Effets de différentes régies d'irrigation sur la croissance, la nutrition minérale et le lessivage des éléments nutritifs des semis d'épinette noire (1+0) produits en récipients à parois ajourées en pépinière forestière

Mohammed S. Lamhamedi, Hank Margolis, Mario Renaud, Linda Veilleux et Isabelle Auger

Résumé : En vue de diminuer de façon significative les apports en eau et le lessivage des éléments nutritifs lors de la production des semis d'épinette noire (1+0) (*Picea mariana* (Mill.) BSP), nous avons appliqué quatre régies d'irrigation (15, 30, 45 et 60 %, v/v) maintenues constantes tout au long de la première saison de croissance et contrôlées par réflectométrie dans le domaine temporel. La production de semis a été réalisée en pépinière forestière, sous tunnel, dans des récipients à parois ajourées (IPL 25–350A). En maintenant une fertilité du substrat (tourbe–vermiculite) similaire entre les régies d'irrigation, même à des teneurs en eau du substrat très faibles (15 et 30 %), les variables de croissance, d'architecture du système racinaire et de contenu en éléments nutritifs n'étaient pas affectées en fin de saison de croissance. Le suivi saisonnier des quantités d'eau utilisées démontre clairement qu'on peut réduire l'arrosage de 62 à 76 % par rapport à la régie d'irrigation 60 % sans affecter la croissance, l'architecture des racines et le statut nutritionnel des semis. Le lessivage de la solution du sol en fonction des régies d'irrigation s'ajuste à une fonction exponentielle. Les pourcentages moyens des pertes en eau par rapport aux quantités appliquées durant la période d'échantillonnage sont de 10, 7,1, 28,4 et 62,2 % respectivement pour les régies d'irrigation 15, 30, 45 et 60 %. En recevant les mêmes quantités de fertilisants au début du mois d'août en vue de maintenir la même fertilité du substrat, les pourcentages de pertes en azote minéral sont de 49,7, 35,9, 55,2 et 88,2 % respectivement pour les régies d'irrigation 15, 30, 45 et 60 %. Pour optimiser l'irrigation et diminuer le lessivage, un modèle dynamique de gestion de l'irrigation est proposé en tenant compte des stades de développement des semis d'épinette noire produits sous tunnels en pépinières forestières.

Abstract: To reduce the quantity of irrigation water used and the amount of mineral nutrients lost because of leaching, we used time domain reflectometry to monitor and maintain four irrigation regimes (15, 30, 45 and 60%, v/v) during the first growing season for 1+0 black spruce (*Picea mariana* (Mill.) BSP) seedlings. The seedlings were produced in air-slit containers (IPL 25–350A), filled with a peat substrate and were grown under a polyethylene tunnel at a forest nursery. Similar fertility levels were maintained in all four irrigation regimes even though the water content of the substrate could be very low (15 and 30%). Irrigation regime did not affect growth, root architecture or tissue nutrient contents at the end of the growing season. Monitoring water use over the course of the growing season clearly showed that the amount of irrigation water could be reduced by 62 to 76% without compromising seedling quality relative to the 60% irrigation regime. Leachate losses varied exponentially as a function of irrigation regime. The mean amount of water leached, relative to the quantity of water applied during the sampling period, was 10, 7.1, 28.4, and 62.2% for the 15, 30, 45, and 60% irrigation regimes, respectively. The losses of mineral nitrogen at the beginning of August were 49.7, 35.9, 55.2, and 88.2%, respectively, for the 15, 30, 45, and 60% irrigation regimes. To optimize irrigation and decrease leaching, a dynamic model for irrigation management is proposed that accounts for the phenological development of black spruce seedlings grown under tunnel conditions in forest nurseries.

Reçu le 23 octobre 2001. Accepté le 24 octobre 2002. Publié sur le site Web des Presses scientifiques du CNRC, à http://rcrf.cnrc.ca, le 30 janvier 2003.

M.S. Lamhamedi[1], M. Renaud, L. Veilleux et I. Auger. Direction de la recherche forestière, Forêt Québec, ministère des Ressources naturelles, 2700, rue Einstein, Sainte-Foy, QC G1P 3W8, Canada.
H. Margolis. Centre de recherche en biologie forestière, Faculté de Foresterie et de Géomatique, Pavillon Abitibi–Price, Université Laval, Sainte-Foy, QC G1K 7P4, Canada.

1. Auteur correspondant (courriel : mohammed.lamhamedi@mrn.gouv.qc.ca).

 doi: 10.1139/X02-171 © 2003 CNRC Canada

Introduction

Le récipient à parois ajourées (IPL 25–350A) a été développé pour produire des plants de fortes dimensions dont l'architecture des racines améliore la survie, l'ancrage et la stabilité après plantation (Gingras 1993; Gingras et Richard 1999). Cependant, le dessèchement rapide du substrat dans les cavités des récipients à parois ajourées et le souci de se conformer au Québec aux critères de concentration en azote dans le feuillage et dans les eaux souterraines (ministère de l'Environnement du Québec 1984; Bacon 1995; Hamilton et Helsel 1995; Thompson 1996) ont rendu la gestion de l'irrigation et de la fertilisation très complexe. Or, malgré l'utilisation à l'échelle opérationnelle des récipients à parois ajourées ayant un volume très réduit (<100 cm^3) dans les pays scandinaves (Lindström et Håkansson 1994), nos connaissances restent très limitées quant à la gestion et au contrôle de l'irrigation dans ce type de récipient possédant des cavités d'un volume de 350 cm^3.

La prise de décision en matière d'irrigation dans la majorité des pépinières, à l'échelle mondiale, s'appuie généralement sur des techniques (méthode de pesée des récipients, tensiomètres, chambre à pression, évaluation tactile…) peu précises et consommatrices de temps (Landis et al. 1989; Rundel et Jarrell 1991). Pour éviter des risques en terme de perte de croissance et de plants, les pépiniéristes tendent à maintenir des teneurs en eau du substrat au niveau de la rhizosphère oscillant entre 50 et 70 % (v/v). Le maintien de teneurs en eau élevées peut réduire la qualité du système racinaire (Dixon et al. 1983; Castellano et Molina 1989) en plus de favoriser le passage des racines d'une cavité à l'autre. Les conditions humides peuvent aussi retarder la formation des bourgeons, inhiber le déroulement des différentes phases subséquentes de dormance nécessaires à la résistance aux différents stress environnementaux et affecter la performance des plants en site de reboisement (Duryea 1984). De plus, les irrigations trop fréquentes peuvent entraîner, par lessivage, des pertes importantes d'éléments nutritifs et par conséquent une pollution de la nappe phréatique. D'un autre côté, des conditions de sécheresse peuvent causer une formation prématurée des bourgeons sans que les plants puissent atteindre, par exemple, la hauteur et le diamètre au collet souhaités. Ces variations d'humidité ont un effet direct sur la disponibilité en oxygène au niveau du substrat, l'allocation du carbone entre les différentes parties du plant, le statut nutritionnel et les échanges gazeux (Margolis et Brand 1990; Lamhamedi et Bernier 1994; Mitchell et Hinckley 1993; Heiskanen 1995; McMillin et Wagner 1995).

La mise en application récente de la réflectométrie dans le domaine temporel en pépinière forestière permet de faire un suivi précis et en temps réel des teneurs en eau au niveau de la rhizosphère (Lambany et al. 1996, 1997; Lamhamedi et al. 2000, 2001; Stowe 2001; Stowe et al. 2001). Ces travaux ont démontré que des régies constantes de teneurs en eau entre 25 et 45 % (v/v) pendant la saison de croissance n'avaient pas d'impact négatif sur la croissance et la physiologie des semis d'épinette blanche (1+0) (*Picea glauca* (Moench) Voss) produits dans les récipients à parois ajourées sous tunnel. Ces résultats suggèrent que la production de plants d'épinette noire (*Picea mariana* (Mill.) BSP), durant leur première saison de croissance (1+0) dans les récipients à parois ajourées, peut aussi se faire en diminuant de façon significative les apports en eau, sans affecter leurs caractéristiques morpho-physiologiques. Dans ce sens, des travaux récents ont démontré l'absence de différences significatives dans les échanges gazeux et les relations hydriques entre des écotypes d'épinette noire des arbres matures et des semis provenant des milieux humides et secs des provinces de l'Ontario et du Québec (Zine El Abidine et al. 1994*a*, 1994*b*). Ceci pourrait s'expliquer par la grande amplitude écologique de cette essence, allant des milieux très humides tourbeux aux sites pauvres, secs et rocailleux (Black et Bliss 1980; Lamhamedi et Bernier 1994). Malgré l'amélioration de nos connaissances sur les réponses morphologiques et physiologiques des semis d'épinette noire vis-à-vis du stress hydrique appliqué généralement pendant une très courte période (Grossnickle 2000; Lamhamedi et Bernier 1994; Zine El Abidine et al. 1994*b*; Zwiazek et Blake 1990*a*, 1990*b*), peu de travaux ont mis l'accent sur l'optimisation de l'irrigation en pépinière en relation avec le lessivage et l'effet du maintien de teneurs en eau et de la fertilité constantes du substrat, tout au long de la saison de croissance, sur la physiologie et la croissance des semis.

Les objectifs de cette étude consistent donc à (*i*) comparer l'effet de quatre régies d'irrigation (15, 30, 45 et 60 %, v/v) maintenues constantes tout au long de la première saison de croissance sur les variables de croissance, la nutrition minérale et l'architecture des racines des semis d'épinette noire (1+0), (*ii*) évaluer le lessivage des éléments minéraux en fonction des régies d'irrigation et (*iii*) proposer aux pépiniéristes un modèle de gestion de l'irrigation en fonction des stades de croissance des semis d'épinette noire. La gestion serrée de l'irrigation vise la production de semis de haute qualité et une contribution négligeable des pépinières à la pollution azotée des eaux souterraines.

