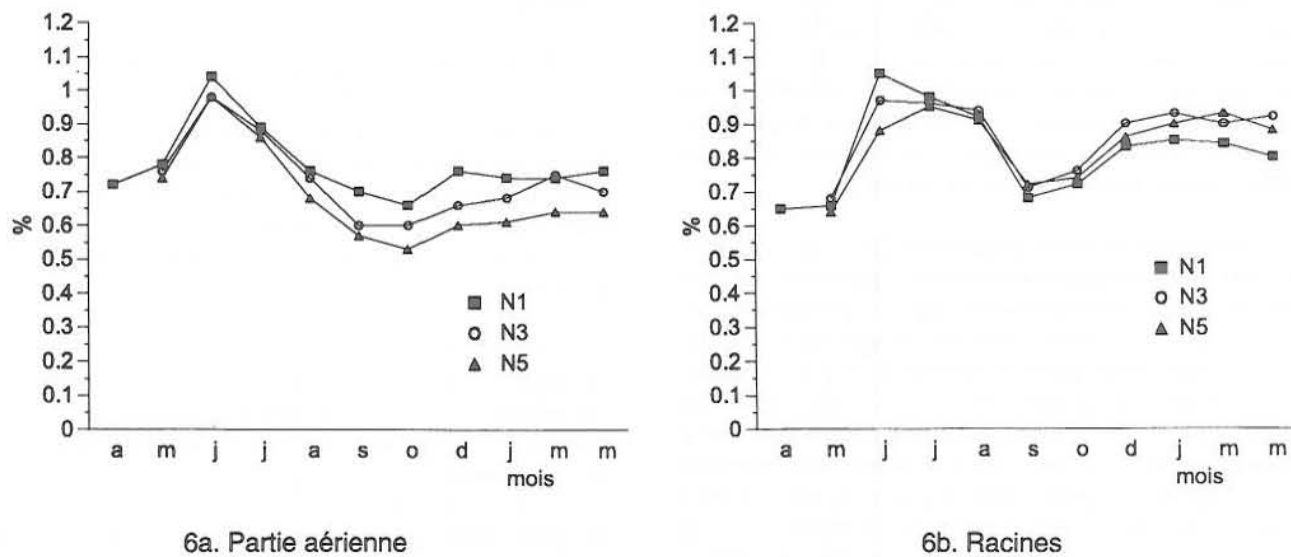


Figure 6. Concentrations en potassium (K) dans la partie aérienne et dans les racines de plants d'épinette noire cultivés selon trois calendriers de fertilisation (provenances confondues).

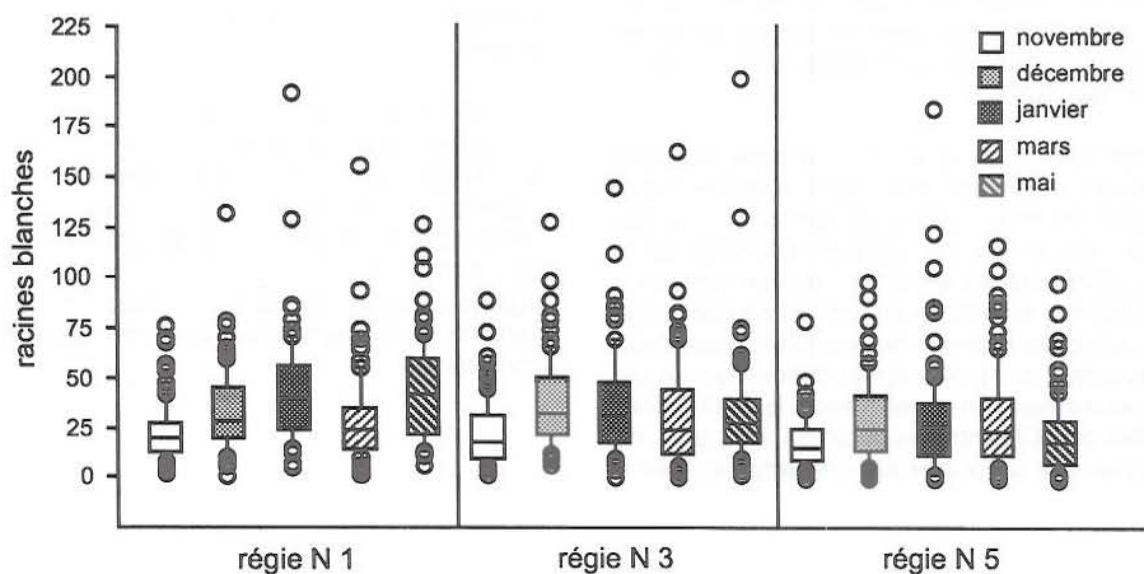


Figure 7. Graphique en boîtes (*boxplot*) représentant les profils hivernaux de la CCR de plants d'épinette noire cultivés selon trois régies azotées (provenances confondues).

racines demeurent supérieures à celles de la partie aérienne au cours de l'année. Les résultats du tableau 4a indiquent de très faibles écarts de concentration en novembre entre les trois niveaux de fertilisation. Dans les tiges, les concentrations oscillent entre 0,18 % (N5 ; 88I) et 0,22 % (N3 ; 88K) alors que dans les racines, on enregistre des valeurs minimales (N3 ; 88I) de 0,27 % et maximales (N3 ; 88K) de 0,32 %. Finalement, les résultats inscrits au tableau 4b confirment que les plants des deux provenances présentent des niveaux de concentration semblables ou légèrement différents à la fin de la saison de culture en novembre 1991, l'écart maximal étant de l'ordre de 0,03 %.

Les profils annuels de concentration du potassium (K) tant dans les parties aériennes que dans les racines du plant s'apparentent à ceux du phosphore jusqu'au mois d'octobre : accroissement important en juin, baisse rapide (parties aériennes) ou plus progressive (racine) par la suite jusqu'à la fin de septembre (figures 6a et 6b). À partir d'octobre cependant, l'augmentation des concentrations dans les deux fractions tissulaires est progressive et se poursuit jusqu'en mars 1992 ; de mars à mai 1992, les concentrations se stabilisent ou baissent légèrement (racines ; N1 et N5). Les analyses confirment qu'en mai et en novembre 1991, de légères différences apparaissent dans la portion tige entre les trois régions (tableau 4a). Les écarts maximums sont de 0,013 % (novembre, provenances 88I et 88K, régions N1 et N5). Dans les racines, on ne note aucune différence dans les concentrations tissulaires de mai 1991 à mai 1992. Finalement, tout comme pour le phosphore, on observe des niveaux de concentration tissulaire identique pour les deux provenances (Tableau 4b) sauf dans les parties aériennes à la récolte de novembre, où de faibles différences ont été observées (0,004 %).

En conclusion, les analyses tissulaires réalisées au cours de la période 1991-1992 confirment que l'application de trois niveaux de fertilisation azotée permet de classer des lots distincts d'épinette sur le plan des concentrations en azote ; les concentrations en phosphore et en potassium sont identiques d'une région à l'autre. De plus, les deux provenances d'épinette présentent des profils et des concentrations tissulaires semblables. En conséquence, les différences éventuelles de CCR entre les deux lots, s'il y en a, ne pourront pas être associées aux concentrations en P et K.

2.2.2 Capacité de croissance des racines (CCR)

Comme les données obtenues des deux provenances d'épinette ont été fusionnées, chaque boîte (*boxplot*) correspond à un décompte de racines de 96 plants (48 plants par provenance) évalués à une même date et pour une même région de fertilisation (N1, N3 et N5).

