

le naturaliste canadien

LA SOCIÉTÉ PROVANCHER
D'HISTOIRE NATURELLE
DU CANADA

Tiré-à-part

La sylviculture des plantations résineuses au Québec

*Nelson Thiffault, Vincent Roy, Guy Prigent,
Guillaume Cyr, Robert Jobidon et Jean Ménétrier*

Volume 127, numéro 1 – Hiver 2003

Pages 63-80

La sylviculture des plantations résineuses au Québec

Nelson Thiffault, Vincent Roy, Guy Prigent,
Guillaume Cyr, Robert Jobidon et Jean Ménétrier

Introduction

Au Québec, les premières plantations d'importance ont été réalisées entre 1913 et 1932, près de la ville de Grand-Mère. D'un à deux millions qu'elle était en 1960, la production annuelle de plants résineux destinés au reboisement est passée à 50 millions dans les décennies 1960 et 1970. Elle a dépassé le cap des 250 millions au cours des années 1980. Aujourd'hui, le reboisement demeure une activité sylvicole d'importance. De 130 à 150 millions de plants sont mis en terre annuellement, sur des superficies totalisant près de 80 000 ha (Parent, 2002). La Stratégie de protection des forêts (Gouvernement du Québec, 1994) stipule que lorsque la régénération naturelle permet d'obtenir une quantité adéquate de semis de qualité dans un délai acceptable, on doit la favoriser. Le reboisement est donc un complément à la régénération naturelle. Il permet de remettre en production les superficies peu ou mal régénérées naturellement, soit 15 à 18 % des superficies exploitées. De plus, grâce à l'utilisation de semences améliorées et au recours à des espèces à croissance rapide, la foresterie de plantation permet d'augmenter le rendement des forêts. Ce rendement additionnel lié au reboisement permettrait de réduire les superficies des forêts naturelles exploitées, sans réduction du volume total de bois récolté.

Depuis l'adoption de la Stratégie de protection des forêts, qui préconisait notamment l'abandon de l'utilisation des phytocides pour l'entretien des plantations (Gouvernement du Québec, 1994), les défis sont encore plus grands pour mettre au point des solutions de rechange permettant d'amener les plants au stade de croissance libre et de maintenir la productivité des stations reboisées. Les efforts passés et actuels de recherche et de contrôle de la qualité dans les domaines de la production de plants et de leur mise en terre, ont permis d'améliorer les standards de qualité. Toutefois, l'atteinte des objectifs liés à la productivité d'une plantation résineuse est tributaire des efforts sylvicoles qui y sont investis à toutes les étapes de la croissance du peuplement, depuis le choix de l'essence jusqu'à la récolte finale. L'objectif de cet article est de discuter des aspects majeurs de la sylviculture des plantations des principales espèces résineuses dans le contexte de la foresterie québécoise.

L'essence et le type de plant

La production de semences de haute qualité à partir du réseau de vergers à graines du Québec et la production de plants par les réseaux de pépinières constituent des préalables essentiels à la conduite d'une sylviculture de plantations qui soit à la hauteur des besoins de la société en matière ligneuse.

La bonne espèce, au bon endroit

Le choix d'une espèce est en relation avec les caractéristiques de la station; il est d'une importance cruciale pour assurer l'établissement d'une plantation. Savill *et al.* (1997) proposent un processus de sélection en trois étapes (figure 1). Lorsque les caractéristiques de la station ont bien été évaluées, en termes de climat, de sol, de propensions aux attaques de différents facteurs biotiques et autres facteurs écologiques (A), il faut déterminer, parmi les espèces disponibles, celles dont les caractéristiques sylvicoles sont compatibles avec de telles conditions (B). Finalement, parmi les espèces potentielles, il importe de choisir celles qui répondent le mieux aux objectifs de production (C). Au Québec, les exigences écologiques des principales espèces résineuses utilisées dans le reboisement ont été documentées (Cauboue et Malenfant, 1988) et des guides pour le choix des espèces ont été élaborés (Cauboue, 1988). Globalement, les épinettes (*Picea glauca* (Moench) Voss, *P. mariana* (Mill.) BSP, *P. abies* (L.) Karst.) s'accommodent d'une grande variété de stations, mais présentent les meilleures croissances sur les sols fertiles, de textures fine à moyenne, qui sont bien à modérément bien drainés. Pour leur part, les pins (*Pinus banksiana* Lamb., *P. resinosa* Ait., *P. strobus* L.) s'accommodent de sols bien drainés plutôt sablonneux. Quant aux mélèzes européen (*Larix decidua* Mill.), du Japon (*L. kaempferi* (Lamb.) Carrière) et hybride (*L. × marschlinsii* Coaz.), ils nécessitent des stations bien à modérément bien drainées et ne tolèrent pas le mauvais drainage (Carter et Selin, 1987). Enfin, le mélèze laricin (*L. laricina* (Du Roi) Koch) est, par contraste, en mesure de tolérer une grande variété de conditions de drainage (Carter

Nelson Thiffault, Vincent Roy, Guy Prigent, Guillaume Cyr, Robert Jobidon et Jean Ménétrier sont chercheurs scientifiques à la Direction de la recherche forestière, ministère des Ressources naturelles du Québec.

et Selin, 1987). Sa croissance dépasse largement celle des épinettes et des pins sur les stations à mauvais drainage (Hall, 1983). Néanmoins, sa croissance est maximale sur les stations mieux drainées.