Matériel et méthodes

Production des semis et conditions de croissance

L'expérience a été réalisée de juin à octobre 1999 au Centre de production de plants forestiers du Québec situé à Sainte-Anne-de-Beaupré, Québec, Canada (47° 02′ N., 70° 55′ O.), dans une production d'épinette noire 1+0 (provenance N0–031–20) cultivée sous tunnel non chauffé. L'ensemencement a été réalisé dans des récipients à parois ajourées (IPL 25–350A) dont les cavités étaient remplies d'un mélange de tourbe et de vermiculite (3:1, v/v) préalablement humecté et ajusté à une densité de 0,11 g/cm^3 (Lamhamedi et al. 2000). Après les opérations d'éclaircie et après avoir atteint une hauteur variant entre 2 et 3 cm, les semis ont été soumis à quatre régies d'irrigation (15, 30, 45 et 60 %; cm^3 H_2O/cm^3 substrat) maintenues constantes tout au long de la saison de croissance, soit du début du mois de juillet à octobre. Pour chaque régie d'irrigation, 162 récipients (27 récipients/bloc par régie) ont été utilisés pour les six blocs du dispositif expérimental. Chaque régie d'irrigation a été distribuée aléatoirement à l'intérieur de chaque bloc. Afin d'éliminer les effets de bordure, des zones tampons (27 récipients/zone) ont été installées aussi bien entre les régies d'irrigation qu'entre deux blocs consécutifs.

Les teneurs en eau ont été contrôlées par le MP-917 (ESI Environmental Sensors Inc., Victoria, C.-B.) dont le fonc-

© 2003 CNRC Canada

tionnement repose sur le principe de la réflectométrie dans le domaine temporel (Topp et al. 1984; Topp et Davis 1985). Dès la mi-juin et après éclaircie des semis, parmi les 27 récipients par bloc par régie, neuf récipients par bloc par régie d'irrigation ont été choisis aléatoirement en vue de déterminer la teneur en eau moyenne au niveau de la rhizosphère. Généralement, les teneurs en eau étaient homogènes dans tous les récipients et variaient entre 40 et 50 %. Dans chaque bloc et pour chaque régie d'irrigation, une sonde à double diode a été installée dans le récipient ayant une teneur en eau qui s'approchait le plus de celle de la moyenne des neuf récipients échantillonnés. Ce récipient a été installé par la suite au centre de chaque régie d'irrigation. La description et l'insertion des sondes spécifiques au récipient à parois ajourées sont décrites en détails dans nos récentes publications (Lamhamedi et al. 2000, 2001). Six sondes ont été installées en permanence pour chaque régie d'irrigation, soit un total de 24 sondes. L'uniformité des teneurs en eau a été assurée par l'utilisation d'un robot d'arrosage motorisé (modèle Aquaboom Harnois, Joliette Qué.) dont le coefficient d'uniformité varie entre 95 et 98 %. L'irrigation a été effectuée en fonction des teneurs en eau mesurées et du nombre de passages du robot nécessaires pour maintenir les teneurs en eau cibles. Chaque passage du robot permet une augmentation de teneur en eau moyenne de 0,9 %. Les procédures de contrôle et d'ajustement des régies d'irrigation sont décrites par Lambany et al. (1996, 1997).

Afin de faire ressortir l'effet de l'irrigation sur la croissance et la physiologie des semis d'épinette noire tout en éliminant les effets des interactions possibles régie d'irrigation × fertilité du substrat, la fertilité était maintenue relativement constante tout au long de la saison de croissance entre les régies d'irrigation. Pour ce faire, cette fertilité a été ajustée à chaque 2 semaines à l'aide du logiciel Plantec (Langlois et Gagnon 1993; Girard et al. 2001), qui tient compte de la croissance spécifique de cette essence et de l'effet de chaque régie d'irrigation sur la fertilité du substrat. Ainsi, la fertilité du substrat en azote a été maintenue constante entre les régies, tout en variant entre 40 et 90 ppm, selon le stade de croissance. La fertilité du substrat et le statut nutritionnel des plants ont été aussi déterminés à chaque 2 semaines. Les quantités d'azote appliquées durant la saison de croissance étaient de 42 mg/plant pour les régies d'irrigation 15 et 30 %, 43 mg pour la régie d'irrigation 45 % et 45 mg pour la régie 60 %.

Les variables environnementales, incluant les températures de l'air et du substrat et l'humidité relative, ont été enregistrées d'une façon continue par un système d'acquisition de données (modèle CR10X, Campbell Scientific, Logan, Utah). Durant la saison de croissance active (juillet et août) de 1999 et sous les conditions du tunnel, les températures moyennes de l'air et du substrat ont varié entre 14 et 26 °C, et l'humidité relative de l'air à 2 m entre 60 et 100 %. Afin de déterminer avec précision les quantités d'eau utilisées lors de l'irrigation et de la fertilisation, un pluviomètre (modèle TE525M, Texas Instruments, Dallas, Tex.) a été installé dans chacune des quatre régies d'irrigation.

Croissance des semis

Le suivi et l'analyse de la croissance des semis ont été réalisés suite à sept échantillonnages destructifs, à un intervalle régulier de 2 semaines, tout au long de la première saison de croissance de 1999 (19 juillet, 2, 16 et 30 août, 13 et 27 septembre et 11 octobre). Pour chaque date d'échantillonnage, un récipient a été choisi aléatoirement par régie et par bloc. Dans chacun de ces récipients, 12 semis parmi les 25 ont été choisis aléatoirement et doucement extirpés de leurs cavités. Après avoir mesuré la hauteur et le diamètre au collet, les masses des parties aériennes et des racines ont été déterminées après un séchage de 48 h dans une étuve, à 60 °C.

Nutrition minérale

Les concentrations des éléments minéraux (N, P, K, Ca et Mg) dans les substrats et dans les semis ont été déterminées à partir de six échantillons composites par régie d'irrigation dans chaque bloc. Un échantillon composite a été constitué de 12 semis ou par le substrat obtenu à partir du mélange de 12 cavités choisies aléatoirement dans un même récipient. Pour l'azote, les différents échantillons de racines ou de parties aériennes ont été minéralisés avec l'acide sulfurique en présence de sélénium et de peroxyde dans des tubes à digestion, à 370 °C. Par la suite, l'azote (sous forme d'ammonium) a été déterminé en utilisant un spectrophotomètre à flux continu (modèle QuickChem 8000, Lachat Instruments, Milwaukee, Wis.). Les autres éléments (P, K, Ca et Mg) ont été directement dosés dans la solution d'acide sulfurique diluée, à l'aide d'un spectromètre d'émission atomique au plasma (modèle ICAP 9000, Thermo Instruments, Franklin, Mass.). Quant au substrat tourbeux, le dosage des éléments nutritifs a été réalisé suite à une extraction à l'eau par compression. Les méthodes d'analyse de ces éléments minéraux sont décrites en détails par Walinga et al. (1995).

La conductivité du substrat a été déterminée à partir de l'extrait filtré d'une suspension substrat–eau (1:20) à l'aide d'un conductivimètre (modèle CDM83, Radiometer, Copenhagen, Danemark) selon la procédure décrite par Kalra et Maynard (1992).

Les analyses minérales du substrat et des plants ont été effectuées par le laboratoire de chimie inorganique du Service des expertises scientifiques de la Direction de la recherche forestière (Forêt Québec, ministère des Ressources naturelles).

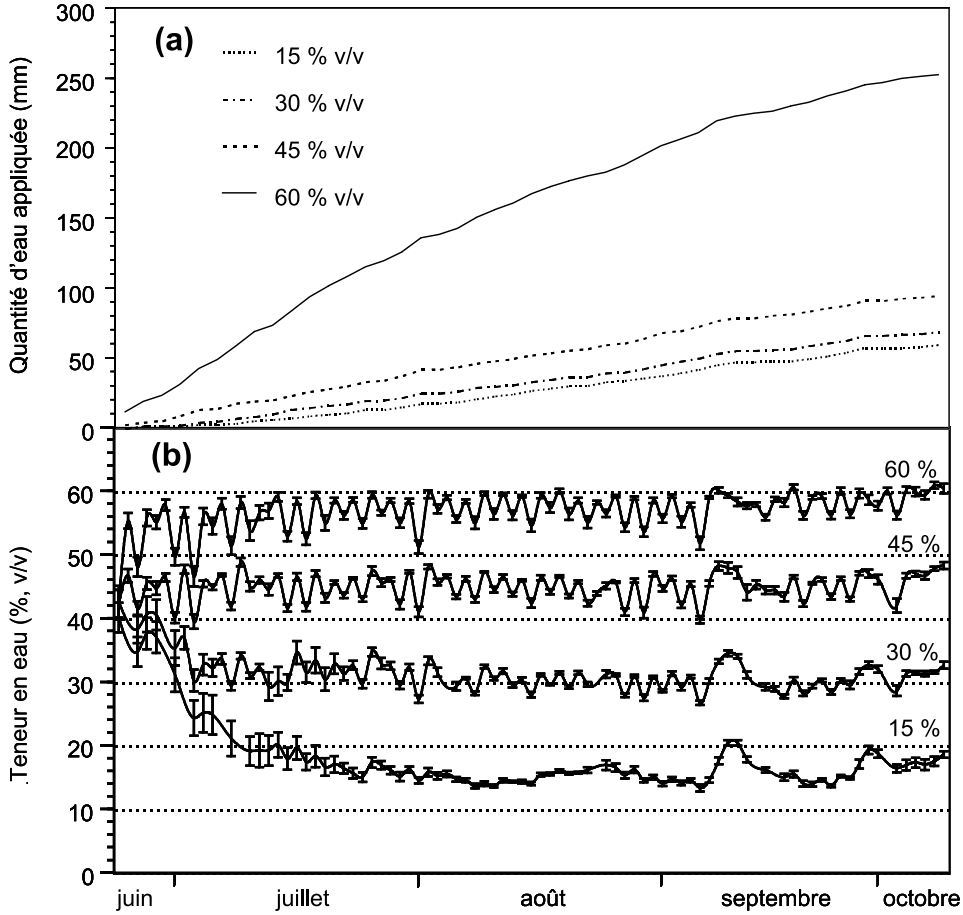
L'effet de chaque régie d'irrigation sur le statut nutritionnel des semis d'épinette noire à la fin de la première saison de croissance a été évalué en utilisant l'analyse vectorielle (Haase et Rose 1995; Imo et Timmer 1998). Cette analyse donne un diagnostic précis du statut nutritionnel intégrant la croissance exprimée en termes de biomasse, la concentration et le contenu en éléments nutritifs. L'importance de la déficience, de la dilution, de la suffisance, de la consommation de luxe ou de l'excès est indiquée par la direction et la longueur du vecteur. Cette analyse vectorielle permet en même temps de vérifier notre hypothèse à savoir que les différences de croissance et de physiologie observées entre les régies d'irrigation sont dues uniquement à l'effet de la teneur en eau du substrat au niveau de la rhizosphère.