2.2.2.1 Effets de la période d'évaluation sur la CCR

La figure 7 illustre, par date et pour chacune des régions, les profils de la CCR, de novembre 1991 à mai 1992. Les résultats indiquent une dispersion relativement importante des données pour chaque traitement et à chacune des dates d'échantillonnage (boîtes allongées).

Les plants cultivés selon les trois régions indiquent un léger accroissement de la CCR de novembre à décembre suivi d'une augmentation (N1) ou d'une stabilisation en janvier (N3, N5). Le printemps (mai) est caractérisé par une augmentation de la CCR (N1 et N3) alors que les plants de la région N5 présentent un faible développement des racines à cette période.

2.2.2.2 Effets des régions azotées sur la CCR

Les résultats des analyses statistiques (Tableau 5a) confirment qu'à chaque récolte et pour chacune des provenances étudiées, la région azotée ne produit pas d'effets significatifs de la CCR. Les valeurs élevées des écarts-types observés pour chaque provenance et chaque région confirment la variabilité importante des résultats obtenus ; ceci se reflète graphiquement par l'allongement des boîtes observées à la figure 7.

2.2.2.3 Effet de la provenance sur la CCR

Les provenances n'ont pas d'effets significatifs sur la CCR (tableau 5b). Pour une même région, les plants d'épinette noire de deux provenances génétiques différentes ne présentent pas de particularités sur le plan de la CCR. Comme pour les comparaisons de région, les résultats du tableau 5b indiquent une importante variabilité des résultats confirmée par des écarts types élevés.

Tableau 5. Nombre de racines blanches ≥ 1 cm de deux provenances d'épinette noire cultivées selon trois régies azotées différentes

a. Comparaison des régies azotées								b. Comparaison des provenances					
		Régie azotée						Provenance					
		N1		N3		N5		88I		88K			
Date de récolte	Provenance	moy.	e.t.	moy.	e.t.	moy.	e.t.	Date de récolte	Régie azotée	moy.	e.t.	moy.	e.t.
novembre 1991	88I	19,6a	11,9	23,7a	17,5	19,0a	10,6	novembre 1991	N1	19,6a	11,9	24,8a	16,3
	88K	24,8a	16,3	21,9a	15,7	18,4a	13,9		N3	23,7a	17,5	21,9a	15,7
									N5	19,0a	10,6	18,4a	13,9
décembre 1991	88I	30,a	23,0	37,7a	25,6a	19,0	19,4	décembre 1991	N1	30,0a	23,0	35,1a	18,6
	88K	35,1a	18,6	36,7a	18,7	18,4a	22,3		N3	37,7a	25,6	36,7a	18,7
									N5	32,9a	19,4	25,8a	22,3
janvier 1992	88I	39,5a	20,8	37,0a	24,7a	32,9a	20,3	janvier 1992	N1	39,5a	20,8	46,8a	31,4
	88K	46,8a	31,4	37,0a	27,8	25,8a	33,1		N3	37,0a	24,7	37,0a	27,8
									N5	30,2a	20,3	30,8a	33,1
mars 1992	88I	29,6a	16,3	37,8a	24,1	30,2a	24,3	mars 1992	N1	29,6a	16,3	28,9a	27,3
	88K	28,9a	27,3	25,9a	27,6	30,8a	24,0		N3	37,8a	24,1	25,9a	27,6
									N5	36,8a	24,3	26,6a	24,0
mai 1992	88I	34,9a	20,9	29,7a	16,7	36,8a	20,7	mai 1992	N1	34,9a	20,9	52,2a	25,7
	88K	52,2a	25,7	36,0a	32,8	26,6a	15,4		N3	29,7a	16,7	36,0a	32,8
									N5	25,9a	20,7	19,8a	15,4

* pour chaque date et pour chaque provenance, les lettres différentes rencontrées sur une même ligne représentent des différences significatives à $\alpha = 0,05$; probabilité ; 95 %.

Chapitre trois

Discussion

3.1 Caractéristiques de l'épinette noire cultivée selon un calendrier de fertilisation standard « N3 »

Afin de bâtir les calendriers de fertilisation N1 et N5, la régie N3 a servi de référence. Au taux de 30 mg d'azote par cavité, ce niveau de fertilisation permet au semis d'atteindre habituellement les standards de qualification exigés en fin de seconde année de production (Langlois 1990b, Gingras, communication personnelle). Pour cette régie, les résultats de l'essai confirment que les objectifs théoriques sont globalement atteints. Plus spécifiquement, on observe des hauteurs légèrement supérieures aux valeurs normalement recommandées ; par contre, le diamètre des plants atteint la plage prescrite (Langlois 1988a). À ce niveau de concentration, Gohier (1988) obtient pour cette essence, des hauteurs et des diamètres semblables à ceux enregistrés ici. Pour les masses, les résultats de fin de saison, dans la partie tant aérienne que souterraine, sont plus élevés que ceux recommandés par Langlois (1988a) mais semblables à ceux de Gohier (1988). Un plant plus gros en début de saison, des conditions climatiques favorables et une gestion rigoureuse de cette production peuvent expliquer en partie ces différences. Les résultats indiquent que la provenance n'introduit pas de patrons de croissance différents chez cette espèce. Ceci indique que les plants de deux lots différents présentent une croissance similaire au cours de la saison de croissance. Cependant, la proximité des deux zones géographiques d'où viennent ces provenances peut expliquer en partie ces résultats.

Sur le plan physiologique, l'application de la régie « N3 » produit des plants dont les concentrations tissulaires en azote demeurent inférieures à 1 %.

Celles-ci sont en deçà des valeurs obtenues par Langlois (1988b) en fin de saison de croissance avec des plages de concentration se situant plutôt entre 1,62 % et 1,82 % pour le plant entier (tige + aiguilles + racines). On peut émettre l'hypothèse que les semis maintiennent une croissance supérieure avec comme conséquence possible une utilisation plus importante de l'azote disponible dans les tissus. Comme le mentionnent Gonzalez et d'Aoust (1987), il est aussi possible que les plants, à l'intérieur d'une plage assez large, puissent croître adéquatement malgré des concentrations tissulaires faibles. Tout comme pour les paramètres morphologiques, la provenance n'induit pas des différences dans les concentrations en azote, ce qui confirme donc un comportement semblable des deux groupes de plants au point de vue du métabolisme de l'azote.

Pour ce qui est du phosphore (P) et du potassium (K), les valeurs de concentration en fin de saison sont demeurées semblables (P) ou légèrement en deçà (K) des besoins structuraux du plant établis à 1 % par Langlois (1990a). Par contre, ce dernier, dans une série de suivis sur l'épinette, obtient des concentrations tissulaires en K variant de 0,77 % à 0,87 % (Langlois 1988b). Finalement, mentionnons que la provenance ne produit pas d'effets significatifs sur la concentration en P et K dans les tissus. Ceci indique que les deux lots d'épinette ont, au cours de la saison, des métabolismes en phosphore et en potassium identiques. Tout comme pour l'azote, des lots génétiquement semblables pourraient expliquer cette similitude de comportement.

3.2 Effets des trois régies azotées sur la morphologie et la physiologie du plant

L'application des régies N1 et N5 produit des plants différents de ceux de la régie référence N3 sur le plan tant morphologique que physiologique.