Les essences résineuses utilisées pour le reboisement n'affichent pas toutes le même potentiel de croissance. L'épinette noire est l'espèce la plus utilisée pour le reboisement (Parent, 2002). Toutefois, elle est celle dont le rendement annuel moyen est le plus faible. Sur des stations de qualité moyenne, le rendement de l'épinette noire ($4,1 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$) (Prégent *et al.*, 1996) est dépassé par celui de l'épinette blanche ($4,6 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$), du pin gris ($5,2 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$), de l'épinette de Norvège ($6,5 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$), du mélèze européen ($7,1 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$) et du pin rouge ($9,1 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$) (Bolghari et Bertrand, 1984). Les mélèzes du Japon et hybride ont des rendements supérieurs à $12 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ (Fowler *et al.*, 1988).

Les principales espèces résineuses commerciales du Québec sont utilisées principalement pour le sciage et les pâtes et papiers (Zhang et Koubaa, 2002). Les efforts à investir dans l'établissement, l'entretien et l'éducation des plantations devraient toutefois impliquer un objectif prioritaire de production de bois d'œuvre.

En somme, on préconise l'utilisation d'espèces adaptées aux conditions des stations, qui présentent les meilleurs potentiels de croissance possible, et qui permettront d'atteindre les objectifs de production. Tel que précisé dans la Stratégie québécoise de protection des forêts (Gouvernement du Québec, 1994), le choix de la bonne espèce atténuera les stress d'adaptation liés à la plantation et favorisera la résistance des peuplements aux insectes et aux maladies.

Le type de plant

Le Québec possède une grande expertise dans le domaine de la production de plants forestiers. Le développement, de même que l'utilisation de systèmes de bouturage à grande échelle, de systèmes précis de gestion de l'irrigation, de logiciels de suivi de la nutrition minérale des plants et du lessivage des éléments nutritifs sous les cultures, en sont des exemples probants. Grâce à l'évolution des techniques de production en pépinière, les forestiers ont à leur disposition une grande variété de produits. Les caractéristiques des types de plants varient selon deux critères principaux : les dimensions initiales et la morphologie du système racinaire. Le statut nutritionnel est maintenant devenu un paramètre d'utilisation courante.

La dimension initiale des plants influence leur potentiel de croissance et leur statut compétitif. Les plants de plus fortes dimensions ont une plus grande capacité photosynthétique, ce qui leur confère une meilleure croissance et un meilleur accès aux ressources environnementales, principalement la lumière (Jobidon *et al.*, 1998), sans pour autant qu'ils soient davantage sensibles à de plus forts stress hydriques (Lamhamedi *et al.*, 1998). Au Québec, les dimensions à la mise en terre varient d'environ 15 cm en hauteur pour

les plants de très petites dimensions, à environ 60 cm pour les plants de fortes dimensions (PFD), avec de nombreuses dimensions intermédiaires (Gouvernement du Québec, 1999; 2000). Le choix de la dimension du plant à utiliser se fait en fonction des risques associés à l'envahissement de la station par les espèces de compétition (voir les sections *Le phénomène de compétition* et *Le dégagement*).

Les plants de reboisement sont produits à racines nues ou en récipients. Le système racinaire des plants produits à racines nues, dans des plates-bandes extérieures, se développe avec peu de contraintes d'expansion. Par contraste, les plants produits en récipients ont un système racinaire contenu dans un substrat de tourbe et de vermiculite d'un volume fini. De plus, la période de production ainsi que la densité de production (nombre de plants produits par mètre carré) varient. Les architectures racinaire et aérienne des deux types de plants sont donc différentes. Ces différences morphologiques peuvent se traduire par des réactions propres à chaque type de plant, après la mise en terre. Les plants à racines nues éprouvent généralement un stress de plantation plus important que les plants en récipients, qui peut se traduire par une mortalité accrue (Nilsson et Örlander, 1995). Ce stress plus élevé serait le résultat d'une perméabilité moindre du système racinaire (Grossnickle, 2000) et des blessures infligées aux racines fines au cours des travaux de mise en terre (Kozłowski, 1982). Une attention particulière est apportée au choix du type de récipient utilisé pour la production, d'abord en raison du lien direct entre le volume des cavités du récipient et les dimensions du semis à produire (Lamhamedi *et al.*, 1997), ensuite, en raison des

