

La réflectométrie dans le domaine temporel : une technique d'optimisation de l'irrigation et de réduction du lessivage en pépinières forestières au Québec

Mohammed S. Lamhamedi, Mario Renaud, Hank Margolis

L'inégalité de la répartition de la ressource en eau à l'échelle mondiale et la variabilité inter-annuelle des précipitations aggravent souvent la disponibilité de cette ressource [1, 2] et deviendra certainement le principal obstacle à la sécurité alimentaire et au développement socio-économique dans les zones semi-arides et arides (*figure 1*). Par ailleurs, dans les zones humides ou irriguées, où l'eau est relativement abondante, le développement industriel et les pratiques culturales relatives à l'agriculture intensive contribuent largement à la pollution des eaux souterraines et de surface [3]. Plusieurs organisations internationales comme la FAO et l'Unesco ont lancé un cri d'alarme afin de trouver des solutions viables à long terme aux problèmes de pénurie, d'utilisation excessive, ou de détérioration de la qualité des eaux de surface et souterraines. En Amérique du Nord et en

Europe, la concentration en azote (N) sous forme de nitrates et de nitrites dans les eaux souterraines ne doit pas dépasser la concentration de 10 ppm [4-6].

Au Canada, le défi majeur est de préserver une bonne qualité des eaux souterraines et de surface. Des efforts ont été consentis dans la majorité des provinces pour préserver la qualité de l'environnement dans les secteurs clés de l'économie (agriculture, foresterie, mines, agro-alimentaire, industrie papetière, énergie). Une attention particulière a été accordée à la mise en place d'une saine gestion environnementale des écosystèmes forestiers suite à la conférence des Nations-unies sur l'environnement et le développement durable (Brésil 1992, plan Action 21) et à la pression exercée sur le marché du bois due à la nouvelle approche de certification de l'aménagement forestier [7-10].

Au Canada, les pressions sont relativement fortes en termes de protection de l'environnement, du partage et de la conservation des ressources forestières entre les différents utilisateurs. Pour maintenir le rendement soutenu, le recours au reboisement et à la préservation de la régénération naturelle pré-établie sont des solutions très prometteuses garantissant un approvisionnement continu en bois et une compétitivité accrue sur le marché international.

L'installation et la croissance des plants mis en terre sont affectées par la compétition végétale et l'interaction de divers stress biotiques et abiotiques. Afin de limiter les interventions de dégagement dans les plantations et d'éliminer l'utili-

sation des phytocides en 2001, le ministère des Ressources naturelles du Québec (MRN) s'est doté d'une stratégie de la protection des forêts (MRN, 1994) mettant l'accent sur l'utilisation de plants de fortes dimensions (PFD) dans les programmes de reboisement [11-13].

Un PFD est produit généralement dans un récipient de 340-350 cm³/cavité durant deux saisons de croissance. La première saison est réalisée sous abri (tunnel recouvert de polythène) ; dans la seconde, les plants sont cultivés à l'extérieur, sans abri. Parmi les normes spécifiques à ce gabarit de plants, un PFD devra atteindre une hauteur de 35 à 40 cm, un bon rapport hauteur/diamètre et une concentration minimale en azote (N) foliaire de 1,7 %.

Afin de produire des PFD de bonne qualité, le MRN a préconisé des récipients à parois ajourées [11, 14] qui favorisent une architecture des racines s'apparentant à celle des semis issus de la régénération naturelle. La présence de fentes (*photo 1*) dans ces récipients (IPL 25-350A, 25 cavités par récipient, 350 cm³ par cavité ; Saint-Damien, Québec, Canada) peut induire un dessèchement rapide du substrat affectant la croissance et la physiologie des semis. Dans la majorité des pépinières forestières, les pépiniéristes utilisent des quantités importantes d'eau et de fertilisants maintenant le substrat à saturation, en alternance parfois avec une courte période de dessèchement [15, 16], avec des teneurs en eau au niveau de la rhizosphère souvent supérieures à 50 % (v/v, cm³ eau/cm³ substrat) durant la saison de croissance.

M.S. Lamhamedi, M. Renaud : Direction de la recherche forestière, Forêt Québec, ministère des Ressources naturelles, 2700, rue Einstein, Sainte-Foy, Québec, Canada G1P 3W8.

<mohammed.lamhamedi@mrn.gouv.qc.ca>
H. Margolis : Centre de recherche en biologie forestière, Faculté de foresterie et de géomatique, Pavillon Abitibi-Price, Université Laval, Sainte-Foy, Québec, Canada G1K 7P4.

Tirés à part : M.S. Lamhamedi

Thèmes : Phytotechnologie ; Agronomie ; Forêts.

Techniques de contrôle de l'irrigation

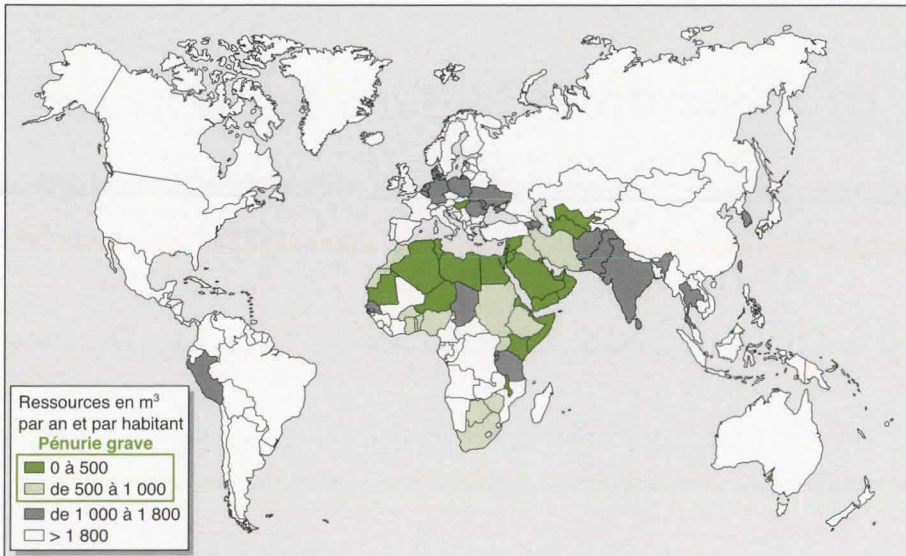


Figure 1. Zones de pénurie et ressources en eau renouvelables par an et par habitant, estimées pour 2025 (carte adaptée [1, 2]).

Figure 1. Zones of water shortage and annually renewable water sources as estimated per person for the year 2025 (adapted map [1, 2]).

Ces irrigations excessives favorisent le lessivage des éléments minéraux, le développement de mousses, d'hépatiques, d'agents pathogènes et de champignons

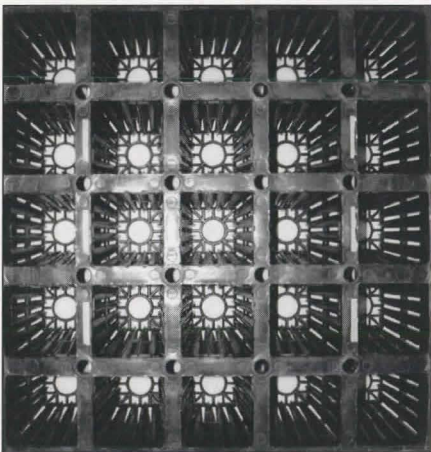


Photo 1. Récipient à parois ajourées IPL 25-350A en polyéthylène haute densité (longueur : 37 cm ; largeur : 35,5 cm ; profondeur : 14 cm ; nombre de cavités : 25 ; superficie maximale d'une cavité : 34,8 cm² ; volume/cavité : 350 cm³ ; plants/m² : 190) (Cliché : S. Richard).