Au point de vue de la hauteur, les trois lots présentent des différences significatives, ce qui confirme ainsi l'effet de la régie azotée sur la morphologie des plants ; ce fait a déjà été observé par McClain et Armson (1976) sur l'épinette blanche, Van Den Driessche (1987) sur le douglas et l'épinette blanche et Gagnon *et al.* (1988) sur l'épinette noire.

Les profils de diamètre indiquent des tendances semblables à ceux de la hauteur sauf pour les régies N3 et N5 ; entre ces dernières, aucune différence n'est apparue. Au-delà d'une certaine quantité d'azote, l'accroissement en diamètre semble donc plafonner, comme d'Aoust (1980) et Gagnon *et al.* (1988) l'ont constaté chez l'épinette noire. Ces résultats confirment que les plants des deux provenances ont une croissance semblable de la hauteur et du diamètre pour chaque régie azotée. Ceci semble indiquer que les différences intrinsèques de chaque lot d'épinette noire n'ont pas d'impacts significatifs sur les paramètres ou encore que les provenances sont suffisamment semblables pour ne pas modifier les profils de croissance de la hauteur et du diamètre des plants au cours de la saison.

Sur le plan de la masse, on note qu'un apport accru en azote se traduit par une augmentation de la masse aérienne des plants ; ceci confirme les résultats des essais de McClain et Armson (1976), Van Den Driessche (1980 et 1987), Danielson *et al.* (1984), Gagnon *et al.* (1988) et Gonzalez et d'Aoust (1990).

Les profils saisonniers de la masse des racines indiquent une tendance inverse à ceux observés dans les parties aériennes, avec une baisse progressive de la régie N1 à la régie N5. En fin de saison cependant, seules les régies N1 et N5 des deux provenances présentent des différences significatives. Cinq mois plus tard, malgré des écarts importants entre les masses moyennes des racines, aucun effet significatif n'est décelé entre les plants des trois régies. Ceci indique une variabilité « intra » élevée. Il aurait été nécessaire d'augmenter la taille des échantillons afin de mieux différencier les traitements. Dans une production d'une durée de 20 semaines, Gagnon *et al.* (1988) ne notent pas de différences significatives des masses des racines de l'épinette noire cultivée selon trois régies azotées différentes, ce qui est semblable à ce qu'ont observé d'Aoust (1980) et Danielson *et al.* (1984) sur le pin gris. Tout comme pour la hauteur et

le diamètre, les deux provenances d'épinette ne produisent pas de différences au point de vue de la masse des racines et ce pour chacune des régies. Des comportements semblables des lots ou des provenances génétiques semblables peuvent expliquer ces similitudes. Finalement, la masse totale du plant reflète plus particulièrement la croissance de la partie aérienne du plant dont l'augmentation demeure liée à la quantité d'azote appliquée (McClain et Armson 1976, Van Den Driessche 1987).

Au point de vue physiologique, l'application de trois régies azotées produit un effet significatif sur les concentrations en azote dans les tiges et dans les racines, avec des augmentations progressives de la régie N1 à N5 ; ces travaux corroborent les résultats obtenus par McClain et Armson (1976), Van Den Driessche (1980), Gagnon *et al.* (1988) et Gonzalez et d'Aoust (1990). Les données confirment qu'au-delà d'une certaine utilisation de l'azote disponible, le semis accumule cet élément, ce qui produit ainsi des différences significatives de concentration dans les tissus sans gains morphologiques supplémentaires. Cependant la provenance n'a pas d'effet significatif sur les concentrations en azote et ce pour chacune des régies appliquées ; tout comme pour la morphologie des plants, des caractéristiques génétiques semblables ou un métabolisme de l'azote similaire peuvent expliquer ces résultats.

Finalement, le bilan des analyses de phosphore et de potassium, dont les quantités sont identiques à l'intérieur des trois calendriers de fertilisation, confirme que la régie influence peu le niveau de concentration de ces éléments dans les tissus. Tout comme pour l'azote, on n'observe aucune différence entre les deux provenances sur le plan des concentrations en P et K renforçant donc les deux hypothèses émises précédemment pour l'azote.

Cette première partie de la discussion indique donc qu'après une saison de croissance, tout juste avant le début de l'évaluation de la CCR, les plants d'épinette noire sont adéquatement différenciés sur le plan tant morphologique que physiologique (N). Par contre, les deux provenances génétiques présentent des patrons de développement semblables.

3.3 Analyse de la capacité de croissance des racines

3.3.1 Profils hivernaux

Au cours de cet essai, la CCR présente peu d'amplitude entre les périodes de dormance et de post-dormance. Les résultats indiquent que seuls les plants des deux provenances cultivés selon la régie N1 enregistrent un léger accroissement de la CCR

entre le mois de novembre et le mois de janvier, avec une faible variation d'environ 20 unités de racines blanches. Pourtant, plusieurs recherches réalisées sur des essences de l'Ouest permettent de caractériser ce paramètre : accroissement significatif au début de l'hiver, plafonnement de la CCR à la levée de la dormance puis décroissance progressive jusqu'à la période de post-dormance et de pré-débourrement (Stone et Jenkinson 1971, Ritchie et Dunlap 1980, Brissette et Roberts 1984, Dunsworth 1986, Burr *et al.* 1987, Dewald et Feret 1987, Donald 1988 et Burr *et al.* 1989). Dans certaines études, l'amplitude peut atteindre trois fois (Hallgren et Tauer 1987), quatre fois (Burr *et al.* 1987) et même six fois la valeur minimale obtenue à l'automne (Tinun *et al.* 1986, Dewald et Feret 1987) ; ces résultats, malgré l'obtention d'une variabilité « intra » importante (Sutton 1980, Brissette et Roberts 1984, Binder *et al.* 1988) indiquent généralement des différences significatives de CCR entre les dates de récolte. Sauf dans certaines études spécifiques, l'intensité de l'échantillonnage était semblable à celle de notre essai. Ces observations ne sont pas spécifiques aux essences étudiées dans l'Ouest canadien et américain : en effet, des profils caractéristiques sont observés sur des espèces étudiées dans l'Est canadien (Johnson-Flanagan et Owens 1985, Johnsen *et al.* 1989). Dans une étude sur différentes provenances d'épinette noire, Ford (1989) a réussi à caractériser la CCR. Cependant, tout comme Burdett (1979) le mentionne, ses données ont dû être transformées, ce qui limite la portée des conclusions *a posteriori*. Finalement, Mattsson (1986) a obtenu des profils accentués de la CCR du pin sylvestre sur une période de deux ans, avec une faible variabilité des données. Dans notre essai et même si aucune analyse statistique n'a été effectuée afin de comparer la CCR à des dates spécifiques, des boîtes (*box plot*) qui se recoupent indiquent généralement peu de différence de ce paramètre en fonction du temps. Il est difficile d'expliquer pourquoi les profils de ce paramètre présentent si peu d'amplitude au cours de l'hiver. En effet, la méthode appliquée et l'emploi d'un test de qualification éprouvé par d'autres chercheurs n'ont pas permis de réduire la variabilité « intra » ; le corollaire de ceci est que cette hétérogénéité a pu masquer la présence d'un profil hivernal s'il y en avait un. On peut cependant émettre l'hypothèse que les conditions d'acclimatation n'ont pas été suffisamment optimales, ce qui a pu augmenter la variabilité des résultats (Bigras et d'Aoust 1992). Il est plausible aussi de penser qu'une approche différente de la mesure de la CCR aurait permis d'accroître la précision des données ; mentionnons la longueur totale et la masse totale des racines blanches, la surface et le volume des racines (Ritchie 1985, Day *et al.* 1985, Burdett 1987). Cependant, le

décompte de racines demeure la méthode la plus courante et la mieux adaptée à une approche opérationnelle de qualification.