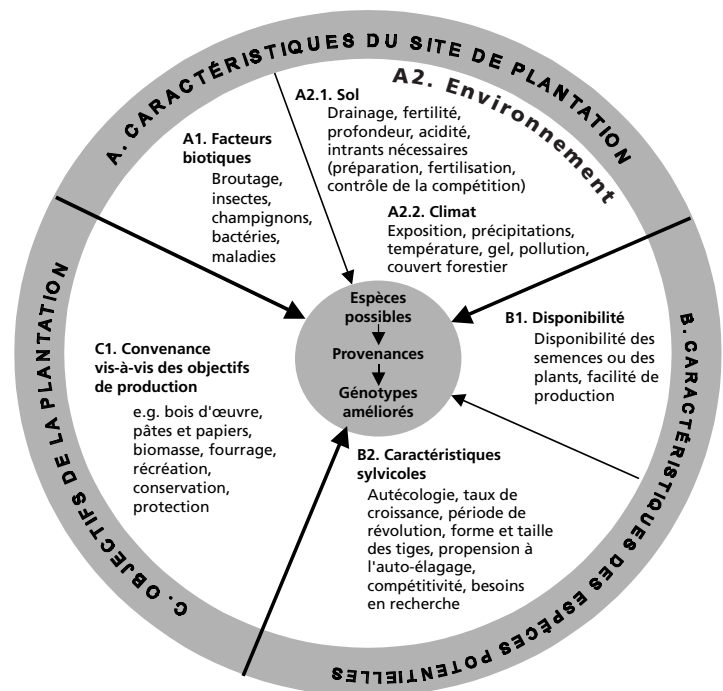


Figure 1. Considérations dans le choix de l'espèce. ©Savill *et al.* (1997). Traduit et reproduit de *Plantation Silviculture in Europe* de Peter Savill *et al.* (1997) avec la permission de Oxford University Press.

impacts sur l'architecture du système racinaire et de ses effets sur la stabilité future des arbres (Gingras *et al.*, 2002).

De plus en plus de renseignements deviennent disponibles au Québec sur la performance comparative des plants en récipients et à racines nues, notamment en lien avec les travaux sylvicoles qui précèdent et suivent la mise en terre. Dans un bilan de la performance des plantations québécoises couvrant la période de 1986 à 1995, Trottier (1998) constate que les plants produits en récipients conventionnels (45 cavités de 110 cm³ et 67 cavités de 50 cm³) ont présenté un taux de survie légèrement supérieur à celui des plants produits à racines nues. Par contre, les plants à racines nues, plus hauts au moment de leur mise en terre, ont conservé cet avantage tout au long de la période d'établissement. Les expérimentations de Thiffault *et al.* (soumis-a) ont montré que des PFD produits en récipients (25 cavités de 350 cm³ à parois ajourées) présentaient, après trois ans, des dimensions légèrement supérieures à celles de PFD à racines nues, malgré des dimensions inférieures au moment de la mise en terre. Il apparaît que le choix de plants en récipients ou à racines nues a une influence mineure sur le succès d'établissement d'une plantation, du moins en regard de leur croissance et de leurs réactions en bas âge aux traitements sylvicoles. Les contraintes techniques liées au transport, à la distribution et à la mise en terre devraient constituer les principaux facteurs guidant le choix d'un plant en récipient ou à racines nues. Il importe de préciser que ces différentes étapes d'un programme de reboisement sont autant de phases sensibles et qu'il est donc essentiel qu'elles soient réalisées avec soin, sans égard au type de plant utilisé (Paterson *et al.*, 2001).

De nouvelles techniques de production ont été développées ces dernières années, qui permettent d'obtenir des plants dont les teneurs en éléments nutritifs sont plus élevées que les standards traditionnels (Timmer, 1997). Cet atout confère au plant une meilleure croissance dans les milieux pauvres en azote (Timmer et Munson, 1991). Des expériences sont en cours afin d'évaluer les réactions nutritionnelle et de croissance de tels plants, sur certains sites problématiques de la forêt boréale québécoise.