Photo 1. Air-slit container (IPL 25-350A) made of high density polyethylene (length 37 cm, width 35.5 cm, depth 14 cm ; 25 cavities ; maximum surface area of cavity : 34.8 cm² ; volume per cavity : 350 cm³ ; 190 seedlings/m²) (Photo: S. Richard).

ectomycorhiziens comme le *Thelephora terrestris*, qui étouffent les plants et affectent leur croissance, surtout dans les sites pauvres [17]. Le maintien de substrats saturés en eau modifie l'architecture du système racinaire, favorise la formation de racines de gros diamètre dépourvues de poils absorbants essentiels à la formation d'ectomycorhizes [18, 19], comme le *Pisolithus* ou le *Rhizopogon*. Ces racines deviennent généralement non fonctionnelles en termes d'absorption d'eau et des éléments nutritifs après plantation [19, 20].

L'excès d'eau est aussi favorisé par la variabilité spatiale engendrée par le système d'irrigation. Ainsi, l'utilisation de l'aspersion comme système d'irrigation durant la seconde saison de croissance, nécessite des quantités importantes d'eau pour humecter les récipients situés dans les endroits secs. La gestion de l'irrigation en conditions opérationnelles a suscité l'étude de la faisabilité de la réflectométrie dans le domaine temporel (RDT), dont les principes ont été développés par Fellner-Feldegg [21].

Cette synthèse met l'accent sur l'adaptation et l'utilisation graduelle de la RDT pour contrôler et optimiser l'irrigation et pour réduire le lessivage des éléments minéraux en pépinière forestière.

Parmi les techniques de contrôle, citons le tensiomètre, le psychromètre, les blocs de gypse, la sonde à neutron, le potentiel hydrique du xylème et la méthode de pesée [15, 16, 22-26]. Ces méthodes comportent certains inconvénients, à savoir : la nécessité d'un calibrage et de l'élaboration d'une courbe de rétention en eau ; la petite taille de fraction échantillonnée du substrat ; l'inactivation en substrat salin ; la destructivité des échantillons ; et la sensibilité à la variabilité spatiale.

En revanche, la RDT est non destructive et permet l'évaluation de la teneur en eau volumétrique en temps réel au niveau de la rhizosphère et l'échantillonnage d'un grand volume de substrat [22, 27-33]. À l'échelle mondiale, cette technique n'a pas été appliquée en conditions opérationnelles en pépinière forestière.

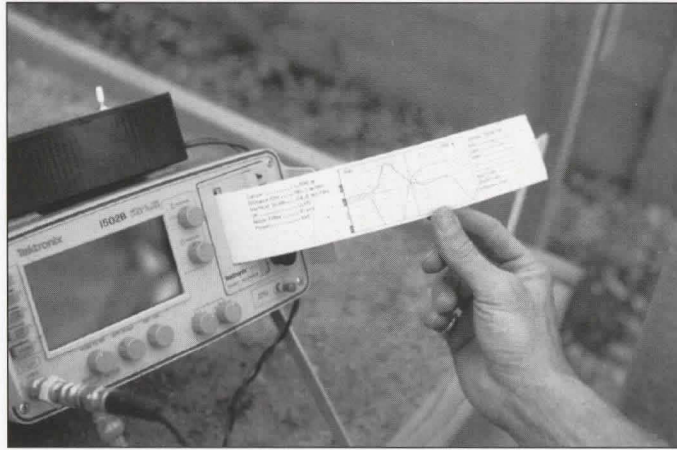
La détermination de la teneur en eau volumétrique par la RDT repose sur la vitesse de propagation d'une onde électromagnétique permettant de parcourir les deux tiges métalliques de la sonde installée dans le substrat à une fréquence comprise entre 1 MHz et 1 GHz. Cette vitesse est gouvernée par la constante diélectrique (K_a) qui, pour l'eau, est très élevée ($K_a = 80$), comparativement aux sols secs ($K_a = 3-5$) ou à l'air ($K_a = 1$). Plus la constante diélectrique est élevée, plus la vitesse de propagation de l'onde électromagnétique est faible. Ainsi, la teneur en eau volumétrique pourra être déterminée par la RDT par la seule mesure de constante diélectrique du substrat avec une précision de 2 %, et une précision de répétition des mesures de 1 % [30]. La relation parfaite reliant la constante diélectrique et la teneur en eau du sol, ainsi que la précision des mesures démontre la fiabilité de la RDT pour déterminer la teneur en eau sans recourir aux courbes de calibrage pour chaque sol ou substrat [22]. La RDT peut aussi être utilisée afin d'estimer la salinité des substrats, le potentiel matriciel et la concentration des nitrates dans la rhizosphère [34, 35].

Le volume échantillonné est approximativement cylindrique et son diamètre est le double de la distance séparant les deux tiges métalliques, alors que la hauteur du

cylindre est égale à celle de la longueur des tiges de la sonde. La teneur en eau déterminée par la RDT est une valeur moyenne du volume de sol échantillonné ; elle est très sensible à la teneur en eau autour des tiges de la sonde [31].

Adaptation de la RDT au contrôle de l'irrigation en récipients à parois ajourées

Au Québec, les premiers travaux concernant le contrôle de la teneur en eau au niveau de la rhizosphère des substrats tourbeux ont utilisé les premiers modèles de la RDT (modèle 1502b, Tektronix Inc., Richmond, OR, USA) qui estiment la teneur en eau à partir des traces des signaux de l'onde électromagnétique [29, 36, 37] (photo 2). Depuis 1993, une nouvelle génération d'appareils (modèle MP-917, ESI Environmental Sensors Inc., Victoria, CB, Canada), avec une sonde développée spécifiquement pour les cultures en récipients à été commercialisée, permettant de mesurer directement la teneur en eau volumétrique (cm^3/cm^3) sans recourir à l'utilisation des traces des ondes électromagnétiques. Cependant, l'utilisation de sondes munies d'une seule diode a induit parfois des lectures erronées dans des substrats fortement saturés en eau, suite probablement à une mauvaise détection de l'extrémité de la sonde enfoncée dans le substrat [38]. Ce problème a été résolu par l'ajout d'une deuxième diode à la sonde dans le cas des récipients à parois ajourées (photo 3). La première diode est incorporée à la base de la sonde tandis que la deuxième est fixée manuellement à l'extrémité des deux tiges parallèles en acier inoxydable (longueur : 39 cm ; diamètre : 3,17 mm ; espacement entre les tiges : 1 cm), tout en respectant la polarité pour permettre une lecture précise de la teneur en eau. La sonde est insérée horizontalement au niveau des fentes de cinq cavités adjacentes à mi-hauteur du récipient [38-43]. Le logiciel de calcul des teneurs en eau ViewPoint est intégré au MP-917 et tient compte de l'alternance des portions de la sonde en contact direct avec l'air et le substrat [39].



(model 1502, Tektronix Inc., Richmond, OR, USA) using the principles of time domain reflectometry (Photo: M.S. Lamhamed).

Photo 2. Estimation de la teneur en eau à partir des graphiques générés par un des premiers modèles de Tektronix (modèle 1502, Tektronix Inc., Richmond, OR, États-Unis) utilisant les principes de la réflectométrie dans le domaine temporel (Cliché : M.S. Lamhamed).