Plus fondamentalement cependant, l'absence de profil dynamique de la CCR au cours de la dormance pose des interrogations sur la sensibilité de ce paramètre en fonction de la caractéristique morphologique et physiologique individuelle de chaque plant à une période donnée de l'année : degré d'endurcissement ou de dormance des bourgeons (Burr *et al.* 1989), conductivité hydraulique des racines (Colombo et Asselstine 1989), phénologie du plant (Dewald et Feret 1987), indice de fin de dormance (Johnsen *et al.* 1989) et degré de résistance au gel (Simpson 1990). Aussi, comme le mentionnent Johnson-Flanagan et Owens (1985), chaque racine possède un cycle individuel de croissance. Nambiar *et al.* (1982) précisent que certains facteurs abiotiques comme la température peuvent exercer une influence prépondérante sur l'extension de racines existantes ou la production de nouvelles racines blanches. Dans ce contexte, il est compréhensible d'observer une aussi importante hétérogénéité de la CCR. De plus, d'autres paramètres, plus physiologiques mais non mesurés au cours de cet essai, pourraient influencer significativement ce paramètre : l'auxine, la cytokinine, l'acide abscissique (Ritchie et Dunlap 1980), la photosynthèse, l'absorption et l'état hydrique du plant (Burdett 1990). Dans une étude sur des semis d'épinette noire, d'Aoust *et al.* (1991) n'ont pu préciser une relation évidente entre la CCR et plusieurs variables morpho-physiologiques. À plusieurs égards, la CCR intègre, au niveau de la rhizogénèse, plusieurs agents de développement qui peuvent influencer le développement des racines.

3.3.2. Effet des régies azotées sur la CCR

Bien que l'application de trois régies azotées spécifiques permette de produire des lots morphologiquement et physiologiquement différents, on note peu de différences sur le plan de la CCR, ce que deux facteurs peuvent expliquer, en partie du moins : une importante variabilité de ce paramètre, qui voile l'effet possible des traitements, ou l'absence d'un effet de la morphologie des plants et des concentrations tissulaires (N) sur ce paramètre. Dans un essai réalisé sur le pin radiata, Nambiar *et al.* (1982) confirment que ni le poids de la tige ni le poids des racines n'ont un quelconque effet apparent sur la capacité de régénération des racines ; les facteurs les plus importants sont plus spécifiquement le potentiel de reprise de croissance des racines latérales existantes de premier ordre et la production de racines latérales de second ordre. Brulotte et Prigent (1991) observent aussi que les dimensions moyennes de l'épinette noire ne

permettent pas d'expliquer les variations de la CCR. Malgré un coefficient de corrélation faible, ces auteurs ainsi que d'Aoust *et al.* (1991) mentionnent que la hauteur de l'épinette blanche demeure cependant le paramètre le mieux corrélé au nombre de racines produites au moment de l'élongation printanière, ce que Sutton (1987) observe aussi dans une étude sur le pin gris et l'épinette noire. De même, Feret et Kreh (1985) obtiennent une bonne relation entre la croissance en hauteur du pin lodgepole et le développement des racines au printemps. Par contre, d'autres auteurs démontrent un lien entre le gabarit du plant et le développement des racines. Brissette et Roberts (1984) indiquent que la grosseur du pin lodgepole influence proportionnellement la CCR, tendance aussi confirmée par Larsen *et al.* (1986) pour cette même essence. Sur l'épinette noire et le pin gris cependant, Ford (1989) n'a pu corréler les caractéristiques morphologiques du plant et la CCR. Certains chercheurs mentionnent que, peu importe les caractéristiques morphologiques du plant, la température du substrat demeure un des éléments-clés du développement des racines (Nambiar *et al.* 1979, Carlson 1986). Dans le protocole expérimental appliqué, la programmation de température a été la même pour tous les traitements. Il est possible que cette uniformité ait produit un effet plus important que le facteur cultural proprement dit (régie azotée). Si, comme Glerum (1990) le mentionne, les pratiques culturales influencent subséquemment la performance des plants sur le terrain, dans notre essai, la régie nutritionnelle ne semble pas produire d'effets significatifs différents au point de vue de la production de nouvelles racines.

Sur le plan physiologique, Brulotte et Prigent (1991) mentionnent l'absence de liens significatifs entre le nombre de racines blanches produites et les concentrations tissulaires des plants. Dans notre essai, les résultats confirment que, malgré des niveaux d'azote significativement différents autant dans les tiges que dans les racines, le développement des racines n'est pas différent d'une régie à l'autre. Dans une étude sur des plants à racines nues d'épinette d'Engelmann et de douglas cultivés selon trois régies azotées différentes, Simpson (1988) indique que les plants soumis à la régie azotée la plus forte enregistrent une CCR supérieure. Il est possible que chez l'épinette noire, l'expression de la CCR soit liée non pas à l'azote mais à d'autres éléments comme le phosphore et le potassium. Comme ces facteurs ont été maintenus constants au cours de cet essai, ceci pouvait expliquer le peu d'effet du traitement azoté.

Certains auteurs comme Zaerr (1967) mentionnent que le facteur de production de nouvelles racines et d'élongation de racines existantes est beaucoup

plus lié à des activités hivernales amorcées dans les bourgeons et dont les effets se transmettent par translocation aux racines. Ritchie et Dunlap (1980) mentionnent qu'il n'apparaît pas évident que la fertilisation produise un effet suffisant pour permettre une expression accrue de la CCR. Malgré cela, les résultats de notre essai, même non significatifs, montrent qu'en janvier, au moment où les plants atteignent la levée de dormance et au printemps, en période de pré-débourrement, la CCR présente des valeurs décroissantes de la régie N5 à la régie N1. Cependant, comme la masse des racines indique des écarts importants entre ces régies, les différences dans les valeurs enregistrées ne peuvent être attribuées qu'à un effet combiné de la masse et des concentrations en azote.

3.3.3 Effets de la provenance sur la CCR

Les résultats de cette étude ne font pas ressortir de lien précis entre la provenance et la CCR. Des plants présentant des caractéristiques similaires sur le plan morphologique et physiologique peuvent donc ne pas être influencés par leur provenance. Pourtant, dans la plupart des études réalisées dans ce domaine, les auteurs observent généralement une relation entre la CCR et l'origine des lots. Nambiar *et al.* (1982) précisent que des familles de pin radiata de provenances différentes présentent une CCR différente tant sur le plan du nombre et de la longueur que de la masse de nouvelles racines blanches produites. Dans des études respectives sur le pin à l'encens et le pin jaune, Carlson (1986) et Hallgren et Tauer (1987) en viennent aux mêmes conclusions. Sutton (1990) pour sa part confirme que des provenances différentes de pin gris, d'épinette noire et d'épinette blanche développent une CCR différente ; plus spécifiquement, les provenances plus nordiques enregistrent une meilleure production de racines blanches que celles du sud. Ford (1989), dans le cadre d'une thèse de maîtrise traitant de la sensibilité de la CCR de douze provenances d'épinette noire et de pin gris, conclut qu'entre les différents lots de chaque essence, ce paramètre présente des différences significatives, peu importe le mode de quantification retenu : nombre de racines, indice de potentiel de croissance, longueur et masse des racines.