Les densités de reboisement

La densité de reboisement influence grandement l'évolution de la plantation et le scénario sylvicole. La densité de reboisement n'influence généralement pas la hauteur dominante et donc pas l'indice de qualité de station (IQS : relation entre l'âge et la hauteur des individus dominants ou codominants pour une station donnée) (Carmean, 1975). La forme de la tige, la mortalité et la grosseur des branches, la qualité du bois, la production à l'hectare ainsi que par arbre, la survie, la stabilité de la plantation, la rentabilité des éclaircies et les aspects économiques sont les principaux facteurs à prendre en compte pour le choix d'une densité de reboisement. Des avantages et des désavantages sont liés à de faibles densités comme à de fortes densités. La densité de reboisement influence certains attributs du peuplement,

potentiellement jusqu'à la fin de la révolution. Il importe de considérer que les différences qui en résultent peuvent être plus ou moins importantes, relativement à l'ensemble des caractéristiques du peuplement. De plus, les analyses doivent se restreindre à des densités économiquement viables, inférieures à 3000 tiges ha⁻¹.

Une densité de reboisement faible favorise la croissance en diamètre. Pour une qualité de station moyenne (IQS = 9 m à 25 ans) et sans scénario d'éclaircies, le diamètre à hauteur de poitrine (DHP : diamètre des arbres mesurés à 1,30 m au-dessus du sol) moyen de l'épinette blanche à 50 ans est de 19,4 cm à une densité de 2 500 plants ha⁻¹ et de 21,9 cm à 1600 plants ha⁻¹ (Bolghari et Bertrand, 1984). L'écart en volume moyen par tige est de 43,5 dm³, soit de 27,8 %. Ces différences sont encore plus importantes sur des stations très fertiles, même en absence d'éclaircie; pour un IQS = 12 m à 25 ans, le DHP à 50 ans passe de 23,2 cm à 26,6 cm et le volume moyen de 264,2 dm³ à 346,5 dm³ (Bolghari et Bertrand, 1984). Les dimensions des tiges sont également plus homogènes à une faible densité de reboisement (Bacon *et al.*, 1982; Riou-Nivert, 1989). Les plantations à faible densité de reboisement offrent une meilleure résistance aux agents abiotiques et une meilleure stabilité (Cremer *et al.*, 1982; Oswald, 1984; Bastien, 1986).

Une densité de reboisement relativement faible permet de réduire les coûts d'établissement en plus d'améliorer la rentabilité de la première éclaircie. Celle-ci peut être réalisée plus tardivement et les bois sont alors plus gros (Prégent, 1998). La densité de reboisement influence les caractéristiques de toutes les coupes que ce soit les coupes d'éclaircies commerciales ou la coupe finale. Le lien entre le nombre de tiges et le DHP moyen des tiges coupées à la première éclaircie commerciale des plantations est présenté à la figure 2. Pour une même valeur de surface terrière (somme des surfaces de la section transversale des tiges mesurées au DHP, par unité de superficie), le DHP des arbres coupés diminue lorsque le nombre de tiges augmente (Prégent, en préparation). La densité de reboisement détermine en grande partie les caractéristiques et la rentabilité de l'éclaircie suivante de même que le succès du scénario sylvicole.

Les plantations à faible densité ont généralement un plus fort taux de survie (Reukema, 1979; Stiell, 1986; Bowling, 1987), en conséquence de la mortalité naturelle attribuable aux processus d'autoéclaircie qui surviennent lorsque la compétition pour la lumière entre les individus dépasse un seuil critique. Selon Bolghari et Bertrand (1984), le taux de survie à 50 ans de l'épinette blanche sur des stations moyennement fertiles (IQS = 9 m à 25 ans) est de 59,4 % pour une densité de 2 500 plants ha⁻¹ et de 69,5 % à 1 600 plants ha⁻¹. L'écart original de 900 tiges ha⁻¹ n'est plus que de 373 tiges ha⁻¹ à cet âge. Cet écart est encore plus faible pour des stations plus fertiles (Bolghari et Bertrand, 1984). Ainsi, le nombre de tiges à la fin de la révolution est assez peu dépendant de la densité de reboisement (Riou-Nivert et Laden, 1991).