Photo 2. Estimation of the water content using graphics generated by one of the first models of Tektronix

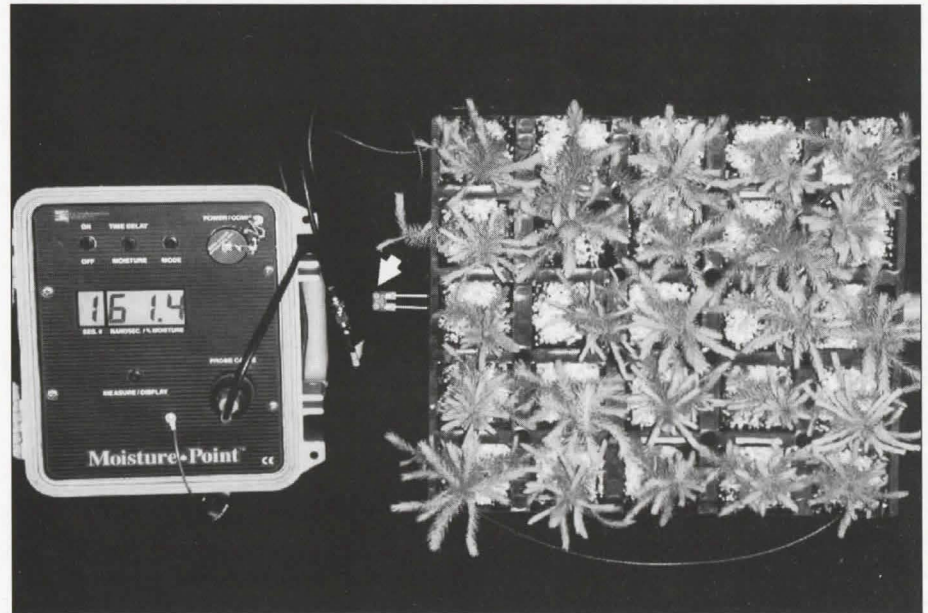


Photo 3. Nouvelle génération d'appareils (MP-917, ESI Environmental Sensors Inc., Victoria, CB, Canada) permettant de mesurer directement en temps réel la teneur en eau au niveau de la rhizosphère. À noter que la sonde spécifique aux récipients à parois ajourées est insérée horizontalement à mi-hauteur et est dotée de deux diodes indiquées par les flèches. La sonde peut être ajustée aux récipients à parois fermées (Cliché : M. Renaud).

Photo 3. New generation of instruments (MP-917, ESI Environmental Sensors Inc., Victoria, BC, Canada) which allow for real-time measurement of the water content of the rhizosphere. Note that the probe specific to air-slit containers is inserted horizontally midway up the container and is equipped with two diodes, as indicated by the arrows. The probe can be adjusted for use with solid walled containers (Photo: M. Renaud).

En pépinière, une période de 30 min après irrigation est suffisante pour atteindre une stabilité des teneurs en eau dans les substrats tourbeux (tourbe/vermiculite : 3/1 ; v/v) [38-40]. Les mesures de teneurs en eau effectuées par la RDT sont significativement corrélées avec celles déterminées par pesée, quels que soient le substrat et le volume du pot [30, 38]. Des paramètres de calibrage

spécifiques au substrat tourbeux ont été introduits dans l'algorithme d'estimation des teneurs en eau. Ainsi, l'utilisation du MP-917 doté d'une sonde à double diode est une technique rapide, souple d'emploi et très précise. Lorsque la sonde est installée, le temps requis pour déterminer la teneur en eau du substrat dans un récipient dépasse rarement 20 secondes.

Contrôle de l'irrigation en pépinière forestière

La RDT a été utilisée en vue de gérer l'irrigation et de réduire les apports d'eau lors de la première saison de croissance, en vérifiant l'absence d'effet négatif de cette réduction sur la croissance et la physiologie des semis (1 + 0) produits sous tunnel. En 1996, un dispositif expérimental en six blocs aléatoires complets a été installé à la pépinière de Grandes-Piles (46° 41' N, 72° 41' O) pour évaluer les effets de deux régies d'irrigation (25 et 40 %, v/v) sur la croissance, le statut nutritionnel, l'architecture des racines et la tolérance au gel des semis d'épinette blanche (1 + 0) [*Picea glauca* (Moench.) Voss] [39, 41]. Chaque régie d'irrigation consiste à maintenir une teneur en eau du substrat constante au niveau de la rhizosphère tout au long de la première saison de croissance. L'uniformité des teneurs en eau dans les cavités des récipients placés à l'intérieur des tunnels était assurée par l'utilisation d'un robot d'arrosage motorisé (modèle *Aquaboom Harnois, Québec, Canada*) muni de 22 buses d'arrosage et fonctionnant à une pression de 2,3 kg/cm³. L'efficacité d'arrosage de ce système varie entre 90 et 95 %. L'évaluation et l'ajustement des teneurs en eau trois fois par semaine (lundi, mercredi et vendredi) ont été suffisants pour maintenir les valeurs ciblées.

Nos résultats démontrent qu'une différence de 15 % (v/v) entre les deux régies (25 et 40 %, v/v) n'a pas d'effet significatif sur les variables morphologiques (hauteur, diamètre au collet, masses sèches des racines et des parties aériennes) et l'architecture des racines (longueur totale, diamètre moyen et surface) évaluées vers la fin de la première saison de croissance. En revanche, la régie d'irrigation (25 %, v/v) a montré une fertilité du substrat et des concentrations en éléments nutritifs dans les racines et dans les parties aériennes, supérieures à celles de la régie d'irrigation 40 % (v/v). Les résultats d'analyse de variance indiquent que la régie d'irrigation n'a aucun effet sur la tolérance au gel des semis mesurée par la perte en eau des racines, la capacité de croissance des

racines, la libération des électrolytes et le pourcentage de matière sèche évalués en automne. À la fin de la deuxième saison de croissance à l'extérieur, sous les régies de culture standard de la pépinière de Grandes-Piles, on n'a pas noté de différence entre les deux régies sur les variables morphologiques et les concentrations des éléments minéraux. Nos résultats laissent présager qu'une régie d'irrigation variant entre 25 et 40 % durant la première saison de croissance est adéquate pour atteindre les standards de croissance souhaités. En revanche, il reste à déterminer le seuil minimal de teneur en eau en dessous duquel la croissance et la physiologie des semis sont significativement affectées. De plus, le pépiniériste devrait concevoir son calendrier de fertilisation en tenant compte non seulement des standards de croissance, mais aussi de l'évolution de la fertilité du substrat, laquelle est affectée par l'absorption des racines, les apports en fertilisants, l'irrigation et les précipitations pour ce qui a trait aux cultures à l'extérieur (2 + 0).

Le suivi des teneurs en eau dans six tunnels de production, en 1997, à la pépinière de Grandes-Piles avec réajustement des teneurs effectué en fonction de quatre sondes placées dans chaque tunnel, montre que les teneurs en eau ciblées variaient entre 25 et 35 % (v/v) (valeur moyenne autour de 30 %) (figure 2).