Architecture des racines

L'architecture des racines a été caractérisée tout au long

© 2003 CNRC Canada

Fig. 1. (*a*) Quantité d'eau cumulative utilisée durant la saison de croissance en fonction des régies d'irrigation évaluées. (*b*) Contrôle de la teneur en eau au niveau de la rhizosphère des semis d'épinette noire (1+0) produits dans les récipients à parois ajourées sous différentes régies d'irrigation (15, 30, 45 et 60 %, v/v). Chaque barre représente l'erreur type de la moyenne (n = 6).



de la saison de croissance en mesurant la longueur, le diamètre, le volume et la surface des racines à l'aide d'un système intégré de numérisation et d'analyse d'images utilisant le logiciel WINRHIZO (Instruments Regent Inc., Québec, Qué.). Afin de mieux cerner l'effet de la régie d'irrigation sur la croissance des racines en fonction de leur grosseur, les trois variables (longueur, surface et volume) ont été mesurées sur tous les plants sélectionnés, et un classement des données a été effectué par la suite en fonction des quatre classes de diamètre (classe 1, <0,25 mm; classe 2, 0,25–0,50 mm; classe 3, 0,50–0,75 mm et classe 4, >0,75 mm). Pour chaque date d'échantillonnage, six plants par récipient ont été choisis aléatoirement par bloc et par régie d'irrigation, soit un total de 36 plants par régie d'irrigation. Après avoir été lavées, les racines ont été colorées dans une solution de fuchsine (0,005 %) à la température du laboratoire pour une durée approximative de 5 min selon l'approche développée par Lambany et Veilleux (1999). Cette coloration facilite la numérisation de toutes les racines blanches afin d'éviter tout biais dans la détermination des variables caractérisant l'architecture des racines.

Lessivage des éléments minéraux

Le lessivage des éléments minéraux ($N\text{-}NO_3$, $N\text{-}NH_4$, P, K, Ca et Mg) a été déterminé en analysant la solution lessivée, collectée dans un récipient par bloc par régie d'irrigation. Pour chaque récipient échantillonné, la solution lessivée à partir des 25 cavités du récipient a été collectée dans un quadrat en plastique muni à sa base d'une bouteille. La collecte du lessivage a été effectuée 30 min après chaque fertilisation ou irrigation, à différentes dates d'échantillonnage en 1999 (9, 11, 13 et 30 août; 1, 3, 20 et 24 septembre). Les échantillons étaient conservés au froid à 4 °C tout en respectant les précautions suggérées par Landis et al. (1989). Les analyses minérales ont été effectuées par le laboratoire du Service des expertises scientifiques de la Direction de la recherche forestière (Forêt Québec, ministère des Ressources naturelles).

Analyses statistiques

Le dispositif expérimental est en parcelles partagées avec six blocs. Le facteur régie d'irrigation a été distribué aléatoirement dans les parcelles principales à l'intérieur de chaque bloc et le facteur date d'échantillonnage a été randomisé dans les sous-parcelles à l'intérieur de chaque parcelle principale. Les dates d'échantillonnage ont été randomisées parmi les récipients (unités expérimentales) et les mesures ont été prises sur 12 à 6 plants par récipient (unité d'échantillonnage) respectivement pour les variables morphologiques et d'architecture des racines. En utilisant la moyenne

© 2003 CNRC Canada

Tableau 1. Probabilités observées des effets fixes ($P > F$) et aléatoires ($P > |Z|$) associées à l'analyse de la variance, ainsi que les comparaisons entre les régies d'irrigation (15, 30, 45 et 60 %, v/v) pour la hauteur, le diamètre au collet et les masses sèches de la partie aérienne, des racines et totale des semis d'épinette noire (1+0).

Source de variation	dln	dld	Hauteur	Diamètre	Masse sèche de la partie aérienne	Masse sèche des racines	Masse sèche totale
Effets fixes ($P > F$)							
Régie d'irrigation (RI)	3	19,8	0,0026	0,0036	0,0130	0,0072	<0,0001
60 vs 45 %	(1)	19,7	0,0808	0,0252	0,0102	0,0576	0,0002
45 vs 30 %	(1)	19,7	0,3413	0,5656	0,6071	0,1168	0,7728
15 vs (30 et 45 %)	(1)	19,9	0,0003	0,0005	0,0059	0,0677	0,0001
Date (D)	6	118,9	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
RI × D	18	118,9	0,0281	0,0050	<0,0001	0,0279	0,0046
D × (60 vs 45 %)	(6)	118,8	0,2909	0,0320	<0,0001	0,2102	0,0089
D × (45 vs 30 %)	(6)	118,8	0,5601	0,7275	0,7931	0,7463	0,7710
D × (15 vs (30 et 45 %))	(6)	119,0	0,0009	0,0020	<0,0001	0,1629	0,0023
Effets aléatoires ($P > \|Z\|$)							
Bloc (B)			nd	nd	0,3668	0,1620	0,3358
B × RI			0,0088	0,0122	0,0239	0,1328	0,0597
Erreur résiduelle			<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001

Nota : dln, degrés de liberté au numérateur, les dln entre parenthèses sont pour les contrastes. dld, degrés de liberté au dénominateur, les dld présentés sont ceux pour la hauteur. Les dld varient de 19,8 à 119,1 pour le diamètre; de 14,9 à 119,1 pour la masse sèche de la partie aérienne; de 60,6 à 64,7 pour la masse sèche des racines; de 49,4 à 68,7 pour la masse sèche totale. nd, non déterminé.

par unité expérimentale, le modèle statistique utilisé pour l'analyse de la variance était :

$$y_{ijk} = \mu + \tau_i + b_j + (\tau b)_{ij} + \delta_k + (\tau\delta)_{ik} + e_{ijk}$$

où y_{ijk} est valeur moyenne pour le traitement d'irrigation i dans le bloc j à la date d'échantillonnage k, μ est la moyenne générale, τ_i est l'effet du traitement d'irrigation i, b_j est l'effet aléatoire du bloc j, $(\tau b)_{ij}$ est l'effet aléatoire de l'interaction entre le traitement i et le bloc j (erreur associée à la parcelle principale), δ_k est l'effet de la date d'échantillonnage k, $(\tau\delta)_{ik}$ est l'effet de l'interaction entre le traitement d'irrigation i et la date d'échantillonnage k et e_{ijk} est l'erreur associée à la valeur moyenne y_{ijk} (erreur associée à la sous-parcelle).

L'effet de la régie d'irrigation a été décomposé en trois contrastes. Si l'interaction entre la date d'échantillonnage et le traitement d'irrigation était significative, les contrastes sur les traitements étaient effectués pour chacune des dates permettant de mieux cerner les périodes où les régies d'irrigation se différencient quant à leur effet sur la croissance des semis. La méthode de comparaisons multiples de Bonferroni a été utilisée pour déterminer le seuil de signification théorique ($\alpha = 0{,}05$ par nombre de comparaisons effectuées). Pour les effets fixes, le seuil de signification retenu est de 5 %.

Les analyses statistiques ont été effectuées en utilisant la procédure mixte de SAS 6,08 (SAS Institute, Cary, C.N.) (Littell et al. 1996). L'hypothèse de la normalité des termes d'erreur était respectée pour toutes les variables. Les hypothèses de normalité et d'homogénéité des variances ont été vérifiées. L'indépendance entre les dates de récoltes a été supposée puisque celles-ci ont été randomisées et que les mesures étaient prises sur des plants différents à chaque date.

Résultats

Contrôle des régies d'irrigation et quantités d'eau utilisées

À la fin de la première saison de croissance et sous les conditions environnementales du tunnel, les quantités d'eau cumulatives utilisées ont été de 60, 69, 95 et 253 mm pour maintenir respectivement les régies d'irrigation souhaitées de 15, 30, 45 et 60 % (fig. 1*a*). Le maintien des régies d'irrigation 15, 30 et 45 % a nécessité respectivement 24, 27 et 38 % de la quantité d'eau appliquée dans le cas de la régie d'irrigation 60 %.

L'utilisation du robot comme système d'arrosage et du MP-917 a permis de maintenir les quatre régies d'irrigation (15, 30, 45 et 60 %) tout au long de la saison de croissance (fig. 1*b*). Les niveaux de teneurs en eau du substrat des régies d'irrigation 30, 45 et 60 % ont été atteints dès la fin du mois de juin alors que celui de la régie d'irrigation 15 % n'a été atteint que vers la mi-juillet. La régie d'irrigation 60 % a atteint de manière épisodique le niveau souhaité de 60 % de contenu en eau avant irrigation. Durant la période s'étalant de la mi-juillet jusqu'au début octobre, la moyenne des teneurs en eau du substrat avant irrigation a respectivement atteint 15,5, 29,6, 43,3 et 55,6 %, pour les régies d'irrigation 15, 30, 45 et 60 %. Par contre, après irrigation et pour la même période, cette moyenne a respectivement atteint 16,3, 31,6, 46,3 et 59 % pour les mêmes régies d'irrigation évaluées.