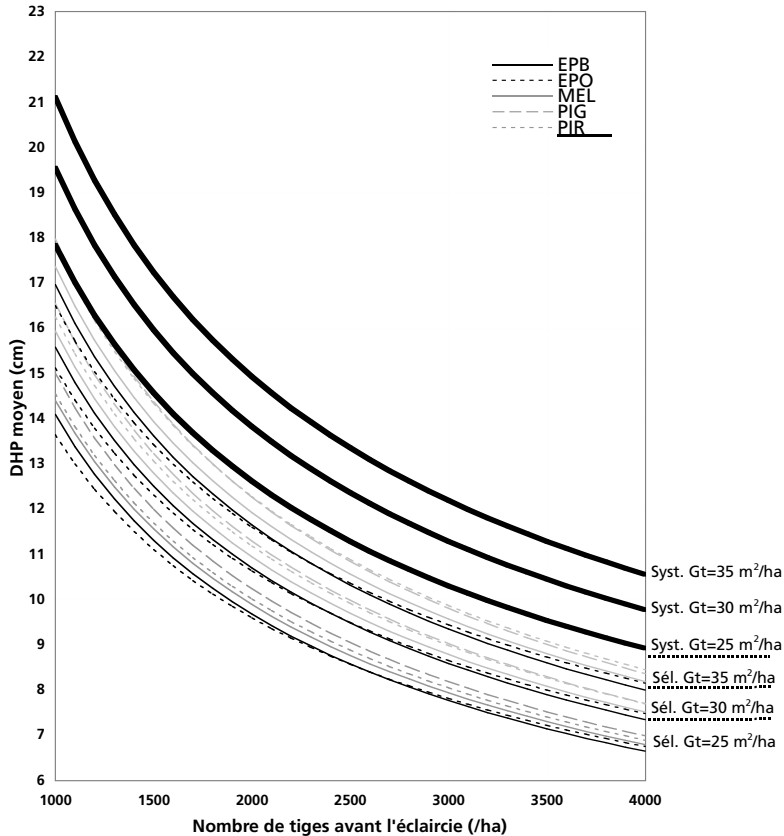


Figure 2. Diamètre à hauteur de poitrine (DHP) moyen des arbres coupés à la première éclaircie en fonction de l'essence, du type d'éclaircie, de la surface terrière (Gt) et du nombre de tiges avant l'éclaircie. Les résultats pour les éclaircies systématiques (en traits plus épais) sont valables pour toutes les essences et les intensités d'éclaircie; ceux des éclaircies sélectives (en traits plus minces) varient selon les essences et sont valables seulement pour un taux de prélèvement de 33,3 % de surface terrière. EPB : épinette blanche; EPO : épinette de Norvège; MEL : mélèze laricin; PIR : pin rouge. Source : Prigent (en préparation)

La densité de reboisement influence peu la production par unité de superficie. L'écart est faible et son importance diminue avec le temps (Jones, 1987), de sorte que dès que le couvert arborescent est fermé, la production tend vers une valeur indépendante de la densité du peuplement (Riou-Nivert et Georgeot, 1982). Pour l'épinette blanche sur des qualités de station près de la moyenne (IQS = 9 m à 25 ans), on prédit à 50 ans une production de 232,9 m³ ha⁻¹ à une densité de 2 500 plants ha⁻¹ alors qu'elle est de 222,8 m³ ha⁻¹ à une densité de 1 600 plants ha⁻¹ (figure 3). De plus, cette différence de volume est composée en grande partie de bois de faibles dimensions (Reukema, 1970; Oswald, 1984).

Pour des valeurs variant entre 1 600 et 2 268 plants ha⁻¹, la densité de reboisement a peu d'effets sur la hauteur de la première branche vivante, la rectitude du fût, la présence de nœuds plats, les bris et les courbures de tiges, la densité basale du bois, la largeur des cernes, de même que sur la grosseur des branches (Lundgren, 1981; Flammarion, 1988; Johansson, 1993). Le caractère plus cylindrique des tiges plantées à densité élevée par rapport à celles plantées à faible densité est minime et temporaire (Lundgren, 1981; Riou-Nivert, 1984). De même, Zhang *et al.* (2002) rapportent que, pour des den-

sités initiales de reboisement de 3 086, 2 500 et 2 066 tiges ha⁻¹, aucune différence importante n'a été notée dans la résistance et la rigidité de bois d'épinette noire issu d'un peuplement de 48 ans n'ayant subi aucun traitement d'éclaircie. Il n'est donc pas justifié, à l'intérieur de telles limites, d'utiliser ces critères pour déterminer une densité de reboisement.

Le choix d'une densité de reboisement optimale dépend de plusieurs facteurs, dont les objectifs de production (Bowling, 1987; Jones, 1987) et les prix des produits (Haight, 1993). Toutefois, presque toutes les études économiques ont convergé vers de très faibles valeurs de densités optimales. Pour le sapin Douglas (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco), la densité optimale serait de 1 111 tiges ha⁻¹ (3 m × 3 m) (Riou-Nivert et Georgeot, 1982). Pour le pin rouge, l'épinette noire et l'épinette blanche, McClain *et al.* (1994) évoquent un meilleur retour sur l'investissement pour une densité de 772 plants ha⁻¹ par rapport à 1 372 plants ha⁻¹. Pour le pin rouge croissant dans le nord des États-Unis, Lundgren (1981) recommande une densité aussi faible que 494 plants ha⁻¹. Considérant les divers facteurs présentés, la densité préconisée au Québec en forêt publique a été abaissée à 2 000 tiges ha⁻¹. Le tableau 1 résume les facteurs en lien avec la densité de reboisement.