Dans cet essai, bien qu'aucune différence ne soit décelée entre les provenances, l'importante variabilité des résultats ne permet pas de conclure à l'absence d'effet de la provenance sur ce paramètre. La proximité géographique des deux provenances étudiées indique que ces deux lots sont peut-être semblables. On peut émettre l'hypothèse que des provenances d'origine géographique très différentes auraient permis de mieux caractériser la CCR.

Conclusion

La fiabilité et la sensibilité de la CCR de l'épinette noire en période de dormance n'ont pu être démontrées au cours de cet essai. Indépendamment de la période de récolte et des traitements appliqués, ce paramètre présente une importante variabilité et l'absence d'un profil hivernal marqué ; ce constat limite le potentiel d'introduire la CCR comme outil de qualification des plants avant le reboisement.

Trois attributs spécifiques étaient nécessaires afin d'en arriver à une utilisation éventuelle de ce paramètre : un seuil de confiance adéquat, une précision acceptable de la mesure et une répétabilité constante dans le temps. Aucune de ces caractéristiques n'a été obtenue au cours de cet essai : l'expérience démontre plutôt que chaque plant semble présenter un développement individualisé de ses racines. Cette réalité renforce l'hypothèse que, peu importe l'application d'une méthode rigoureuse de mesure de la CCR, il existe un manque de connaissances fondamentales des processus physiologiques qui influencent l'expression de ce paramètre. Comme plusieurs auteurs l'ont démontré, la CCR demeure une variable qui dépend d'une somme de facteurs qui interagissent les

uns sur les autres avec une intensité qui, elle, dépend du stade phénologique atteint par le plant ; contrairement à la partie aérienne, le mode de développement et l'intensité de croissance des racines semblent des caractéristiques « individuelles » du plant, peu importe l'application de conditions environnementales optimales à son développement.

Dans ce contexte et à moins que de nouvelles recherches ne parviennent à identifier et à réduire l'effet des variables causant cette faible reproductibilité, la CCR ne pourra servir de façon fiable sauf peut-être comme critère relatif de rejet ou d'acceptation des lots pour des cas plus extrêmes que ceux étudiés dans cette étude (exemple : plants affectés par le gel des racines).

Des recherches plus fondamentales devront être entreprises afin d'accroître les connaissances sur la phénologie du développement des racines et la caractérisation du développement des méristèmes. Sans ces nouvelles connaissances, la CCR demeurera un outil trop imprécis pour espérer son éventuelle intégration comme paramètre de qualification des plants.

Bibliographie

- BIGRAS, F.J. et A.L. d'AOUST, 1992. *Hardening and dehardening of shoots and roots of containerized black spruce and white spruce seedlings under short and long days*. Can. J. For. Res. 22 : 388-396.
- BINDER, W.D., R.K. SCAGEL et G.J. KRUMLIK, 1988. *Root growth potential : facts, myths, value ?* USDA Forests Service, General Technical Report RM-167 : 111-118.
- BRISSETTE, J.C. et T.C. ROBERTS, 1984. *Seedlings size and lift date effects on root growth potential of loblolly pine from two Arkansas nurseries*. Tree Planters' Notes : 34-38.
- BRULOTTE, F. et G. PRÉSENT, 1991. *Évaluation de la capacité de croissance racinaire de l'épinette blanche et de l'épinette noire produites en récipients de 45 cavités*. Ministère des Forêts. 40 p.
- BURDETT, A.N., 1979. *New methods for measuring root growth capacity : their value in assessing lodge-pole pine stock quality*. Can. J. For. Res. 9 : 63-67.
- BURDETT, A.N., 1987. *Understanding root growth capacity : theoretical considerations in assessing planting stock quality by means of root growth tests*. Can. J. For. Res. 17 : 768-775.
- BURDETT, A.N., 1990. *Physiological processes in plantation establishment and the development of specifications for forest planting stock*. Can. J. For. Res. 20 : 415-427.
- BURR, K.E., R.W. TINUS, S.J. WALLNER et R.M. KING, 1987. *Comparison of time and method of mist chamber measurement of root growth potential*, USDA Forest Service, General Technical Report RM-151 : 77-86.
-

- BURR, K.E., R.W. TINUS, S.J. WALLNER et R.M. KING, 1989. *Relationships among cold hardiness, root growth potential and bud dormancy in three conifers*. *Tree Physiology* 5 : 291-306.
- CARLSON, W.C., 1986. *Root system considerations in the quality of loblolly pine seedlings*. *South. J. Appl. For.* 10 : 87-92.
- COLOMBO, S.J. et M.F. ASSELSTINE, 1989. *Root hydraulic conductivity and root growth capacity of black spruce (*Picea mariana*) seedlings*. *Tree Physiology* 5 : 73-81.
- DANIELSON, R.M., C.L. GRIFFITHS et D. PARKINSON, 1984. *Effects of fertilization on the growth and mycorrhizal development of container-grown jack pine seedlings*, *Forest Sci.* 30(3) : 828-835.
- d'AOUST, A.L., 1980. *Influence de la concentration d'un engrais chimique sur la croissance et les échanges gazeux de semis d'épinette noire en conteneurs*. *Naturaliste Can.* 107(3) : 125-133.
- d'AOUST, A.L., C. DELISLE, R. GIROUARD, A. GONZALEZ et M. BERNIER-CARDOU, 1991. *Characterization of containerized spruce seedlings prior to outplanting*. Dans : F.P. Donnely et H.W. Lussenberg, comp. Proc. 11th For. Nurserymen's Assoc. British Columbia. September 23-26, 1991, Prince George, British Columbia : 59-63.
- DAY, R.J., W.R. BUNTING, C. GLERUM, E.M. HARVEY, B. POLHILL, K.H. REESE et A. WYNIA, 1985. *Evaluating the quality of bareroot forest nursery stock*, Technical Editor : Paul L. Aird. Ministry of Natural Resources, Government of Ontario : chapitre 9.
- DEWALD, L.E. et P.P. FERET, 1987. *Changes in loblolly pine growth potential from September to April*. *Can. J. For. Res.* 17 : 635-643.
- DONALD, D.G.M., 1988. *The effect of season on the root growth capacity of one-year-old *Pinus radiata* seedlings*. *South African Forestry Journal* 147 : 6-8.
- DUNSWORTH, B.G., 1986. *Root growth potential in coastal container species : trends from operational testing and prediction of outplanting performance*, USDA Forest Service, General Technical Report RM-137 : 103-105.
- DURYA, M.L. ed. 1985. *Evaluating seedling quality : principles, procedure and predictive abilities of major tests*. Proc. Workshop. Corvallis, Oregon, Oct. 16-18. 1984. For. Res. Lab. Oregon State Univ.
- FERET, P.P. et R.E. KREH, 1985. *Seedling root growth potential as an indicator of Loblolly pine field performance*, *Forest Sci.* 31(4) : 1005-1011.
- FORD, R.D., 1989. *Root growth potential assessment of twelve black spruce and jack pine seedlings and clonal stock-lots*, Thèse de maîtrise, Département de foresterie, Université de Toronto. 122 p.
- GADGIL, P.D. et J.M. HARRIS, éd., 1980. *Planting stock quality*. *N.Z. J. For. Sci.* (special issue) 10(1) : 303.
- GAGNON, J., C.-G. LANGLOIS et J.A. FORTIN, 1988. *Growth and ectomycorrhiza formation of containerized black spruce seedlings as affected by nitrogen fertilization. Inoculation type, and symbiont*. *Can. J. For. Res.* 18 : 922-929.
- GLERUM, C., 1990. *Stock production research in Canada : a historical perspective*, *Forestry Chronicle*, avril : 103-111.
- GOHIER, R., 1988. *Pourquoi fertiliser ?* Dans : Troisième atelier québécois sur la culture des plants forestiers en récipients ; Chicoutimi, 9-10 novembre 1988. Gouvernement du Québec, MER (Forêts), Dir. rech. dev., S. transfert techn., 1990 : 69-78.
- GONZALEZ, A. et A.L. D'AOUST, 1987. *Observations et mesures concernant la culture de semis d'épinette noire en conteneurs*. *Serv. can. for., Cent. for. Laurentides, Sainte-Foy, Québec. Rapp. inf. LAU-X-79.*
- GONZALEZ, A. et A.L. D'AOUST, 1990. *Le régime hydrique et la nature du substrat dans la culture des semis en conteneurs*. Dans : Troisième atelier québécois sur la culture des plants forestiers en récipients. Chicoutimi, 9-10 novembre 1988. Québec. Ministère de l'Énergie et des Ressources, Dir. rech. dev., Serv. transfert tech., 1990 : 134-152.
- HALLGREN, S.W. et C.G. TAUER, 1987. *Effects of lift date, storage and family on early survival and root growth potential of Shortleaf pine*. USDA Forest Service, General Technical Report RM-151 : 87-92.