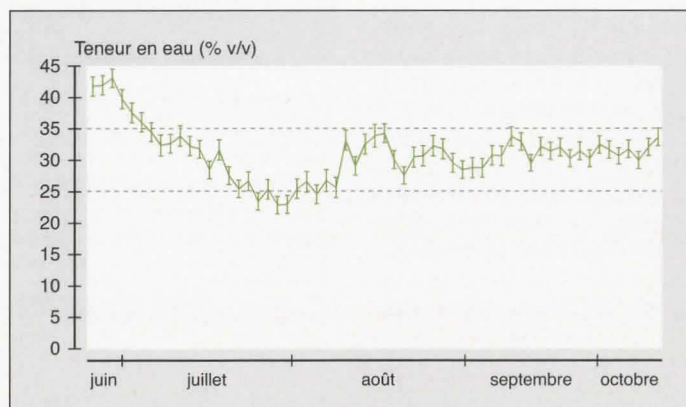


Figure 2. Exemple de suivi et de contrôle à l'échelle opérationnelle de la teneur en eau moyenne du substrat au niveau de la rhizosphère, variant entre 25 et 35 % (v/v), dans six tunnels à la pépinière de Grandes-Piles (Québec, Canada) à l'aide du MP-917. Chaque tunnel a une capacité moyenne de production de l'ordre de 110 400 plants produits dans les récipients à parois ajourées (25-350A) ($n = 6 \pm$ erreur standard).

Figure 2. An example of the control and monitoring, on an operational scale, of the average substrate water content in six tunnels at the Grandes-Piles forest nursery (Quebec, Canada) using the MP-917. The average water content varied between 25 and 35% (v/v). Each tunnel has an average production capacity of 110,400 air-slit containerized seedlings (25-350A) ($n = 6 \pm$ standard error).

Optimisation de l'irrigation en pépinière forestière

Deux dispositifs en six blocs aléatoires complets (quatre régies d'irrigation : 15, 30, 45 et 60 %, v/v) ont été installés en 1998 et 1999, dans le même tunnel, à la pépinière du Centre de production de plants forestiers du Québec (47° 02' N, 70° 55' O), en vue d'optimiser les régies d'irrigation en fonction des stades de croissance (germination et apparition des premières aiguilles, croissance active et endurcissement) respectivement des semis d'épinette blanche et d'épinette noire (1 + 0) (*Picea mariana* [Mill.] BSP) (photo 4). Les régies d'irrigation sont maintenues constantes à l'aide de la RDT durant la première saison de croissance (figure 3). Le calendrier de fertilisation a été ajusté tout au long de la saison de croissance en utilisant le logiciel *Plantec* [44, 45] pour maintenir une fertilité moyenne du substrat de 200-300 ppm N et de 50-100 ppm N respectivement pour l'épinette blanche et l'épinette noire et ce, quelle que soit la régie d'irrigation appliquée. Huit échantillonnages pour l'épinette blanche et sept pour



Photo 4. Dispositif expérimental d'épinette blanche installé sous tunnel au Centre de production de plants forestiers du Québec (Canada) (Cliché : M.S. Lamhamedi).

Photo 4. Experimental design for white spruce seedlings (1 + 0) installed under tunnel conditions at the Centre de production de plants forestiers du Québec (CPPFQ; Sainte-Anne-de-Beaupré, Quebec, Canada) (Photo: M.S. Lamhamedi).

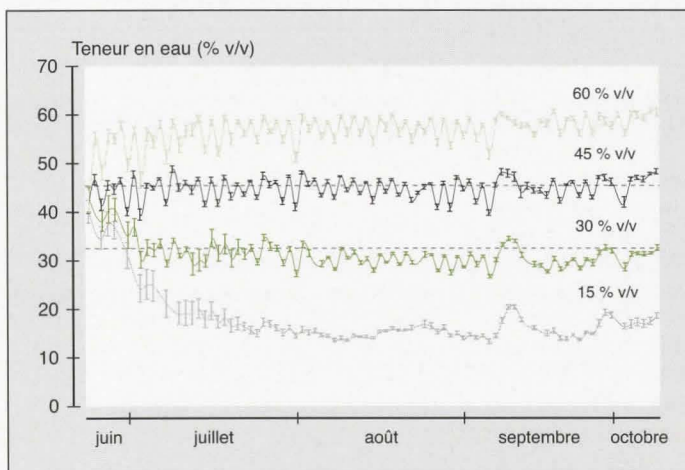


Figure 3. Contrôle et optimisation de quatre régies d'irrigation maintenues constantes, à l'aide du MP-917, durant la première saison de croissance des semis d'épinette noire produits dans les récipients à parois ajourées, sous tunnel, au Centre de production de plants forestiers du Québec (Canada) ($n = 6 \pm$ erreur standard) [43].

Figure 3. The control and optimization of four different irrigation regimes, maintained constant, using the MP-917, during the first growing season of black spruce seedlings produced in perforated containers, under tunnel, at the Centre de production de plants forestiers du Québec (Canada) ($n = 6 \pm$ standard error) [43].

ned at a constant level during the first growing season of air-slit containerized black spruce seedlings grown in a tunnel at the Centre de production de plants forestiers du Québec (CPPFQ; Saint-Anne-de-Beaupré, Quebec, Canada) ($n = 6 \pm$ standard error) [43].

l'épinette noire ont été réalisés, de juillet à octobre, afin de faire un suivi intensif des variables morphologiques (hauteur, diamètre au collet, poids sec des racines et de la partie aérienne), du statut nutritionnel des plants et du substrat (N, P, K, Ca et Mg), les relations hydriques, les échanges gazeux, le développement de la cuticule et des primordia, et l'architecture du système racinaire par le logiciel WinRhizo (Instruments Régent Inc., Québec, QC, Canada). Dans le cas de l'épi-

nette blanche, les différents sucres solubles (raffinose, saccharose, fructose, inositol et mannitol) et les acides quinique et shikimique ont été déterminés dans les racines et les tiges lors des deux derniers échantillonnages. Les variables environnementales ont été enregistrées, avec un système d'acquisition de données, de façon continue durant la saison de croissance. Des pluviomètres ont été installés dans un bloc de chaque traitement pour déterminer avec précision la

quantité d'eau utilisée pour chaque régie d'irrigation. La description de l'approche méthodologique est présentée d'une façon détaillée dans nos récents travaux [41-43, 46].

Vers la fin de la première saison de croissance des semis d'épinette blanche, le maintien des régies d'irrigation (15, 30 et 45 %), tout au long de la saison de croissance, a nécessité respectivement 28, 37 et 46 % de la quantité d'eau appliquée dans le cas de la régie 60 % (figure 4a). Dans le cas de l'épinette noire, le maintien de ces mêmes régies d'irrigation a nécessité 24, 27 et 38 % par rapport à la régie d'irrigation 60 % (figure 4b). Ainsi, les quantités d'eau utilisées varient en fonction de l'essence à produire et des variables environnementales saisonnières (température, humidité relative, etc.) sous tunnel. Les semis d'épinette blanche soumis à la régie 15 % ont montré une hauteur, un diamètre au collet, des masses sèches des racines, des parties aériennes et totales, une surface et une longueur des racines, une photosynthèse nette et un contenu en éléments nutritifs significativement inférieurs comparativement aux semis croissant sous les régies 30, 45 et 60 % (figures 5 a-b, 6 et 7). Cette diminution sous la régie 15 % est due en grande partie à la diminution du *mass flow* et de la diffusion des ions au niveau de la rhizosphère [48]. Par comparaison aux régies 30 % et 45 %, le maintien de la régie 60 % n'a pas permis une augmentation, en termes de croissance, des racines, des parties aériennes, d'absorption des éléments nutritifs et des sucres. L'initiation de la formation des bourgeons était plus rapide sous la régie d'irrigation 15 % qu'avec les autres régies évaluées [46].