Le phénomène de compétition

L'enlèvement du couvert, lors de la récolte d'un peuplement forestier, entraîne d'importants changements en ce qui concerne les bilans énergétique, hydro-

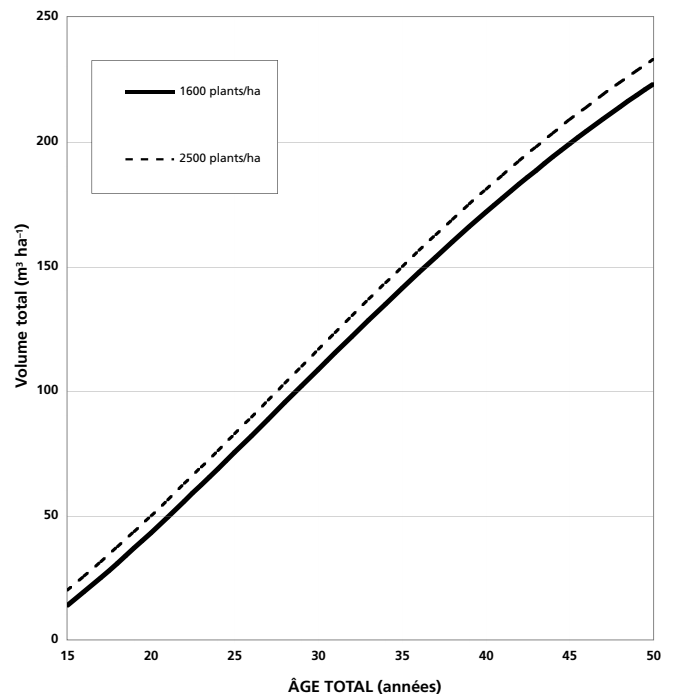


Figure 3. Volume total selon deux densités de reboisement pour les plantations d'épinette blanche (IQS = 9 m, âge de référence de 25 ans). Source : Bolghari et Bertrand (1984)

Tableau 1. Résumé des effets de la densité de reboisement sur diverses caractéristiques d'aménagement des plantations. Adapté de Willcocks et Bell (1995).

	Densité sub-optimale	Densité optimale	Forte densité
Volume total	faible	intermédiaire	élevé
Volume marchand	faible	élevé	faible
Diamètre moyen	élevé	intermédiaire	faible
Révolution biologique	longue	intermédiaire	courte
Révolution technique	courte	intermédiaire	longue
Coûts de plantation	faibles	intermédiaires	élevés

logique et bio-géochimique de la station en régénération. Notamment, la température de l'air et du sol augmente (Kubin et Kemppainen, 1991), de même que la disponibilité en eau et en éléments nutritifs. Ces changements des conditions environnementales contribuent à créer de nouvelles niches écologiques qui sont propices à l'établissement et à la prolifération d'espèces appartenant à la succession secondaire, lesquelles peuvent interférer avec l'établissement des espèces mises en terre (Jobidon, 1995).

Types de végétation de compétition

Quatre grands types de végétation de compétition susceptibles de compromettre l'établissement des plantations résineuses sont identifiés au Québec : 1) les graminées, typiques des terres abandonnées par l'agriculture; 2) les éricacées; 3) les broussailles, dont le framboisier (*Rubus idaeus* L.) et l'épilobe (*Epilobium angustifolium* L.) constituent les principales espèces problématiques; et 4) les feuillus de lumière, par exemple le cerisier de Pennsylvanie (*Prunus pennsylvanica* L. f.), le peuplier faux-tremble (*Populus tremuloides* Michx.), et le bouleau à papier (*Betula papyrifera* Marsh.). La revue de littérature sur l'autécologie des principales espèces de compétition au Québec, publiée par le ministère des Ressources naturelles (Jobidon, 1995), permettra au lecteur d'en connaître davantage sur le sujet.

Les effets de la compétition

Les espèces de transition qui s'installent après coupe sont très agressives pour s'approprier la lumière, les éléments nutritifs et l'eau. Elles contribuent à minimiser les pertes d'éléments nutritifs de la station après perturbation. Toutefois, la compétition pour les ressources environnementales entre la végétation de transition et l'espèce plantée est le principal facteur limitant l'établissement et la croissance initiale des plantations.