- JOHNSEN, K.H., P.P. FERET et J.R. SEILER, 1989. *Root growth potential and bud dormancy of 2+0 eastern white pine grown in a Virginia nursery*, Can. J. For. Res. 19 : 1598-1602.
- JOHNSON-FLANAGAN, A.M. et J.N. OWENS, 1985. *Root growth and root growth capacity of white spruce (Picea glauca [Moench] Voss) seedlings*. Can. J. For. Res. 15 : 625-630.
- LANDIS, T.D. et S.G. SKAKEL, 1988. *Root growth potential as an indicator of outplanting performance : problems and perspectives*. USDA Forest Service, General Technical Report RM-167 : 106-110.
- LANGLOIS, C.-G., 1988a. *Le dynamisme de la croissance des plants cultivés dans le récipient 45-110 et les relations entre les variables*. Troisième atelier québécois sur la culture des plants forestiers en récipients, MER : 1-24.
- LANGLOIS, C.-G., 1988b. *Le dynamisme de la nutrition minérale des plants cultivés dans le récipient 45-110 et les relations entre les variables*. Troisième atelier québécois sur la culture des plants forestiers en récipients, MER : 45-78.
- LANGLOIS, C.-G., 1990a. *Besoins structuraux en azote, phosphore et potassium des épinettes noire et blanche 1+0 et 2+0 en récipient 45-110*. Division de R-D sur les semences, boutures et plants, Service de l'amélioration des arbres, MER. 16 p.
- LANGLOIS, C.-G., 1990b. *Besoin hebdomadaire total en azote des épinettes noire et blanche 1+0 et 2+0 en récipient 45-110*. Division de R-D sur les semences, boutures et plants, Service de l'amélioration des arbres, MER. 16 p.
- LARSEN, H.S., D.B. SOUTH et J.M. BOYER, 1986. *Root growth potential, seedling morphology and bud dormancy correlate with survival of loblolly pine planted in December in Alabama*. Tree Physiology 1 : 253-263.
- MATTSSON, A., 1986. *Seasonal variation in root growth capacity during cultivation of container grown Pinus sylvestris seedlings*. Scand. J. For. Res. 1 : 473-482.
- MCCLAIN, K.M. et K.A. ARMSON, 1976. *Effect of water supply, nitrogen, and seedbed density on white spruce seedling growth*. Soil Sci. Soc. Am. J. 40 : 443-446.
- NAMBIAR, E.K.S., G.D. BOWEN et R. SANDS, 1979. *Root regeneration and plant water status of Pinus radiata D. on seedlings transplanted to different soil temperatures*. J. Exp. Bot. 30 (119) : 1119-1131.
- NAMBIAR, E.K.S., P.P. COTTERILL et G.D. BOWEN, 1982. *Genetic differences in the root regeneration of radiata pine*. J. Exp. Bot. 33(132) : 170-177.
- RITCHIE, G.A., 1985. *Root growth potential : principles, procedures and predictive ability*. Dans : Duryea, M.L. (éd.), 1985. Proceedings : Evaluating seedling quality : principles, procedures, and predictive abilities of major tests, October 16-18, 1984. Oregon State University, Corvallis.
- RITCHIE, G.A. et J.R. DUNLAP, 1980. *Root growth potential : Its development and expression in forest tree seedlings*. N. Z. J. For. Sci. 10(1) : 218-248.
- SIMPSON, D.G., 1988. *Fixing the Edsel - Can bareroot stock quality be improved ?* Dans : Landis, T.D., 1988 (techn. coord.). Proceedings, combined meeting of the Western Forest Nursery Associations ; 1988 Augusts 8-11 ; Vernon, British Columbia. Gen. Tech. Rep. RM-167 : 24-30.
- SIMPSON, D.G., 1990. *Frost hardiness, root growth capacity, and field performance relationships in interior spruce, lodgepole pine, Douglas-fir, and western hemlock seedlings*. Can. J. For. Res. 20 : 566-572.
- SIMPSON, D.G., A. VYSE et C.F. THOMPSON, 1988. *Root growth capacity effects on field performance*. USDA Forest Service, General Technical Report RM-167 : 119-121.
- STONE, E.C. et J.L. JENKINSON, 1971. *Physiological grading of ponderosa pine nursery stock*. J. For. 38 : 16-24.
- SUTTON, R.F., 1980. *Planting stock quality, root growth capacity, and field performance of three boreal conifers*. N. Z. J. For. Sci. 10(1) : 54-71.
- SUTTON, R.F., 1983. *Root growth capacity : relationship with field root growth and performance in outplanted jack pine and black spruce*. Plant and Soil 71 : 111-122.

- SUTTON, R.F., 1987. *Root growth capacity and field performance of jack pine and black spruce in boreal stand establishment in Ontario*. Can. J. For. Res. 17 : 794-804.
- SUTTON, R.F., 1990. *Root growth capacity in coniferous forest trees*. HortScience 25(3) : 259-266.
- TINUS, R.W., K.E. BURR, S.J. WALLNER et R.M. KING, 1986. *Relation between cold hardiness, root growth capacity, and bud dormancy in three Western conifers*. USDA For. Serv., Gen. Tech. Rep. RM-137 : 80-86.
- VAN DEN DRIESSCHE, R., 1980. *Effects of nitrogen and phosphorus fertilization on Douglas-fir nursery growth and survival after outplanting*. Can. J. For. Res. 10 : 65-70.
- VAN DEN DRIESSCHE, R., 1987. *Nursery growth of conifer seedlings using fertilizers of different solubilities and application time, and their forest growth*. Can. J. For. Res. 18 : 172-180.
- ZAERR, J.B., 1967. *Auxin and the root-regenerating potential in ponderosa pine seedlings*. Forest Sci. 13 : 258-264.