Le lessivage varie d'une façon exponentielle en fonction de l'augmentation de la teneur en eau (figure 8) et de la fertilité du substrat, de sorte qu'on peut économiser des quantités importantes d'eau et de fertilisants. Pour maintenir, par exemple, une fertilité de 200 à 300 ppm N tout au long de la première saison de croissance, chaque plant d'épinette blanche a reçu 48, 55, 61 et 79 mg N respectivement pour les régies 15, 30, 45 et 60 %. Après une fertilisation similaire entre les quatre régies d'irrigation, les pertes en éléments nutritifs incluant les anions et les cations sous la régie 60 % sont plus élevées par comparaison aux autres régies (figure 9). L'évaluation du lessivage lors de la deuxième saison de croissance montre que les pertes en élé-

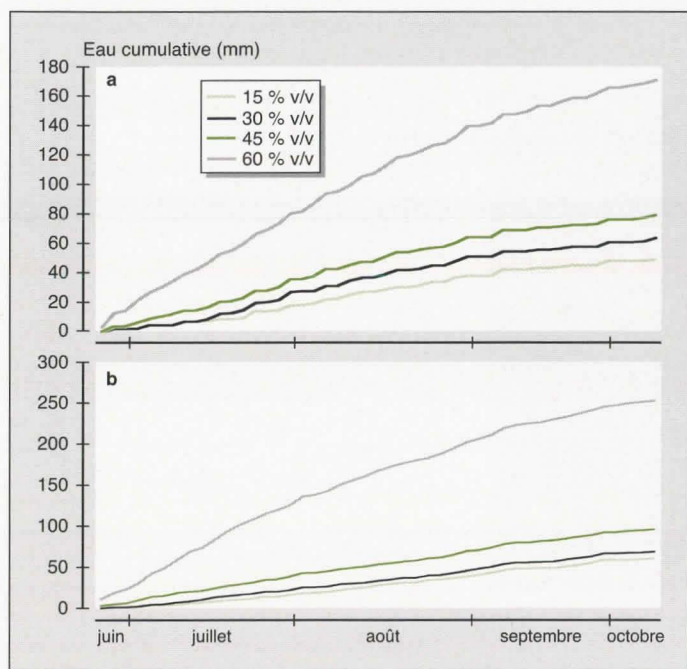


Figure 4. Suivi en continu des quantités d'eau utilisées après germination pour maintenir les quatre teneurs en eau au niveau de la rhizosphère des semis d'épinette blanche en 1998 (a) et d'épinette noire en 1999 (b) produits dans les récipients à parois ajourées sous tunnel [42, 43].

Figure 4. Continuous monitoring of the quantity of water used, after the germination phase, to maintain four different irrigation regimes for a) white spruce (1998) and b) black spruce (1999) seedlings grown in airlift containers in a tunnel [42, 43].

ments nutritifs peuvent dépasser 30 % de l'azote appliqué [48]. Le lessivage peut varier en fonction de la croissance et de l'architecture des racines qui ont un effet majeur sur la capacité d'absorption des éléments nutritifs. Pour assurer une production de plants respectueuse de l'environnement, il paraît judicieux de gérer l'irrigation et la fertilisation en tenant compte de la teneur en eau, de la fertilité du substrat et des besoins du plant (au lieu de la croissance et de la couleur des aiguilles et du feuillage). Cette approche permettra d'éviter le recours aux lessivages répétés pour diminuer la salinité du substrat causée soit par la combinaison d'un ajout excessif de fertilisants ou d'une eau riche, par exemple dans les zones semi-arides et arides, en carbonates. Dans les pays où on n'utilise pas des substrats à base de tourbe, le pépiniériste devrait choisir un substrat ayant des capacités de rétention en eau et d'échange cationique plus élevées afin de diminuer les irrigations très fréquentes et les pertes des ions par lessivage. Certains pépiniéristes utilisent des agents mouillants pour économiser l'eau et faciliter l'humectation du substrat suite à un dessèchement. Pour optimiser davantage les apports en eau et diminuer le lessivage des éléments minéraux, un modèle dynamique de la gestion de l'irrigation a été proposé en tenant compte de la réponse morphologique et physiologique des semis d'épinette blanche et d'épinette noire [39-43, 49], en fonction des stades de développe-

ment. Lors de la phase d'établissement (germination et apparition des cotylédons), la teneur en eau devrait être maintenue entre 40 et 45 % pour favoriser la germination et l'élongation de l'hypocotyle et éviter la formation de mousses. Durant la phase de croissance active, la teneur en eau pourrait être réduite pour osciller entre 30 et 40 %. Le début de la phase d'endurcissement des semis devra être déclenché lorsque les semis ont presque atteint la hauteur cible (7 à 8 cm), en réduisant la teneur en eau entre 18 et 25 % après une baisse de la photopériode et de la température de l'air, afin d'arrêter la croissance en hauteur et de favoriser la formation des bourgeons avec amélioration de la résistance au gel hâtif. D'autres scénarios de

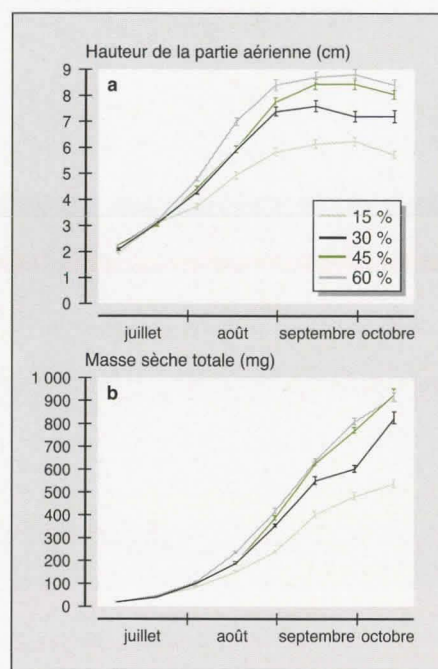


Figure 5. Évolution de la croissance en hauteur (a) et de la masse totale sèche (b) des semis d'épinette blanche soumis à quatre régimes d'irrigation (15, 30, 45 et 60 %, v/v) durant la première saison de croissance ($n = 72 \pm$ erreur standard) [42].

Figure 5. Development of a) height growth and b) total dry mass of white spruce seedlings grown under four different irrigation regimes (15, 30, 45 and 60%, v/v) during their first growing season ($n = 72 \pm$ standard error) [42].

production peuvent être introduits en faisant varier la régée d'irrigation pour induire un préconditionnement des semis à la sécheresse en vue d'améliorer leur résistance au stress hydrique.

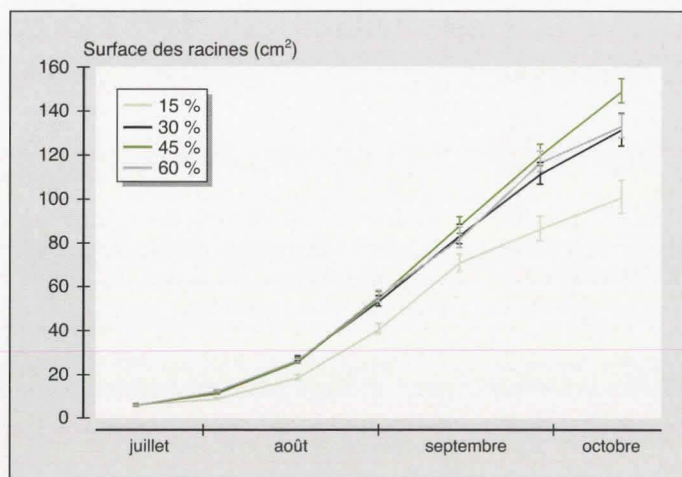


Figure 6. Évolution de la surface des racines des semis d'épinette blanche soumis à quatre régimes d'irrigation (15, 30, 45 et 60 %, v/v) durant la première saison de croissance ($n = 6 \pm$ erreur standard) [42].