La lumière est généralement la ressource environnementale limitant le plus la croissance des plantations en bas âge (Jobidon, 1994). En situation de compétition pour la lumière avec les broussailles et les feuillus de lumière, la croissance en diamètre est beaucoup plus affectée par la compétition que celle en hauteur (Jobidon, 2000a; Wagner,

2000). En présence d'une compétition de feuillus de lumière, le diamètre moyen des épinettes avec compétition était plus de trois fois inférieur à celui des épinettes sans compétition après 5 ans (Jobidon, 2000a), ce qui illustre à la fois les fortes pertes de croissance attribuables à la compétition et la forte sensibilité de la croissance en diamètre à celle-ci. De plus, le déséquilibre entre la croissance en diamètre et la croissance en hauteur se traduit par une augmentation du rapport hauteur/diamètre (h/d), qui s'éloigne alors d'une valeur souhaitable qui se situe, pour l'épinette blanche par exemple, entre 40 et 55. Cela provoque une augmentation de l'instabilité des tiges. La mortalité n'est affectée que tardivement par la compétition. Par exemple, une étude a montré que dix ans après plantation, la mortalité des épinettes noires des parcelles dégagées et non dégagées était similaire (Jobidon et Charette, 1997). Cette variable n'est donc pas un bon indicateur pour évaluer l'effet de la compétition. Enfin, la compétition qui survient au cours des premières années de la plantation affecte la structure du peuplement. Elle provoque un étalement des dimensions, principalement en diamètre, accompagné d'une prédominance de petites tiges. Cela aura des répercussions sur la rentabilité de la première éclaircie commerciale.

À l'instar d'autres espèces résineuses, il semble que la croissance de l'épinette en présence de feuillus de lumière se décrit le mieux par une courbe curvilinéaire (figure 4). Des travaux de recherche ont démontré que les plus fortes réductions de croissance en plantation résineuse sont liées à la présence des premiers individus feuillus qui interceptent la lumière incidente (Jobidon, 2000a). Lorsque la plantation n'est pas dégagée, les pertes de croissance sont importantes au point où la croissance exponentielle typique des jeunes plants est perdue (figure 5). Les individus plantés risquent alors de croître en majorité sous un couvert de feuillus de lumière, ce qui entraîne la perte de la plantation.

En interceptant une grande quantité de lumière, les espèces compétitrices modifient aussi le régime thermique du sol, un facteur clé de la croissance racinaire (Kaspar et Bland, 1992), essentielle à la croissance aérienne. La végétation a significativement abaissé le profil saisonnier de la température du sol dans deux plantations expérimentales

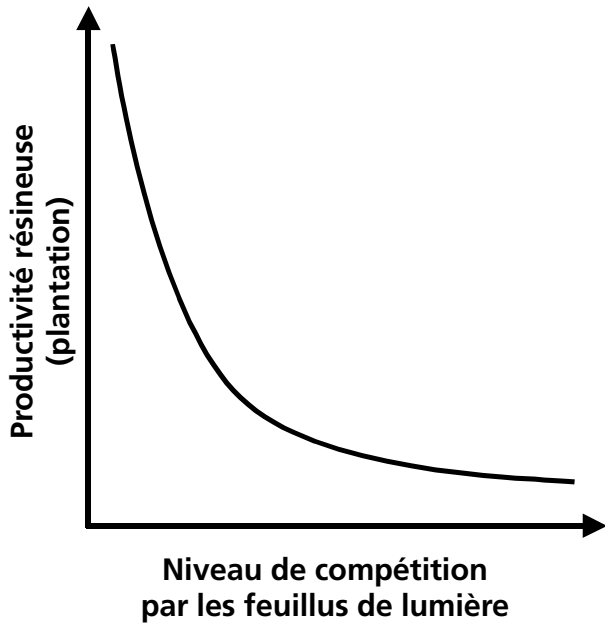


Figure 4. Courbe type de la croissance de l'épinette en compétition avec des feuillus de lumière.

Adaptée de Jobidon (2000b)

avec compétition herbacée et de feuillus de lumière, respectivement (Jobidon et Cyr, soumis). Les différences maximales (de 3,0 à 3,8 °C, selon le site) ont été enregistrées la troisième année. Les résultats de cette étude suggèrent de considérer les effets bénéfiques sur le régime thermique du sol de la gestion de la végétation en plantations résineuses, surtout en forêt boréale où la température du sol est souvent un facteur limitant la croissance.

Certaines espèces de la famille des éricacées, notamment le *Kalmia angustifolia* L., interfèrent avec l'établissement des conifères en régénération dans la forêt boréale. La litière du *Kalmia* est récalcitrante à la décomposition et favorise l'accumulation d'humus brut dans lequel les éléments nutritifs sont non disponibles (Prescott *et al.*, 2000). Le *Kalmia* est responsable d'une immobilisation biochimique de l'azote minéral du sol (Damman, 1971; Bradley *et al.*, 2000). Étant donné son système racinaire de grande envergure (Mallik, 1993) et son association avec des mycorhizes éricoïdales (Leake et Read, 1989), le *Kalmia* exerce une compétition importante pour les éléments nutritifs. Il est suggéré depuis plus de 30 ans, que l'allélopathie fait partie des phénomènes expliquant les interférences observées. Bien qu'établie sans équivoque en laboratoire, la démonstration claire d'une interférence allélopathique directe

du *Kalmia* avec l'épinette noire demeure toutefois à faire en milieu forestier (Inderjit et Mallik, 2002). Des travaux sont en cours pour mieux préciser le phénomène.