© 2003 CNRC Canada

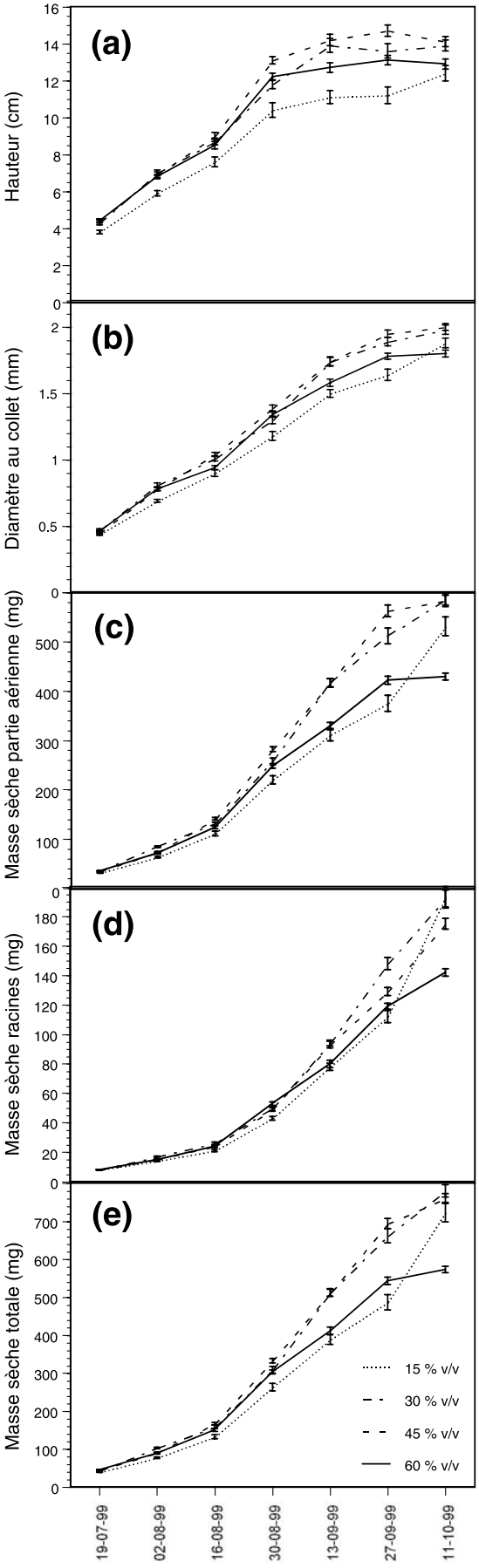


Fig. 2. Variations saisonnières de la hauteur (*a*), du diamètre au collet (*b*), de la masse sèche des parties aériennes (*c*), de la masse sèche des racines (*d*) et de la masse sèche totale (*e*) des semis d'épinette noire (1+0) produits dans les récipients à parois ajourées en fonction des régies d'irrigation évaluées (15, 30, 45 et 60 %, v/v). Chaque barre représente l'erreur type de la moyenne (n = 72).

Croissance des semis

La régie d'irrigation a affecté significativement les variables de croissance des semis d'épinette noire plus particulièrement, la hauteur (P = 0,0026), le diamètre au collet (P = 0,0036), les masses sèches de la partie aérienne (P = 0,0130), des racines (P = 0,0072), des aiguilles (P = 0,0261) et du plant entier (P < 0,0001) (tableau 1, fig. 2). Les comparaisons entre les régies d'irrigation effectuées à l'aide des contrastes ont révélé l'absence de différences significatives entre les régies d'irrigation 30 et 45 % durant toute la saison de croissance concernant les variables évaluées. Les semis produits sous la régie d'irrigation 45 % ont montré une masse sèche totale significativement supérieure à celle des semis de la régie d'irrigation 60 %. La comparaison de la régie d'irrigation 15 % avec l'effet moyen des régies d'irrigation (30 et 45 %) montre que chez les semis produits sous la régie d'irrigation 15 %, la croissance en hauteur et en diamètre ainsi que les masses sèches totale et de la partie aérienne étaient significativement inférieures à celle des deux régies.

Toutes les variables de croissance ont été influencées significativement par la date d'échantillonnage (P < 0,0001). L'interaction régime d'irrigation (RI) × date (D) était significative pour toutes les variables de croissance évaluées indiquant que l'effet de la régie d'irrigation a varié en fonction de la date d'échantillonnage. À l'intérieur de cette interaction, la comparaison par date de la régie 60 % vs la régie 45 % (D × (60 vs 45 %)) a révélé que la régie 45 % avait des masses sèches de la partie aérienne et totale significativement supérieures à celles de la régie 60 %, mais ces différences étaient plus prononcées à la dernière date d'échantillonnage (P = 0,0021 à <0,0001). Tout au long de la saison de croissance, la comparaison D × (30 vs 45 %) a montré que les semis soumis à ces deux régies avaient des variables de croissance similaires. L'effet moyen des régies (45 et 30 %) diffère significativement de celui de la régie d'irrigation 15 %, mais ces différences n'ont été observées que vers la fin de la saison de croissance.

Nutrition minérale

À l'exception du potassium dans les parties aériennes, les concentrations des éléments minéraux dans les parties aériennes et dans les racines sont significativement influencées par la régie d'irrigation et par la date d'échantillonnage (tableaux 2 et 3). Le degré de signification de l'interaction RI × D, à l'exception du phosphore des parties aériennes, montre clairement que l'effet de la régie d'irrigation sur les concentrations des éléments nutritifs des parties aériennes et des racines varie au cours de la saison de croissance des semis d'épinette noire.

Pour les éléments minéraux des parties aériennes, les contrastes révèlent que la régie d'irrigation 45 % a toujours

© 2003 CNRC Canada

Tableau 2. (A) Probabilités observées des effets fixes ($P > F$) et aléatoires ($P > |Z|$) associées à l'analyse de la variance, ainsi que les comparaisons entre les régies d'irrigation (15, 30, 45 et 60 %, v/v) et (B) valeurs moyennes (± erreur type) lors de la dernière date d'échantillonnage pour les concentrations en éléments minéraux des parties aériennes des semis d'épinette noire (1+0) produits dans les récipients à parois ajourées.

(A) Probabilités observées.

Source de variation	dln	dld	Azote	Phosphore	Potassium	Calcium	Magnésium
Effets fixes ($P > F$)							
Régie d'irrigation (RI)	3	135	<0,0001	0,0007	0,0652	<0,0001	<0,0001
60 vs 45 %	(1)	135	<0,0001	0,0004	0,3160	0,0001	0,0558
45 vs 30 %	(1)	135	0,0194	0,7051	0,4361	0,9328	0,0014
15 vs (30 et 45 %)	(1)	135	0,0001	0,1745	0,0113	0,2149	0,0001
Date (D)	6	135	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
RI × D	18	135	<0,0001	0,3696	0,0381	<0,0001	0,0004
D × (60 vs 45 %)	(6)	135	0,1040	0,7942	0,8175	0,0005	0,3985
D × (45 vs 30 %)	(6)	135	0,2641	0,6325	0,3843	0,1487	0,0109
D × (15 vs (30 et 45 %))	(6)	135	<0,0001	0,0458	0,0299	0,0006	0,0149
Effets aléatoires ($P > \|Z\|$)							
Bloc (B)			0,0760	0,4660	nd	nd	0,2434
B × RI			nd	0,1020	0,0129	0,0298	0,2696
Erreur résiduelle			<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001

(B) Valeurs moyennes.

Régie d'irrigation	Azote (%)	Phosphore (%)	Potassium (%)	Calcium (%)	Magnésium (%)
15 %	2,27±0,11	0,35±0,00	0,98±0,01	0,24±0,01	0,17±0,01
30 %	2,12±0,08	0,35±0,01	0,99±0,02	0,26±0,01	0,15±0,01
45 %	1,93±0,03	0,35±0,01	1,02±0,02	0,27±0,00	0,14±0,00
60 %	1,88±0,07	0,32±0,01	1,03±0,01	0,30±0,01	0,14±0,00

Nota : dln, degrés de liberté au numérateur, les dln entre parenthèses sont pour les contrastes. dld, degrés de liberté au dénominateur, les dld présentés sont ceux pour l'azote. Les dld varient de 15 à 120 pour le phosphore et le magnésium, de 20 à 120 pour le potassium et le calcium. nd, non déterminé. Pour les valeurs moyennes des concentration, n = 6 échantillons composites.

conféré aux semis une concentration en phosphore significativement supérieure à celle des semis produits sous la régie d'irrigation 60 %. À l'exception du magnésium (P = 0,0014), les parties aériennes des semis soumis aux régies d'irrigation 30 et 45 % n'ont pas montré des concentrations foliaires différentes en N, P, K et Ca. La comparaison des moyennes entre la régie d'irrigation 15 % et l'effet moyen des régies d'irrigation 30 et 45 % a montré la présence de différences significatives concernant certains éléments minéraux (N, K et Mg).

En ce qui concerne les concentrations des éléments majeurs (N, P et K) dans les racines, des différences marquées entre les régies d'irrigation, D × (15 vs (30 et 45 %)), ont été observées à la fin de la saison de croissance pour l'azote (P = 0,0002 à <0,0001) et en début de saison de croissance pour le phosphore (P < 0,0001). En terme de contenu des éléments minéraux, l'évolution des éléments majeurs était similaire entre les régies d'irrigation, sauf en fin de saison de croissance où la régie d'irrigation 60 % a montré un contenu faible en azote par comparaison aux autres régies d'irrigation (15, 30 et 45 %) (résultats non montrés).

Malgré la présence de différences en terme de concentration des éléments minéraux, l'analyse vectorielle des éléments minéraux majeurs (N, P et K) effectuée entre le début et la fin de la saison de croissance a montré la présence des effets de dilution et de suffisance indiquant ainsi que ces trois éléments nutritifs n'étaient pas limitants (fig. 3). Seule la régie d'irrigation 15 % a eu un effet de suffisance en termes d'azote et de phosphore. Cette suffisance est caractérisée par une augmentation de la masse sèche du plant (croissance) et du contenu relatif. Pour tous les éléments nutritifs (N, P et K), les trois régies d'irrigation (30, 45 et 60 %) ont eu un effet de dilution très marqué accompagné par une augmentation de croissance et d'absorption tandis que la concentration a montré une baisse relativement variable en fonction de l'élément nutritif.