Figure 6. Development of root surface area of white spruce seedlings grown under four different irrigation regimes (15, 30, 45, and 60%, v/v) during their first growing season ($n = 6 \pm$ standard error) [42].

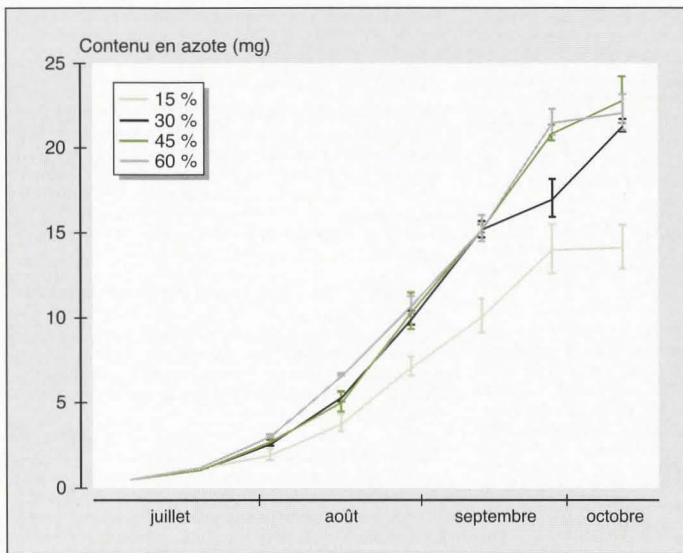


Figure 7. Contenu en azote saisonnier reflétant la capacité d'absorption de cet élément par les racines d'épinette blanche, en fonction des teneurs en eau au niveau de la rhizosphère (15, 30, 45 et 60 %, v/v), durant la première saison de croissance (n = 6 ± erreur standard) [42].

Figure 7. Seasonal nitrogen content, which reflects the capacity for nitrogen absorption by white spruce roots as a function of the water content of the rhizosphere (15, 30, 45, and 60%, v/v) during the first growing season (n = 6 ± standard error) [42].

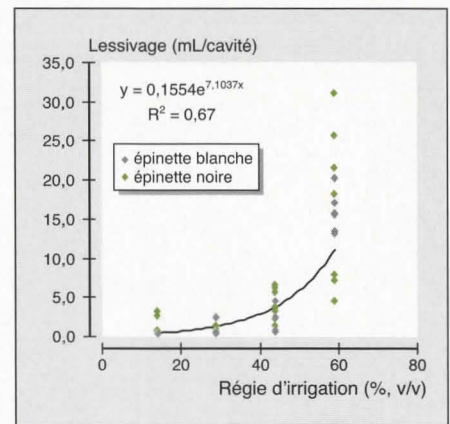


Figure 8. Variation du lessivage en fonction des régies d'irrigation (15, 30, 45 et 60 %, v/v) lors de la production des plants d'épinette noire et d'épinette blanche. Chaque point est la moyenne de six données (figure adaptée [42, 43]).

Figure 8. Variation in nutrient leaching as a function of the irrigation regime (15, 30, 45, and 60%, v/v) during the production of black spruce (1 + 0) and white spruce (1 + 0). Each point is the mean of six measurements (adapted from [42, 43]).

Conclusion et perspectives de recherche

Les résultats de nos travaux de recherche démontrent que la RDT peut être utilisée à l'échelle opérationnelle pour contrôler et gérer, en temps réel, l'irrigation en pépinière forestière [38-43, 46, 47]. Le développement de cette expertise en matière de gestion de l'irrigation, couplée à un contrôle de la fertilité du substrat, constitue une percée technologique importante. Son utilisation se traduira par une diminution des coûts de gestion des cultures (eau, fertilisants, entretien, main-d'œuvre, énergie, etc.) et par une amélioration de la qualité des plants, tout en diminuant significativement le lessivage des éléments minéraux et l'utilisation des pesticides, et par conséquent, une protection accrue de l'environnement. Cette nouvelle approche de gestion de l'eau est actuellement utilisée dans trois pépinières gouvernementales au Québec. Pour atteindre les normes très strictes des productions de PFD, les pépiniéristes utilisent des quantités importantes d'eau et de fertilisants durant la deuxième saison de croissance. Malgré l'amélioration des propriétés physico-chimiques des substrats [50, 51], il s'avère nécessaire d'optimiser l'utilisation de l'eau et des fertilisants par les plants en tenant compte des précipitations et de la variabilité spatiale générée par les aspersion. En effectuant un suivi et des enregistrements continus de la

teneur en eau du substrat au niveau de la rhizosphère, la RDT peut être couplée avec la commande automatique de l'irrigation en tenant compte des exigences en eau de chaque essence forestière. Par la suite, il reste à compléter le transfert technologique auprès des pépinières gouvernementales et privées.

L'atout majeur de cette approche de gestion de l'irrigation respectueuse de l'environnement est qu'elle peut s'intégrer facilement dans les nouvelles normes ISO 14000 qui portent sur les systèmes de gestion environnementale. De cette

façon, les pépinières, les papeteries et les scieries peuvent démontrer que la certification de l'aménagement forestier ne se limite pas uniquement aux pratiques forestières, mais englobe aussi la filière de la régénération artificielle depuis la production de plants en pépinières forestières.

Summary

Time domain reflectometry: an optimizing technique for the irrigation and reduction of nutrient leaching in forest nurseries in Quebec

M.S. Lamhamedi, M. Renaud, H. Margolis

We review and discuss the gradual introduction and use of time domain reflectometry (TDR) at an operational level in Quebec forest nurseries as a means of controlling and optimizing irrigation, while also significantly reducing the leaching of mineral nutrients into the water table. This approach simplifies irrigation management by enabling nursery managers to easily verify whether irrigation is necessary. The MP-917, equipped with a stainless steel probe and two diodes, is easy to use and provides rapid, precise results. This technique for controlling irrigation as a function of seedling phenology decreases production costs (water, labour, fertilizers, machinery maintenance, energy use, etc.) and improves seedling quality while significantly decreasing nutrient leaching and the use of pesticides. The major advantage of this approach is that the irrigation management strategy respects the environment and can be easily integrated into new environmental management standards (e.g., ISO 14000 series). This irrigation management technique can also be used in arid or semi-arid zones where water management and conservation are of utmost importance for sustainable development.

Cahiers Agricultures 2002 ; 11 : 275-83.

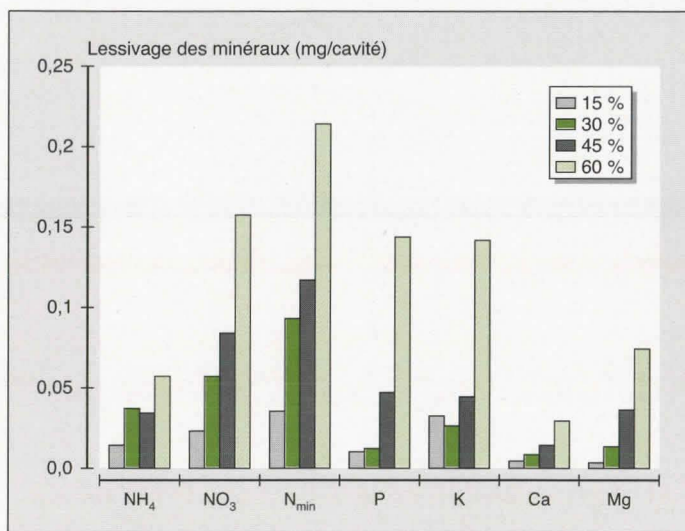


Figure 9. Pertes en éléments minéraux, en fonction des régies d'irrigation, en réponse à une fertilisation similaire entre les quatre régies d'irrigation (15, 30, 45 et 60 %, v/v), tout en maintenant la même fertilité du substrat entre les régies d'irrigation évaluées (épinette blanche 1 + 0) [42].