Annexe 1

Dispositif expérimental : été-automne 1991

Pépinière d'East-Angus (Tunnel n° 17)

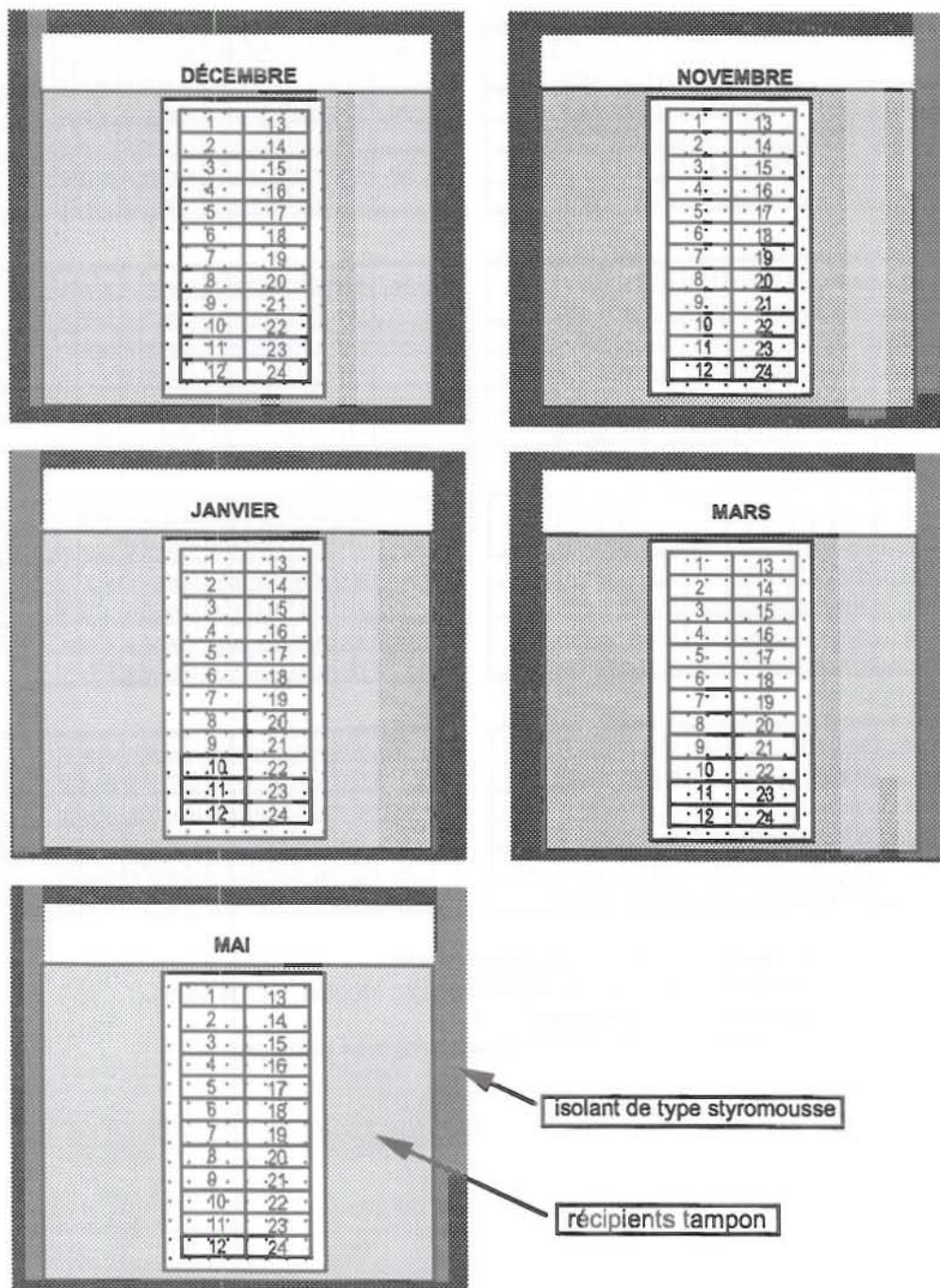
BLOC 1	Pr1	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	N3
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
	Pr2	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	N1
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
BLOC 4	Pr2	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	N5
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
	Pr1	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	N3
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
BLOC 2	Pr1	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	N1
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
	Pr2	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	N3
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
BLOC 3	Pr2	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	N5
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
	Pr1	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	N3
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
BLOC 4	Pr1	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	N1
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
	Pr2	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	N3
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	

- * N : régie nutritionnelle en parcelle principale (N1 à N5)
- * Pr : provenance génétique en parcelle secondaire (Pr1 = 88-I-20G ; Pr2 = 88-K-92G)
- * répétition à l'intérieur de quatre blocs
- * 30 multipots par bloc, par régie et par provenance répartis sur deux rangées

Annexe 2

Dispositif expérimental hiver-printemps 1992

Pépinière d'East-Angus (Tunnel n° 16)

Nord


note : Pour chaque date d'inventaire, les 24 traitements correspondent chacun à un récipient

(2 provenances X 3 régies azotées X 4 blocs) ont été répartis au hasard à l'intérieur des 24 cellules

Annexe 3

Analyse de variance (ANOVA)

Dispositif expérimental implanté à la pépinière d'East-Angus, été 1991

- Dispositifs en parcelles partagées (*split-plot*)
- Quatre blocs répartis aléatoirement
- Régies nutritionnelles (3) en parcelles principales
- Provenances génétiques (2) de l'épinette noire en sous-parcelles

Décomposition :

Source	Degré de liberté (D.L.)
Bloc	$(4-1) = 3$
Régie nutritionnelle	$(3-1) = 2$
Terme d'erreur en parcelle principale (bloc x régie)	$(4-1)(3-1) = 6$
Provenance	$(2-1) = 1$
Régie x Provenance	$(3-1)(2-1) = 2$
Terme d'erreur en sous-parcelle	$(4-1)(3-1)(2-1) = 6$

Annexe 4

Méthode d'échantillonnage et paramètres d'analyse

a. Dispositif été-automne 1991

ex : bloc 1, régie N1, provenance 88-I-20G

16	17	18*	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28*	29	30	<i>Multipots</i> choisis à l'intérieur des régies N1, N3 et N5
1	2	3	4	5	6	7	8	9*	10	11	12	13*	14	15	

* *Multipots* non retenus

a. Récoltes à l'intérieur des régies N1, N3 et N5

- 26 *Multipots* choisis au hasard
- cinq cavités choisies au hasard dans chaque *Multipot*, chacune correspondant à une date de récolte (identification à l'aide de marqueurs de couleur)

Total : par récolte et par régie et provenance, 26 plants échantillonnés :

- 18 servant aux mesures des paramètres morphologiques et des concentrations tissulaires en N, P et K ;
- six servant aux dosages des glucides solubles et de l'amidon dans les tiges et dans les racines ;
- deux servant aux dosages des acides aminés dans les tiges et dans les racines.

b. Dispositif hiver-printemps 1992

ex : Unité « JANVIER »

2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24
1	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21	23

Chaque *Multipot* est associé à une régie azotée (N1, N3 et N5), une provenance génétique (88I, 88K) et un bloc (1, 2, 3 et 4).

b.1. Méthode de création de la population de chaque *Multipot*

- à l'intérieur du dispositif été-automne 1991, récolte de deux plants au hasard dans les 11 premiers récipients de chaque rangée de 15 récipients en excluant les *Multipots* n^{os} 9, 13, 18 et 28, et d'un plant au hasard dans les *Multipots* n^{os} 14, 15, 29 ou 30 ;
- regroupement des 45 plants à l'intérieur d'un *Multipot*. Formation de l'unité « date » pour l'ensemble des 24 traitements (deux provenances x trois régies azotées x quatre blocs).

b.2. Récoltes des plants

- récoltes à cinq reprises : novembre et décembre 1991, janvier, mars et mai 1992 ;
- dans chacun des 24 *Multipots* d'une unité « date », choix au hasard de 38 plants pour réaliser les analyses suivantes :
 - . 12 plants servant à évaluer la CCR ;
 - . 18 plants servant à mesurer les paramètres morphologiques et physiologiques (N, P et K) ;
 - . six plants servant aux dosages des glucides solubles et de l'amidon dans les tiges et dans les racines ;
 - . deux plants servant aux dosages des acides aminés dans les tiges et dans les racines.