Architecture des racines

Les régies d'irrigation ont affecté significativement la longueur (P = 0,0429), le diamètre (P < 0,0001) et le volume total (P = 0,0202) des racines des semis d'épinette noire produits dans les récipients à parois ajourées. Toutes les variables qui caractérisent l'architecture des racines ont été influencées significativement par la date d'échantillonnage (P < 0,0001). L'interaction RI × D n'était significative que pour le diamètre des racines indiquant que la croissance des racines en termes de longueur et de volume est directement liée à la teneur en eau au niveau de la rhizosphère tout au long de la saison de croissance. Les contrastes révèlent que les régies d'irrigation 15 % et la moyenne des régies d'irrigation (30 et 45 %) diffèrent significativement durant toute la saison de croissance quant à leur effet sur la longueur des racines, ainsi que sur celle du diamètre en fin de saison de croissance. Lors de la dernière date d'échantil-

© 2003 CNRC Canada

Tableau 3. (A) Probabilités observées des effets fixes ($P > F$) et aléatoires ($P > |Z|$) associées à l'analyse de la variance, ainsi que les comparaisons entre les régies d'irrigation (15, 30, 45, et 60%, v/v) et (B) valeurs moyennes (± erreur type) lors de la dernière date d'échantillonnage pour les concentrations en éléments minéraux des racines des semis d'épinette noire (1+0) produits dans les récipients à parois ajourées.

(A) Probabilités observées.

Source de variation	dln	dld	Azote	Phosphore	Potassium	Calcium	Magnésium
Effets fixes ($P > F$)							
Régie d'irrigation (RI)	3	15	<0,0001	0,0070	0,0003	0,0001	0,0055
60 vs 45 %	(1)	15	0,0043	0,0080	0,9862	0,0214	0,0309
45 vs 30 %	(1)	15	0,0224	0,3159	0,0344	0,0017	0,4247
15 vs (30 et 45 %)	(1)	15	<0,0001	0,0024	0,0006	<0,0001	0,0057
Date (D)	5	100	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
RI × D	15	100	0,0061	0,0004	0,0031	0,0401	0,0004
D × (60 vs 45 %)	(5)	100	0,2856	0,3314	0,6152	0,0230	0,0114
D × (45 vs 30 %)	(5)	100	0,9082	0,0191	0,0221	0,1952	0,0001
D × (15 vs (30 et 45 %))	(5)	100	0,0004	0,0001	0,0218	0,4977	0,1759
Effets aléatoires ($P > \|Z\|$)							
Bloc (B)			0,0784	nd	nd	0,3974	0,3566
B × RI			0,3384	0,0710	0,0369	0,2518	nd
Erreur résiduelle			<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001

(B) Valeurs moyennes.

Régie d'irrigation	Azote (%)	Phosphore (%)	Potassium (%)	Calcium (%)	Magnésium (%)
15 %	2,28±0,15	0,51±0,01	1,13±0,04	0,34±0,02	0,22±0,01
30 %	2,01±0,08	0,55±0,02	1,15±0,03	0,31±0,00	0,22±0,00
45 %	1,86±0,06	0,53±0,01	1,18±0,02	0,31±0,01	0,23±0,01
60 %	1,81±0,09	0,49±0,02	1,12±0,05	0,28±0,00	0,21±0,00

Nota : dln, degrés de liberté au numérateur, les dln entre parenthèses sont pour les contrastes. dld, degrés de liberté au dénominateur, les dld présentés sont ceux pour l'azote. Les dld varient de 20 à 100 pour le phosphore et le potassium, de 15 à 100 pour le calcium et pour le magnésium le dld est de 115. nd, non déterminé. Pour les valeurs moyennes des concentration, n = 6 échantillons composites.

lonnage (27 septembre), la longueur des racines a atteint 428, 464, 480 et 470 cm alors que la surface des racines était de 92, 99, 96 et 91 cm^2 respectivement pour les régies d'irrigation 15, 30, 45 et 60 %. Les quatre régies d'irrigation n'ont commencé à affecter de façon significative les variables d'architecture des racines (longueur, surface et volume), en fonction des quatre classes de diamètre, qu'à partir de la fin du mois d'août. Par exemple, en fin de saison de croissance, les contrastes réalisés à l'intérieur de chaque classe de diamètre montrent que les racines de la régie d'irrigation 60 % ont toujours une surface d'absorption plus faible par comparaison aux autres régies d'irrigation (15, 30, 45 %) (fig. 4).

Lessivage des éléments nutritifs et conductivité électrique

Le volume de la solution du sol lessivée varie d'une façon exponentielle en fonction de l'augmentation de la teneur en eau du substrat (fig. 5*a*). Les pertes moyennes en eau par rapport aux quantités appliquées durant la période d'échantillonnage sont de 10, 7,1, 28,4 et 62,2 % respectivement pour les régies d'irrigation 15, 30, 45 et 60 %. Ces pertes sont généralement accompagnées par un lessivage des éléments nutritifs. Par exemple, lorsque les régies d'irrigation ont reçu les mêmes quantités de fertilisants au début du mois d'août en vue de maintenir la même fertilité du substrat, les pertes en azote minéral sont de 49,7, 35,9, 55,2 et 88,2 % respectivement pour les régies d'irrigation 15, 30, 45 et 60 % (fig. 5*b*). En plus du lessivage des anions, des pertes de cations (K, Ca et Mg) dans la solution lessivée ont été détectées et varient en fonction des régies d'irrigation.

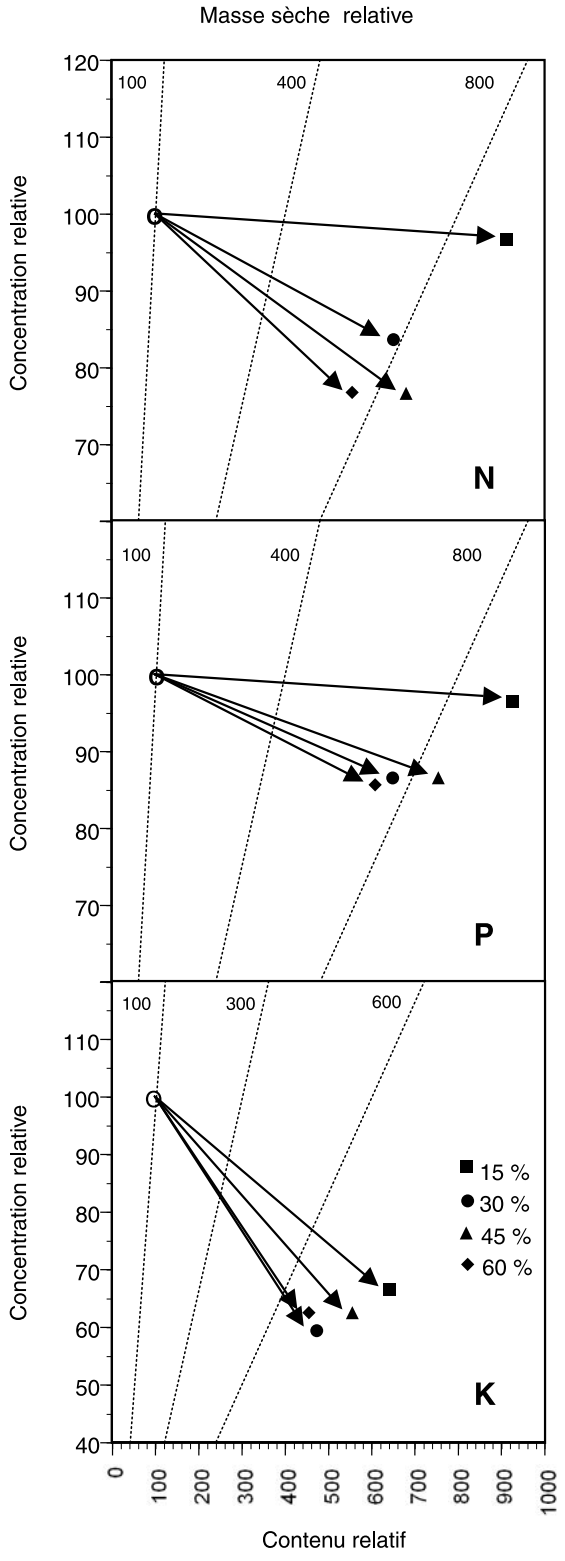
Le maintien de teneurs en eau constantes tout au long de la saison de croissance a engendré de légères accumulations de sels, différentes en fonction de la régie d'irrigation. À la dernière date d'échantillonnage, la conductivité électrique du substrat a atteint respectivement 182, 152, 135 et 78 µS/cm pour les régies d'irrigation 15, 30, 45 et 60 %.

Discussion

Le suivi des variables de croissance des semis d'épinette noire (1+0) produits dans les récipients à parois ajourées (IPL 25–350A) durant la première saison de croissance active a révélé que les quantités d'eau utilisées en pépinière peuvent être diminuées significativement sans affecter la qualité des semis. Même à des teneurs en eau du substrat très faibles (15 et 30 %, v/v) maintenues constantes tout au long de la saison de croissance, les variables de croissance et le contenu en éléments nutritifs n'étaient pas affectés en fin de saison de croissance (fig. 2*a*–2*e*). Le suivi saisonnier des quantités d'eau utilisées démontre clairement qu'on peut ré-

© 2003 CNRC Canada

Fig. 3. Analyse vectorielle du statut nutritionnel des semis d'épinette noire (1+0) produits dans les récipients à parois ajourées en fonction des régies d'irrigation évaluées (15, 30, 45 et 60 %, v/v). Le point de référence (100) représente l'état des semis à la première date d'échantillonnage (19 juillet 1999) tandis que le point d'arrivée indique le statut nutritionnel à la fin de la saison de croissance (dernière date d'échantillonnage, 11 octobre 1999).