Figure 9. Loss of mineral elements as a function of irrigation regime (15, 30, 45, and 60%, v/v) in response to similar fertilization treatments. The same level of substrate fertility was maintained in all four irrigation treatments (white spruce 1 + 0) [42].

Les techniques d'irrigation pratiquées dans les pépinières situées dans les zones semi-arides et arides sont très consommatrices d'eau. Le risque de pénurie est devenu une réalité certaine dans plusieurs pays (figure 1) où la maîtrise de la gestion de l'eau représente un enjeu capital en termes de développement durable et du maintien, par exemple, de plusieurs oasis viables. Cette technique simple de gestion de l'irrigation peut être adaptée à plusieurs secteurs comme les pépinières horticoles et forestières, la gestion des palmeraies et des cultures en sous-étage dans les oasis et les grandes cultures en zones irriguées ■

Remerciements

Nous tenons à remercier les responsables et les équipes techniques du Centre de production de plants forestiers du Québec (CPPFQ, Canada), de la pépinière forestière de Grandes-Piles, de la Direction de la recherche forestière (DRF, MRN, Forêt Québec), du service canadien des forêts (Québec) et de l'université Laval pour leur soutien continu lors de nos travaux, et plus particulièrement Gil Lambany, le Dr Pierre Yves Bernier, Serge Plamondon, Richard Gohier, Rosaire Tremblay, Lyne Lachance, Jean-Marie Johnston, Michel Beauchesne, Chantal Pelletier, Daniel Girard, Linda Veilleux, Munyonge Abwe Wa Massabo et Debbie Stowe. Nous remercions également tout le personnel du Service des expertises scientifiques ayant participé aux analyses du substrat et des plants (DRF, MRN, Forêt Québec). L'appui financier de ce projet de recherche est assuré par le ministère des Ressources naturelles du Québec (projet 0204 271S) et le Fonds international de coopération universitaire de l'Agence universitaire de la Francophonie (projet 2000/PAS/15).

Références

- Cramer B. L'eau en péril. *Science et Vie* 1996 ; 946 : 82-5.
- Riou C. L'eau et l'agriculture : pourra-t-on éviter une crise ? *Cahiers Agricultures* 1998 ; 8 : 295-300.
- Pepper IL, Gerba CP, Brusseau ML, Brendecke JW. *Pollution Science*. San Diego : Academic Press, 1996 ; 397 p.
- Ministère de l'Environnement du Québec. *Règlement sur l'eau potable. Q-2, r.4.1*. 1984 : 169-75.
- Bacon PE. *Nitrogen Fertilization in the Environment*. New York : Marcel Dekker, Inc., 1995 ; 608 p.
- Hamilton PA, Helsel DR. Effects of agriculture on ground-water quality in five regions of the United States. *Ground Water* 1995 ; 33 : 217-26.
- Coalition canadienne pour la certification de la foresterie durable. Leadership in certification forestière au Canada. *Bull Forest Durable* 2000 ; 6 : 2-4. www.sfms.com.
- Bélanger L. Les conséquences sur le terrain d'une certification de l'aménagement forestier durable : un réalignement majeur de notre foresterie. *Aubelle* 1997 ; 118 : 15-7.
- Caron S. Du développement durable à la certification des pratiques forestières. *Aubelle* 1995 ; 111 : 17-20.
- Têtu P, Bégin J. Les normes CSA sur le système d'aménagement forestier durable, un nouvel outil pour l'ensemble du secteur forestier. *Aubelle* 1996 ; 115 : 10-2.
- Gingras BM. *Bilan des essais expérimentaux sur la production en récipients de plants de fortes dimensions*. Sainte-Foy, Québec : ministère des Ressources naturelles, Direction de la recherche forestière, 1993 ; 20 p.
- Jobidon R, Charette L, Bernier PY. Initial size and competing vegetation effects on water stress and growth of *Picea mariana* (Mill.) BSP seedlings planted in three different environments. *Forest Ecology Management* 1998 ; 13 : 293-305.
- Lamhamedi MS, Bernier PY, Hébert C, Jobidon R. Physiological and growth responses of

three sizes of containerized *Picea mariana* seedlings outplanted with and without vegetation control. *Forest Ecology Management* 1998 ; 110 : 13-23.

14. Gingras BM, Richard S. *Bilan du développement des récipients à parois ajourées : culture des semis en pépinière et performance en plantations comparatives*. Sainte Foy : Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles, Forêt Québec, Direction de la recherche forestière, Mémoire de recherche forestière, n° 130, 1999 ; 74 p.

15. Landis TD. Irrigation and water management. In : Landis TD, Tinus RW, McDonald SE, Barnett JP, eds. *Seedling Nutrition and Irrigation, Volume 4, The Container Tree Nursery Manual*. Agriculture Handbook 674. Washington DC : US Department of Agriculture, Forest Service, 1989 : 69-118.

16. Tinus RW, McDonald SE. *How to grow tree seedlings in containers in greenhouses*. Gen. Tech. Rep. RM-60. Ft. Collins, CO : US Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Forest and Range Experiment Station, 1979 ; 256 p.

17. Myren DT. *Maladies des arbres de l'est du Canada*. Ottawa : Ressources naturelles Canada, service canadien des forêts, Direction des sciences et du développement durable, 1994 ; 159 p.

18. Dixon RK, Behrns GT, Garrett HE, Cox GS, Sander IL. Synthesis of ectomycorrhizae on container-grown oak seedlings. *Southern J Appl Forest* 1985 ; 9 : 95-9.

19. Castellano MA, Molina R. Mycorrhizae. In : Landis TD, Tinus RW, McDonald SE, Barnett JP, eds. *The Biological Component: Nursery Pests and Mycorrhizae, Volume 5, The Container Tree Nursery Manual*. Agriculture Handbook 674. Washington DC : US Department of Agriculture, Forest Service, 1989 : 101-67.

20. Dixon RK, Pallardy SG, Garrett HE, Cox GS, Sander IL. Comparative water relations of container-grown and bare-root ectomycorrhizal and nonmycorrhizal *Quercus velutina* seedlings. *Can J Botany* 1983 ; 61 : 1559-65.

21. Fellner-Feldegg H. The measurements of dielectrics in the time domain. *J Physical Chemistry* 1969 ; 73 : 616-23.

22. Rundel PW, Jarrell WM. Water in the environment. In : Pearcy RW, Ehleringer JR, Mooney HA, Rundel PW, eds. *Plant Physiological Ecology. Field methods and instrumentation*. New York : Chapman and Hall, 1991 : 29-56.

23. Cameron RWF, Harrison-Murray RS, Scott MA. The use of controlled water stress to manipulate growth of container-grown *Rhododendron cv. Hoppy*. *J Horticulture Sci Biotechnology* 1999 ; 74 : 161-9.

24. Hansen RC, Pasian CC. Using tensiometers for precision microirrigation of container-grown roses. *Appl Engineer Agriculture* 1999 ; 15 : 483-90.

25. Testezlaf R, Larsen CA, Yeager TH, Zazueta FS. Tensiometric monitoring of container substrate moisture status. *Hort Technology* 1999 ; 9 : 105-9.

26. Villar-Salvador P, Ocaña L, Peñuelas J, Carasco I. Effect of water stress conditioning on the water relations, root growth capacity, and the nitrogen and non-structural carbohydrate concentration of *Pinus halepensis* Mill. (Aleppo pine) seedlings. *Ann Forest Sci* 1999 ; 56 : 459-65.