Note : les glucides solubles, l'amidon et les acides aminés feront l'objet d'un mémoire distinct.

Annexe 5

Acclimatation et optimisation des conditions de culture des plants en chambre de croissance

1. Acclimatation des plants

- Extraction des plants sous couvert de neige (deux provenances x trois régions x quatre blocs) et dégel progressif dans les cavités des récipients ; extraction de 12 plants par bloc et par traitement après 24 heures.

2. Préparation du substrat et empotage

- Préparation d'un mélange tourbe-vermiculite (v/v = 2 : 1) ;
- Ajustement du mélange à une densité de 0,08 g/cm³ ;
- Ajustement à la pépinière du taux d'humidité du substrat à 60 % 5 % (réalisé à l'aide d'une rampe d'arrosage) par l'emploi d'une charte d'humidité ayant intégré le poids de la tourbe sèche, le poids de l'eau contenue dans la tourbe saturée, le poids moyen du pot servant au repiquage et le poids moyen des plants après le dégel ;
- Repiquage manuel d'un plant par pot (type ZARN, 2,3 l) pour un total de 288 plants (deux provenances X trois régions X quatre blocs X 12 pots/bloc) par récolte ;
- Transport des plants à Agriculture Canada (Lennoxville) pour le suivi en chambre de croissance.

3. Optimisation des conditions culturales en chambre de croissance (aire de propagation)

- Ajustement de l'intensité lumineuse en début de saison (novembre) à 20-24 watts/m² ;
- Pots disposés aléatoirement dans un quadrilatère comprenant 12 rangées de 24 pots ;
- Acclimatation des plants et régie de température et de lumière programmée selon la chronologie suivante :

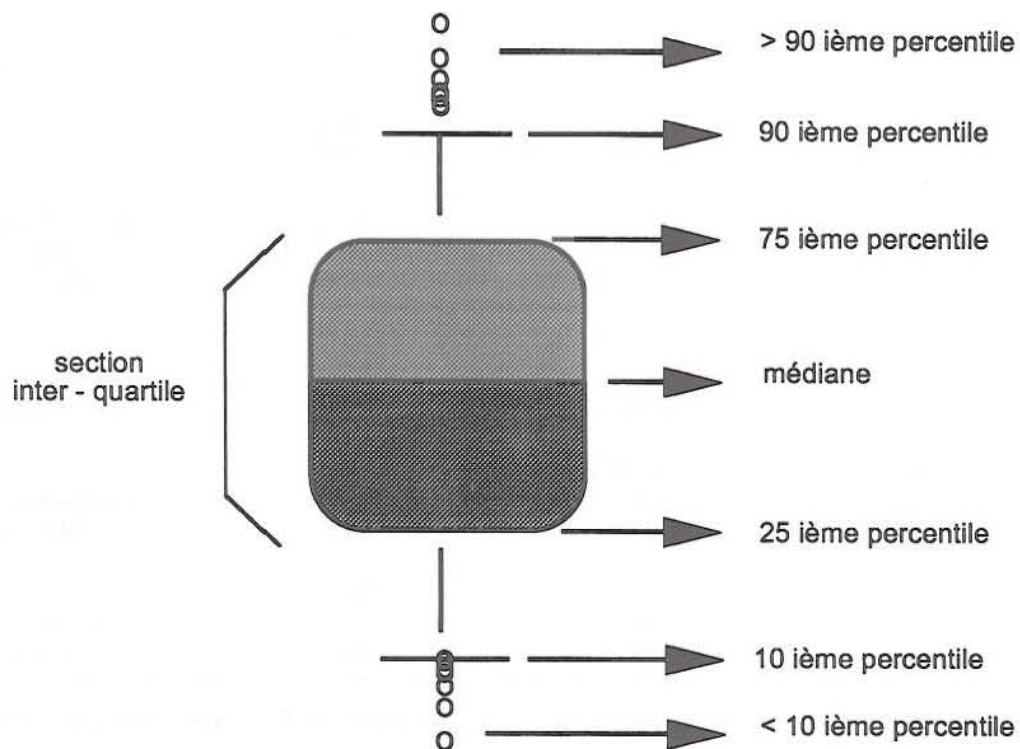
Jour	Heure	Température	Éclairage
1	17 h	4 C	Aucun
	21 h	6 C	
2	1 h	8 C	Lampes fluorescentes (<i>day light</i>) (9 h à 13 h)
	5 h	10 C	
	9 h	12 C	
	13 h	14 C	
	17 h	16 C	
	21 h	18 C	
3	1 h	20 C	Lampes au sodium (9 h à 0 h)
	5 h	22 c	
	9 h à 24 h	24 C	
4	0 h à 1 h	24 C	Lampes au sodium (9 h à 0 h)
	1 h à 9 h	18 C	
	9 h à 24 h	24 C	
5	0 h à 1 h	24 C	Lampes au sodium (9 h à 0 h)
	1 h à 9 h	18 C	
	9 h à 24 h	24 C	

- le test proprement dit (16 h de lumière à 24 °C ; 8 h de nuit à 18 °C) a une durée spécifique de 17 jours ; humidité de l'air : 60 % ± 2 % ;
- suivi du taux d'humidité du substrat tous les deux jours sur un sous-échantillon de 30 pots par le calcul du poids moyen et ajustement en fonction de la charte de référence.

4. Transport des plants par camion au laboratoire de morphophysiologie pour le dénombrement des racines blanches.

Annexe 6

Représentation d'un graphique en boîte (*box plot*) schématisant le décompte des racines blanches ≥ 1 cm de 96 plants d'un même calendrier de fertilisation (provenances confondues)



Pour rencontrer les objectifs de son programme de reboisement, le ministère des Ressources naturelles doit assurer, tous les printemps, la livraison de millions de plants. Pour s'assurer que les lots présentent un taux de reprise et une croissance adéquats dans les plantations, on les qualifie systématiquement, avant de les livrer en région, en se basant sur des critères morphologiques et phytosanitaires. Comme la reprise rapide des semis après la mise en terre demeure un des facteurs les plus importants de succès du reboisement, il est pertinent d'introduire de nouveaux critères de qualification physiologique mieux corrélés à la qualité des lots. Le Ministère mène donc des travaux de recherche et de développement qui visent à mieux caractériser le potentiel de croissance des racines, puis à éventuellement intégrer ce paramètre comme critère de qualification.