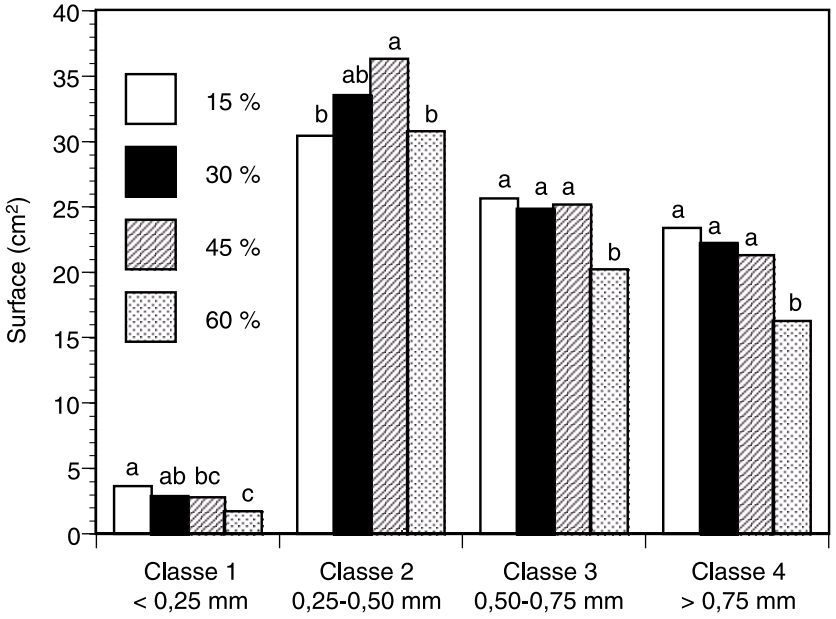
duire l'arrosage de 62 à 76 % par rapport à la régie d'irrigation 60 % tout en permettant aux plants d'épinette noire d'atteindre la croissance ciblée durant la première saison de croissance. Buxton et al. (1985) ont observé que, suite à l'application d'un stress hydrique, les teneurs en eau du substrat étaient plus élevées dans la rhizosphère des semis d'épinette noire par comparaison à celles des semis d'épinette blanche et du pin gris (*Pinus banksiana* Lamb). Ceci laisse présager que l'épinette noire peut utiliser moins d'eau même en période de sécheresse. Par ailleurs, l'accumulation importante des masses sèches des parties aériennes et surtout des racines, en fin de saison de croissance, chez les semis de la régie d'irrigation 15 % par rapport aux autres régies d'irrigation (fig. 3*c*–3*d*) pourrait être attribué aux différences entre les régies quant à leur effet sur la cinétique d'allocation du carbone entre la partie aérienne et les racines (Lamhamedi et al. 2001).

À l'inverse de nos récents résultats observés chez les semis d'épinette blanche (Lamhamedi et al. 2001) en fin de saison de croissance, les semis d'épinette noire soumis à la régie d'irrigation 60 % ont montré une faible croissance par rapport aux autres régies d'irrigation évaluées. Malgré des contenus en éléments nutritifs inférieurs sous la régie d'irrigation 60 % par rapport à ceux observés chez les semis croissant sous les autres régies d'irrigation évaluées, la direction des vecteurs correspondant aux éléments majeurs (N, P et K) montre des effets de dilution ou de suffisance indiquant que les différences de croissance observées ne sont pas liées à un effet limitant dû aux éléments nutritifs, mais plutôt à l'effet de la teneur en eau au niveau de la rhizosphère des racines. Timmer et Miller (1991) ont démontré que la croissance, le statut nutritionnel et les relations hydriques des semis du pin rouge (*Pinus resinosa* Ait.) sont plus influencés par l'irrigation que par la fertilisation. La croissance appréciable des semis d'épinette noire observée sous les quatre régies d'irrigation démontre clairement la plasticité de cette essence vis-à-vis du régime hydrique, ainsi que sa tolérance aux conditions de saturation non prolongées du sol par comparaison aux semis d'épinette de Sitka (*Picea sitchensis* (Bong.) Carrière), du pin sylvestre (*Pinus sylvestris* L.) et du mélèze européen (*Larix decidua* Mill.) (Zinkan et al. 1974; Crawford 1976; Levan et Riha 1986). Ces conditions saturées en eau limitent la disponibilité d'oxygène, la croissance des racines, l'absorption des éléments majeurs, la photosynthèse et la formation des aiguilles (Tang et Kozlowski 1983; Kozlowski 1997), ce qui explique la baisse de croissance et du contenu en éléments nutritifs des semis vers la fin de la saison de croissance sous la régie d'irrigation 60 %. Même si l'épinette noire peut croître en conditions naturelles humides, nos résultats démontrent clairement que le maintien constant, pour une longue période, des teneurs en eau élevées au niveau de la rhizosphère (>60 %) au stade semis peut affecter négativement la croissance des plants.

Le contrôle précis des teneurs en eau au niveau de la rhizosphère des semis d'épinette noire en pépinière (fig. 1*b*) est rendu possible grâce à l'utilisation de la réflectométrie dans le domaine temporel et à l'efficacité du système d'irrigation. La gestion de l'irrigation à l'aide de cette technique directe a été appliquée avec succès en conditions contrôlées dans la production et la qualification des plants horticoles (Richardson et al. 1992; Cameron et al. 1999) et forestiers

© 2003 CNRC Canada

Fig. 4. Effets des régies d'irrigation (15, 30, 45 et 60 %, v/v) sur la surface des racines des semis d'épinette noire (1+0) en fonction de quatre classes de diamètre (classe 1, < 0,25 mm; classe 2, 0,25–0,50 mm; classe 3, 0,50–0,75 mm et classe 4, >0,75 mm) (date d'échantillonnage, 13 septembre 1999). Pour chaque classe de diamètre, des lettres identiques au-dessus des barres indiquent l'absence de différences significatives entre les régies d'irrigation.



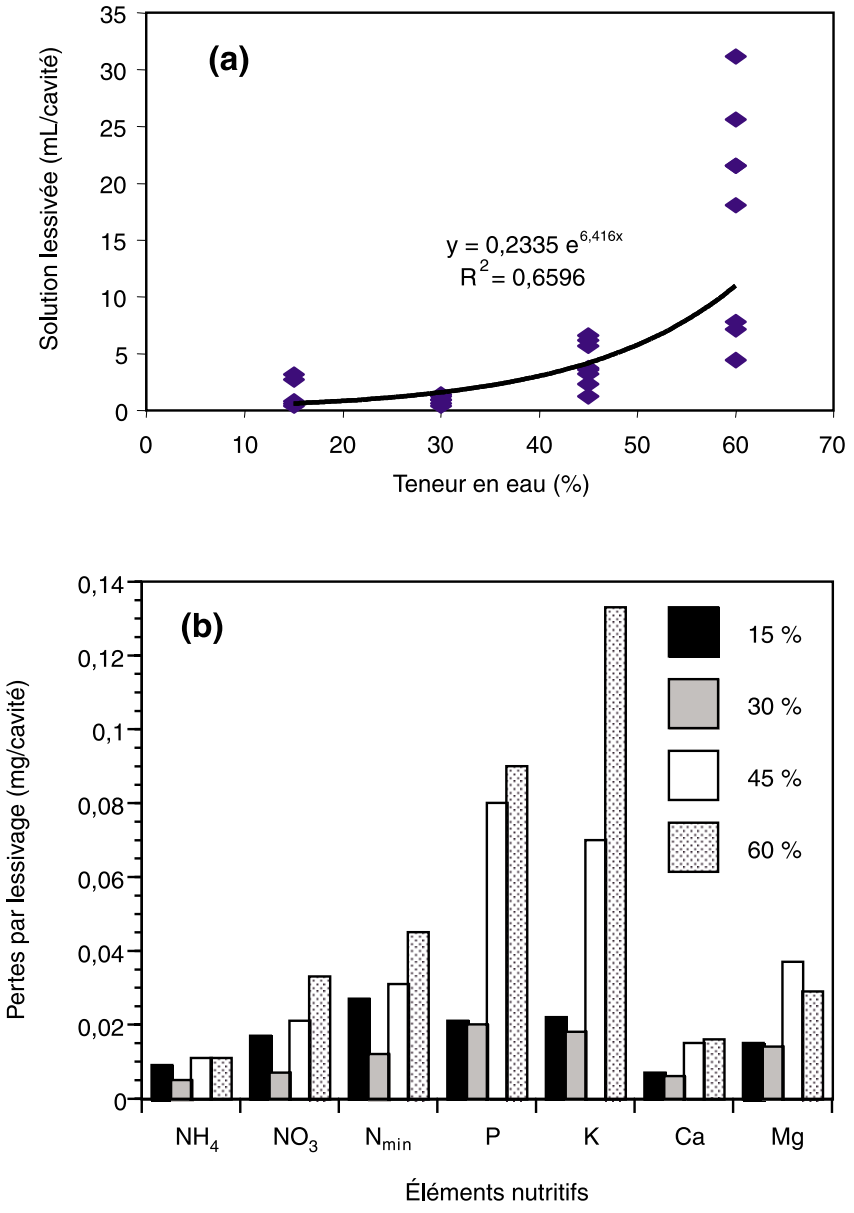
(Lambany et al. 1996, 1997; Lamhamedi et al. 1997, 2000, 2001). Les techniques usuelles (méthode gravimétrique, tensiomètre, chambre à pression, évaluation tactile) ne peuvent pas estimer la teneur en eau en temps réel au niveau de la rhizosphère et nécessitent souvent un ajustement continu en fonction du tassement du substrat et de la croissance des plants, ainsi qu'un contact continu dans le cas des tensiomètres entre le substrat et la coupelle poreuse (Landis et al. 1989; Timmer et Armstrong 1989; Rundel et Jarrell 1991; Cameron et al. 1999; Hansen et Pasian 1999; Testezlaf et al. 1999).