27. Anisko T, Nesmith DS, Lindstrom OM. Time domain reflectometry for measuring water content of organic growing media in containers. *Hort Sci* 1994 ; 29 : 1511-3.
28. Da Silva FF, Polak WA, Chen Y. Measuring water content of soil substitutes with time-domain reflectometry (TDR). *J Am Soc Hort Sci* 1998 ; 123 : 734-7.
29. Pépin S, Plamondon AP, Stein J. Peat water content measurement using time domain reflectometry. *Can J Forest Research* 1992 ; 22 : 534-40.
30. Richardson MD, Meisner CA, Hoveland CS, Karnok KJ. Time domain reflectometry in closed container studies. *Agronomy J* 1992 ; 84 : 1061-3.
31. Topp GC. Time-domain reflectometry (TDR) and its application to irrigation scheduling. *Adv Irrigation* 1985 ; 3 : 107-27.
32. Topp GC. *The application of time-domain reflectometry (TDR) to soil water content measurement*. International Conference on Measurement of Soil and Plant Water Status, Utah State University, 1987 : 85-93.
33. Topp GC, Watt M, Hayoe HN. Point specific measurement and monitoring of soil water content with an emphasis on TDR. *Can J Soil Sci* 1996 ; 76 : 307-16.
34. Noborio K, Horton R, Tan CS. Time domain reflectometry probe simultaneous measurement of soil matric potential and water content. *Soil Sci Soc Am J* 1996 ; 63 : 1500-5.
35. Das BS, Wraith JM, Inskip WP. Nitrate concentration in the root zone estimated using time domain reflectometry. *Soil Sci Soc Am J* 1999 ; 63 : 1561-70.
36. Lamhamedi MS, Bernier PY, Hébert C. Effect of shoot size on the gas exchange and growth of *Picea mariana* seedlings under different watering regimes. *New Forests* 1997 ; 13 : 209-23.
37. Robidas L. *Développements morphologique et physiologique de plants de Picea glauca et de Picea mariana produits en récipients conventionnels et à parois ajourées*. Thèse de maîtrise, Université Laval, Sainte-Foy, Québec, 1995 ; 108 p.
38. Lambany G, Robidas L, Ballester P. Measurements of soil water content in a peat-vermiculite medium using time domain reflectometry (TDR): a laboratory and field evaluation. *Tree Planters' Notes* 1996 ; 47 : 88-93.
39. Lambany G, Renaud M, Beauchesne M. Control of growing medium water content and its effects on small seedlings grown in large containers. *Tree Planters' Notes* 1997 ; 48 : 48-54.
40. Lambany G. Gestion de l'irrigation et de la fertilisation de productions d'épinettes 1 + 0 cultivées dans le récipient IPL 25-350A. In : Veilleux L, Renaud M, Lambany G, eds. *Synthèse des textes des conférences présentées dans le cadre du Colloque sur l'irrigation et la fertilisation*. Sainte-Foy : Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles, Direction de la recherche forestière, 1998 : 1-8.
41. Lamhamedi MS, Lambany G, Renaud M, Veilleux L, Plamondon S. *Gestion de l'irrigation en pépinière et évaluation des semis d'épinette blanche produits dans les récipients à parois ajourées*. Sainte-Foy : Ministère des Ressources naturelles, Forêt Québec, Direction de la recherche forestière. Mémoire de recherche forestière 2000, 138 ; 36 p.
42. Lamhamedi MS, Lambany G, Margolis H, Renaud M, Veilleux L, Bernier PY. Growth, physiology and leachate losses in *Picea glauca* seedlings (1 + 0) grown in air-slit containers under different irrigation regimes. *Can J Forest Res* 2001 ; 31 : 1968-80.
43. Lamhamedi MS, Margolis H, Renaud M, Veilleux L. Effets de différentes régies d'irrigation sur la croissance, la nutrition minérale et le lessivage des éléments nutritifs des semis d'épinette noire (*Picea mariana*) (1 + 0) produits dans les récipients à parois ajourées en pépinière forestière. *Can J Forest Res* 2002 (sous presse).
44. Langlois CG, Gagnon J. A global approach to mineral nutrition based on the growth needs of seedlings produced in forest tree nurseries. In : Barrow NJ, ed. *Plant Nutrition: from Genetic Engineering to Field Practice*. Netherlands : Kluwer Academic Publishers, 1993 : 303-6.
45. Girard, D, Gagnon J, Langlois C-G. *PLAN-TEC : un logiciel pour gérer la fertilisation des plants dans les pépinières forestières*. Sainte-Foy, Québec : Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles, Direction de la recherche forestière. Note de recherche forestière n° 111, 2001 ; 8 p.
46. Stowe DC, Lamhamedi MS, Margolis H. Water relations, cuticular transpiration and bud characteristics of air-slit containerized *Picea glauca* seedlings in response to controlled irrigation regimes. *Can J Forest Res* 2001 ; 31 : 2200-12.
47. Glinski J, Lipeic J. *Soil physical conditions and plant roots*. Boca Raton (Florida) : CRC Press Inc., 1990 ; 250 p.
48. Gagnon J, Girard D. Bilan des pertes saisonnières de nitrates (NO₃⁻) et d'eau sous une culture d'épinette blanche 2 + 0 produite dans le récipient 25-350A. Sainte-Foy : Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles, Forêt Québec, Direction de la recherche forestière. Rapport interne n° 466, 2001 ; 36 p.
49. Gingras BM, Girard D, Renaud M, Richard S, Lambany G. *Guide pratique pour la culture de plants de fortes dimensions d'épinette blanche dans des récipients de 350 cm³*. Sainte-Foy : Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles, Forêt Québec, Direction de la recherche forestière. Rapport interne, n° 445, 1999 ; 31 p.
50. Landis TD, Tinus RW, McDonald SE, Barnett JP eds. *Containers and Growing Media, Volume 2, The Container Nursery Manual*. Agriculture Handbook 674. Washington DC : US Department of Agriculture, Forest Service, 1990 ; 87 p.
51. Guehl JM, Falconnet G, Gruez J. Caractéristiques physiologiques et survie après plantation de plants de *Cedrus atlantica* en conteneurs sur différents types de substrats de culture. *Ann Sci Forest* 1989 ; 46 : 1-14.

Résumé

Cette synthèse met l'accent sur l'utilisation de la réflectométrie dans le domaine temporel (RDT) à l'échelle opérationnelle dans les pépinières forestières hors sol du Québec pour contrôler et optimiser l'irrigation, et réduire le lessivage des éléments minéraux. Cette approche facilite la prise de décision en temps réel et la gestion de l'irrigation par le pépiniériste. L'utilisation du *MP-917* doté d'une sonde à double diode est une technique rapide, souple d'emploi et très précise. Son emploi en fonction des stades de croissance permet une diminution des coûts de gestion des cultures (eau, fertilisants, entretien, main-d'œuvre, énergie, etc.), une amélioration de la qualité des plants, tout en diminuant significativement le lessivage des éléments minéraux et l'utilisation des pesticides, et par conséquent, en assurant une protection accrue de l'environnement. L'atout majeur de cette approche de gestion de l'irrigation est son intégration aisée dans les nouvelles normes (standard international ISO 14000) qui portent sur les systèmes de gestion environnementale. Elle pourra facilement être transposée dans les pépinières situées dans les zones semi-arides et arides où la maîtrise de la gestion de l'eau représente un enjeu capital en termes de développement durable.