Le maintien de teneurs en eau du substrat élevées n'induit pas de gains réels en terme de croissance et de contenu en éléments nutritifs des semis et nécessite l'utilisation de quantités importantes d'eau. Cette irrigation excessive entraîne en plus un lessivage substantiel en eau et en éléments nutritifs (fig. 5*a*, 5*b*). Nos récents travaux (Lamhamedi et al. 2001) et les résultats de cette étude révèlent que la quantité des éléments nutritifs lessivés dépend de la fertilité du substrat lors de l'irrigation. À l'échelle opérationnelle, nos résultats démontrent clairement qu'un contrôle en termes d'irrigation et de fertilité du substrat peut réduire significativement le lessivage des éléments nutritifs et les quantités d'eau utilisées tout en optimisant l'absorption (contenu) des éléments nutritifs (fig. 1*b*, 3 et 5). Les pertes en eau dues au lessivage étaient de 10, 7,1, 28,4 et 62,2 % respectivement pour les régies d'irrigation 15, 30, 45 et 60 %. L'importance du lessivage observé sous la régie d'irrigation 15 % par comparaison à la régie d'irrigation 30 % ne pourrait être expliquée que par les propriétés hydrophobes des substrats tourbeux à l'état sec. Cette réduction du lessivage a été accompagnée par une augmentation de la conductivité électrique du substrat. La plus grande accumulation de sels déterminée dans le cas de la régie d'irrigation 15 % (182 µS/cm) reste faible par comparaison à la salinité critique (>2500 µS/cm) qui réduit significativement la croissance des semis d'épinette noire (Timmer et Parton 1984).

À la lumière de nos résultats, la réduction substantielle des quantités d'eau peut être effectuée sans affecter la qualité des semis produits. Ainsi, la gestion de l'irrigation spécifique à la production de semis d'épinette noire (1+0) sous tunnels peut être modulée en fonction des principaux stades de croissance décrits par Landis et al. (1999). Durant la phase d'établissement (germination et apparition des premières aiguilles), la teneur en eau du substrat tourbeux pourrait être maintenue entre 40 et 45 % pour favoriser la germination et la croissance (fig. 6). Cette teneur en eau relativement élevée favorisera l'imbibition et la germination des semences tout en répondant aux besoins en eau du semis pendant cette phase. Lors de la phase de croissance active, la teneur en eau pourra être diminuée et varier entre 30 et 35 %. Cependant, le pépiniériste devra être vigilant à ce stade de croissance car un stress hydrique très sévère peut induire un arrêt de croissance irréversible. La phase d'endurcissement peut être amorcée lorsque les semis se rapprochent des standards visés en terme de hauteur. Ainsi, la teneur en eau du substrat devrait être maintenue entre 17 et 25 % en vue d'induire un arrêt de croissance immédiat et initier le développement du bourgeon terminal et la résistance au gel hâtif. Malgré l'absence d'un consensus entre les auteurs concernant l'induction de la résistance au gel en réponse au stress hydrique (Bigras et al. 2001; Grossnickle 2000; Macey et Arnott 1986; Timmis et Tanaka 1976), nos observations sur l'épinette blanche et l'épinette noire révèlent que la résistance au gel des semis ne pourrait être améliorée que si la diminution de la teneur en eau ou l'application d'un stress

© 2003 CNRC Canada

Fig. 5. Effet de la régie d'irrigation (15, 30, 45 et 60 %, v/v) sur (*a*) la solution lessivée par cavité (surface de la cavité = 34,8 cm^2; chaque point représente la moyenne de la solution lessivée/cavité déterminée à partir des 25 cavités de six récipients) et (*b*) sur les pertes des éléments nutritifs (N-NH_4, N-NO_3, N_{min} (N minéral), P, K, Ca et Mg) par lessivage après avoir utilisé la même quantité de fertilisants pour toutes les régies d'irrigation évaluées.



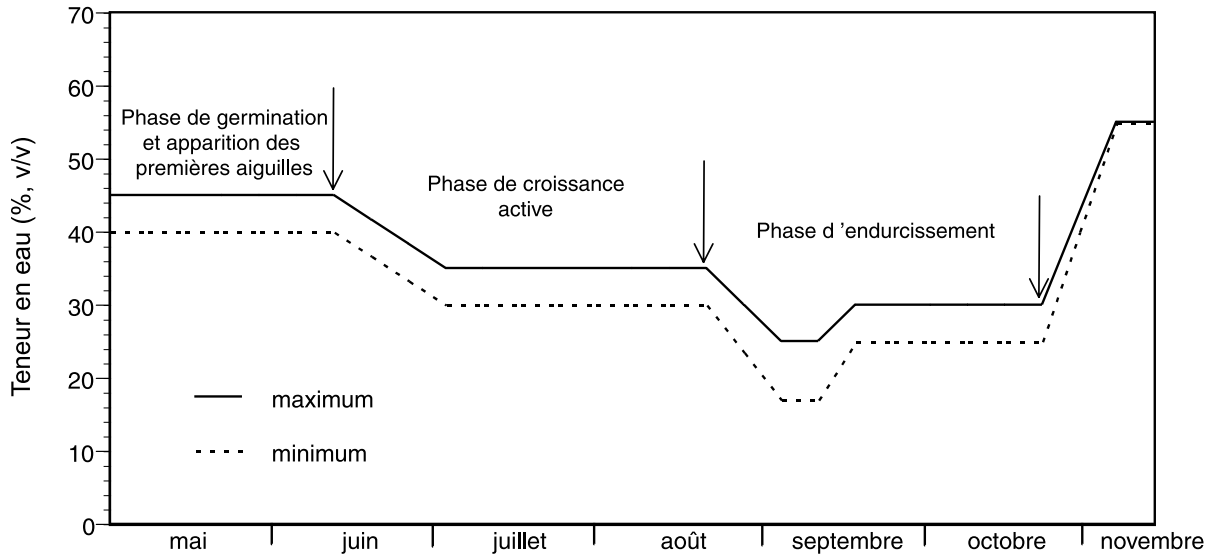
hydrique d'intensité relativement sévère est accompagnée par une diminution de la température et de la photopériode. Lorsque le développement des bourgeons est terminé, la teneur en eau du substrat pourra être augmentée à 25–30 % jusqu'à la fin de la phase d'endurcissement. Par la suite, le substrat pourra être saturé en eau (55 %) lorsque les récipients devront être placés à l'extérieur du tunnel, dès la fin du mois d'octobre.

Remerciements

Ce projet a été réalisé en étroite collaboration avec le Centre de production de plants forestiers (Sainte-Anne-de-Beaupré, Qué.). Les auteurs remercient Richard Gohier, Rosaire Tremblay, Lyne Lachance, Munyonge Abwe Wa Masabo et Debbie Christiansen pour leur aide technique. Nous remercions également Pierre Y. Bernier, Vic Timmer, France Savard et Barbara Sochanski pour leurs critiques et leur aide précieuse lors des traitements statistiques, ainsi que le personnel du Service des expertises scientifiques ayant participé aux analyses du substrat et des plants (Direction de la recherche forestière, Forêt Québec, ministère des Ressources naturelles). L'appui financier de ce projet de recherche est assuré par le ministère des Ressources naturelles (projets

© 2003 CNRC Canada

Fig. 6. Seuils de régies d'irrigation spécifiques à la production des semis d'épinette noire (1+0) sous tunnels, en fonction des stades de croissance, tout en permettant d'optimiser la croissance, la quantité d'eau d'irrigation et de diminuer le lessivage des éléments nutritifs.



281S et 271S) et le Fonds international de coopération universitaire de l'Agence universitaire de la Francophonie (projet 2000/PAS/15).

Bibliographie

Bacon, P.E. 1995. Nitrogen fertilization in the environment. Marcel Dekker, Inc., New York.

Bigras, F.J., Ryyppö, A., Lindström, A., et Stattin, E. 2001. Cold acclimation and deacclimation of shoots and roots of conifer seedlings. *Dans* Conifer cold hardiness. *Sous la direction de* F. Bigras et S. Colombo. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Pays-Bas. p. 57–88.

Black, R.A., et Bliss, L.C. 1980. Reproductive ecology of *Picea mariana* (Mill) BSP at tree line near Inuvik, North West Territories, Canada. Ecol. Monogr. **50** : 331–354.

Buxton, G.F., Cyr, D.R., Dumbroff, E.B., et Webb, D.P. 1985. Physiological responses of three northern conifers to rapid and slow induction of moisture stress. Can. J. Bot. **63** : 1171–1176.

Cameron, R.W.F., Harrison-Murray, R.S., et Scott, M.A. 1999. The use of controlled water stress to manipulate growth of container-grown *Rhododendron* cv. Hoppy. J. Hort. Sci. Biotechnol. **74** : 161–169.

Castellano, M.A., et Molina, R. 1989. Mycorrhizae. *Dans* The container tree nursery manual. Vol. 5. The biological components: nursery pests and mycorrhizae. *Sous la direction de* T.D. Landis, R.W. Tinus, S.E. McDonald et J.P. Barnett. U.S. Dep. Agric. Agric Handb. 674. p. 101–167.

Crawford, R.M.M. 1976. Tolerance of anoxia and the regulation of glycolysis in tree roots. *Dans* Tree physiology and yield improvement. *Sous la direction* de M.G.R. Cannel et F.T. Last. Academic Press, New York. p. 387–401.

Dixon, R.K., Pallardy, S.G., Garett, H.E., Cox, G.S., et Sander, I.L. 1983. Comparative water relations of container-grown and bareroot ectomycorrhizal and nonmycorrhizal *Quercus velutina* seedlings. Can. J. Bot. **61** : 1559–1565.

Duryea, M.L. 1984. Nursery cultural practices: impacts on seedling quality. *Dans* Forest nursery manual: production of bareroot seedlings. *Sous la direction de* M.L. Duryea et T.D. Landis. Martinus Nijhoff/Dr. W. Junk Publishers, Lancaster, R.-U. p. 143–164.

Gingras, B.-M. 1993. Bilan des essais expérimentaux sur la production en récipients de plants de fortes dimensions. Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles, Direction de la recherche forestière, Sainte-Foy, Qué.

Gingras, B.-M., et Richard, S. 1999. Bilan du développement des récipients à parois ajourées : culture des semis en pépinière et performance en plantation comparative. Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles, Forêt Québec, Direction de la recherche forestière, Sainte-Foy, Qué. Mém. rech. for. n° 130.

Girard, D., Gagnon, J., et Langlois, C.-G. 2001. Plantec : un logiciel pour gérer la fertilisation des plants dans les pépinières forestières. Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles, Direction de la recherche forestière, Sainte-Foy, Qué. Note rech. for. n° 111.

Grossnickle, S.C. 2000. Ecophysiology of northern spruce species. The performance of planted seedlings. Presses scientifiques du CNRC, Ottawa, Ont.

Haase, D.L., et Rose, R. 1995. Vector analysis and its use for interpreting plant nutrient shifts in response to silvicultural treatments. For. Sci. **41** : 54–66.

Hamilton, P.A., et Helsel, D.R. 1995. Effects of agriculture on ground-water quality in five regions of the United States. Ground Water, **33** : 217–226.

Hansen, R.C., et Pasian, C.C. 1999. Using tensiometers for precision microirrigation of container-grown roses. Appl. Eng. Agric. **15** : 483–490.

Heiskanen, J. 1995. Irrigation regime affects water and aeration conditions in peat growth medium and the growth of containerized Scots pine seedlings. New For. **9** : 181–195.

Imo, M., et Timmer, V.R. 1998. Vector competition analysis: a new approach evaluating vegetation control methods in young black spruce plantations. Can. J. Soil Sci. **78** : 3–15.

Kalra, Y.P., et Maynard, D.G. 1992. Méthodes d'analyse des sols forestiers et des tissus végétaux. Forêts Canada, Centre de foresterie du Nord, Edmonton, Alb. Rapp. info. NOR-X-319F.

Kozlowski, T.T. 1997. Responses of woody plants to flooding and salinity. Tree Physiol. Monogr. 1.

Lambany, G., et Veilleux, L. 1999. Système d'imagerie informatisée appliquée au développement des racines de semis

© 2003 CNRC Canada

d'épinette. Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles, Direction de la recherche forestière, Sainte-Foy, Qué. Note rech. for. n° 97.

Lambany, G., Robidas, L., et Ballester, P. 1996. Measurement of soil water content in a peat–vermiculite medium using time domain reflectometry (TDR): a laboratory and field evaluation. Tree Plant. Notes, **47** : 88–93.

Lambany, G., Renaud, M., et Beauchesne, M. 1997. Control of growing medium water content and its effect on small seedlings grown in large containers. Tree Plant. Notes, **48** : 48–54.

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

Lamhamedi, M.S., Bernier, P.Y., et Hébert, C. 1997. Effect of shoot size on the gas exchange and growth of containerized *Picea mariana* seedlings under different watering regimes. New For. **13** : 209–223.

Lamhamedi, M.S., Lambany, G., Renaud, M., Veilleux, L., et Plamondon, S. 2000. Gestion de l'irrigation en pépinière et évaluation des semis d'épinette blanche produits dans les récipients à parois ajourées. Ministère des Ressources naturelles, Forêt Québec, Direction de la recherche forestière, Sainte-Foy, Qué. Mém. rech. n° 138.

Lamhamedi, M.S., Lambany, G., Margolis, H., Renaud, M., Veilleux, L., et Bernier, P.Y. 2001. Growth, physiology and leachate losses in *Picea glauca* seedlings (1+0) grown in air-slit containers under different irrigation regimes. Can. J. For. Res. **31** : 1968–1980.

Landis, T.D., Tinus, R.W., et Barnett, J.P. 1989. The container tree nursery manual. Vol. 4. Seedling nutrition and irrigation. U.S. Dep. Agric. Agric. Handb. 674.

Landis, T.D., Tinus, R.W., et Barnett, J.P. 1999. The container tree nursery manual. Vol. 6. Seedling propagation. U.S. Dep. Agric. Agric. Handb. 674.

Langlois, C.G., et Gagnon, J. 1993. A global approach to mineral nutrition based on the growth needs of seedlings produced in forest tree nurseries. *Dans* Plant nutrition: from genetic engineering to field practice. *Sous la direction de* N.J. Barrow. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Pays-Bas. p. 303–306.

Levan, M.A., et Riha, S.J. 1986. Response of root systems of northern conifer transplants to flooding. Can. J. For. Res. **16** : 42–46.

Lindström, A., et Håkansson, L. 1994. Going to the root evil. Small Scale For. **94** : 19–23.

Littell, R.C., Milliken, G.A., Stroup, W.W., et Wolfinger, R.D. 1996. SAS® system for mixed models. SAS Institute Inc., Cary, C.N.

Macey, D.E., et Arnott, J.T. 1986. The effect of moderate moisture and nutrient stress on bud formation and growth of container-grown white spruce seedlings. Can. J. For. Res. **16** : 949–954.

Margolis, H., et Brand, D.G. 1990. An ecophysiological basis for understanding plantation establishment. Can. J. For. Res. **20** : 375–390.

McMillin, J.D., et Wagner, M.R. 1995. Effects of water stress on biomass partitioning of ponderosa pine seedlings during primary root growth and shoot growth periods. For. Sci. **41** : 594–610.

Ministère de l'Environnement du Québec. 1984. Règlement sur l'eau potable. Q-2, r.4.1. Ministère de l'Environnement du Québec, Québec. p. 169–175.

Mitchell, A.K., et Hinckley, T.M. 1993. Effects of foliar nitrogen concentration on photosynthesis and water use efficiency in Douglas-fir. Tree Physiol. **12** : 403–410.

Richardson, M.D., Meisner, C.A., Hoveland, C.S., et Karnok, K.J. 1992. Time domain reflectometry in closed container studies. Agron. J. **84** : 1061–1063.

Rundel, P.W., et Jarrell, W.M. 1991. Water in the environment. *Dans* Plant physiological ecology. Field methods and instrumentation. *Sous la direction de* R.W. Pearcy, J.R. Ehleringer, H.A. Mooney et P.W. Rundel. Chapman and Hall, New York. p. 29–56.

Stowe, D.C. 2001. Morphological and physiological characteristics of air-slit containerrized spruce seedlings (1 + 0) in response to four irrigation regimes. Mémoire de maîtrise, Université Laval, Sainte-Foy, Qué.

Stowe, D.C., Lamhamedi, M.S., et Margolis, H.A. 2001. Water relations, cuticular transpiration and bud characteristics of air-slit containerized *Picea glauca* seedlings in response to controlled irrigation regimes. Can. J. For. Res. **31** : 2200–2212.

Tang, Z.C., et Kozlowski, T.T. 1983. Responses of *Pinus banksiana* and *Pinus resinosa* seedlings to flooding. Can. J. For. Res. **13** : 633–639.

Testezlaf, R., Larsen, C.A., Yeager, T.H., et Zazueta, F.S. 1999. Tensiometric monitoring of container substrate moisture status. Hortic. Technol. **9** : 105–109.

Thompson, T.L. 1996. Agricultural fertilizers as a source of pollution. *Dans* Pollution science. *Sous la direction de* I.L. Pepper, C.P. Gerba et M.L. Brusseau. Academic Press, New York. p. 211–223.

Timmer, V.R., et Armstrong, G. 1987. Diagnosing nutritional status of containerized tree seedlings: comparative plant analyses. Soil Sci. Soc. Am. J. **51** : 1082–1086.

Timmer, V.R., et Armstrong, G. 1989. Growth and nutrition of containerized *Pinus resinosa* seedlings at varying moisture regimes. New For. **3** : 171–180.

Timmer, V.R., et Miller, B.D. 1991. Effects of contrasting fertilization and moisture regimes on biomass, nutrients, and water relations of container grown red pine seedlings. New For. **5** : 335–348.

Timmer, V.R., et Parton, W.J. 1984. Optimum nutrient levels in a container growing medium determined by a saturated aqueous extract. Comm. Soil Sci. Plant Anal. **15**: 607–618.

Timmis, R., et Tanaka, Y. 1976. Effects of container density and plant water stress on growth and cold hardiness of Douglas-fir seedlings. For. Sci. **22** : 167–172.

Topp, G.C., et Davis, J.L. 1985. Measurement of soil water content using time-domain reflectrometry (TDR): a field evaluation. Soil Sci. Soc. Am. J. **49** : 19–24.

Topp, G.C., Davis, J.L., Bailey, W.G., et Zebchuk, W.D. 1984. The measurement of soil-water content using a portable TDR hand probe. Can. J. Soil. Sci. **64** : 313–321.

Walinga, I., Van Der Lee, J.J., Houba, V.J.G., Van Vark, W., et Novosamsky, I. 1995. Plant analysis manual. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Pays-Bas.

Zine El Abidine, A., Bernier, P.Y., et Plamondon, A.P. 1994*a*. Water relations parameters of lowland and upland black spruce: seasonal variations and ecotypic differences. Can. J. For. Res. **24** : 587–593.

Zine El Abidine, A., Bernier, P.Y., Stewart, J.D., et Plamondon, A.P. 1994*b*. Water stress preconditioning of black spruce seedlings from lowland and upland sites. Can. J. Bot. **72** : 1551–1518.

Zinkan, C.G., Jeglum, J.K., et Harvey, D.E. 1974. Oxygen in water culture influences growth and nutrient uptake of jack pine, black spruce and white spruce seedlings. Can. J. Plant Sci. **54** : 553–558.

Zwiazek, J.J., et Blake, T.J. 1990*a*. Effects of preconditioning on carbohydrates and amino acid composition of osmotically stressed black spruce (*Picea mariana*) cuttings. Can. J. For. Res. **20** : 108–112.

Zwiazek, J.J., et Blake, T.J. 1990*b*. Effects of preconditioning on electrolyte leakage and lipid composition in black spruce (*Picea mariana*) stressed with polyethylene glycol. Physiol. Plant. **79** : 71–77.

© 2003 CNRC Canada