Sous les conditions climatiques québécoises habituelles, l'eau est rarement un facteur limitatif important pour la croissance des plants. Toutefois, lorsqu'un plant est mis en terre, son feuillage est aussitôt soumis à une demande évaporative de l'air. À ce moment, la capacité de prélèvement de l'eau du sol par le plant est relativement faible, car le contact entre le sol et les racines n'est pas encore bien établi (Margolis et Brand, 1990). Le stress hydrique est une cause fréquente de mortalité, principalement la première année de la plantation. Parfois, sur les stations à mauvais drainage, la teneur en eau élevée du substrat peut limiter la croissance des plants (e.g. Roy *et al.*, 1999).

Selon les caractéristiques des stations, les pratiques sylvicoles telles que la préparation du terrain et le dégagement de plantation peuvent être nécessaires afin d'augmenter la disponibilité des ressources environnementales à un niveau correspondant aux besoins de l'espèce cultivée, et ainsi assurer une croissance optimale des jeunes plants et l'atteinte des rendements escomptés.

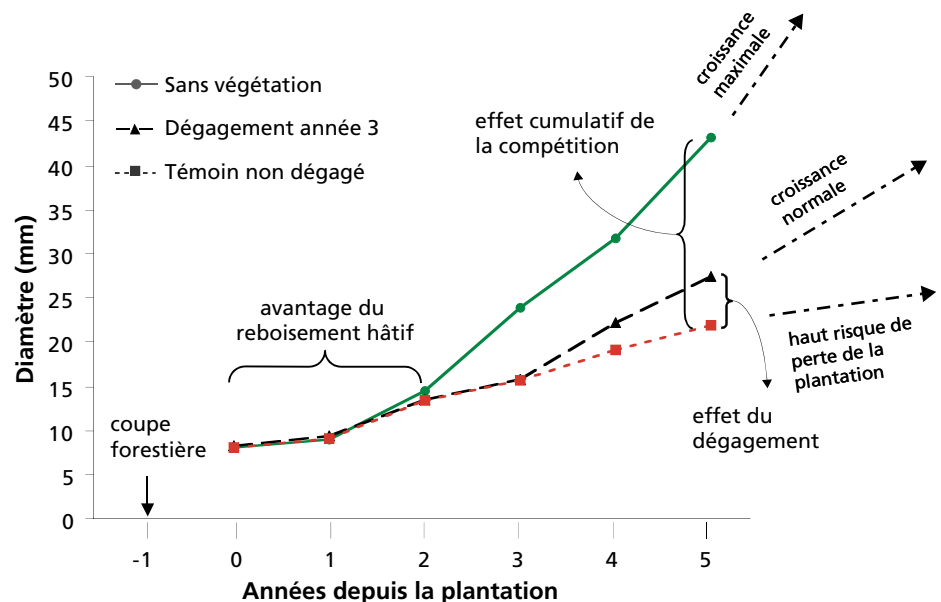


Figure 5. Croissance cumulative en diamètre (mm) de plants de fortes dimensions (PFD) d'épinette blanche pour les cinq premières années suivant la plantation sur un site riche de la sapinière à bouleau jaune de l'est (décrit dans Thiffault *et al.*, soumis-a).

Lorsque la plantation n'est pas dégagée, le caractère exponentiel de la croissance des jeunes plants est perdu. Le retour à des conditions normales de croissance est alors de plus en plus précaire (forte probabilité de perte de la plantation). Les courbes de croissance sont superposées pendant les deux premières années suivant la mise en terre; le reboisement hâtif confère aux plants un avantage compétitif sur la végétation, avant qu'elle ne s'installe.

La préparation de terrain

Les objectifs fondamentaux de la préparation de terrain sont de créer un environnement favorable à l'établissement et à la croissance des plants mis en terre de même que de faciliter les travaux subséquents liés à l'entretien de la plantation (Prévost, 1992). Le plus souvent, la préparation du terrain consiste en un travail mécanique (scarifiage) du sol qui favorise l'incorporation de la matière organique de surface au sol minéral (figure 6). Dans un scénario sylvicole, la préparation du terrain suit la coupe et précède la mise en terre des plants. Cette section se concentre sur certaines formes de scarifiage reconnues pour influencer les micro-environnements aérien et souterrain des plants mis en terre, lesquels détermineront en partie le succès d'établissement des plants (Sutherland et Foreman, 1995). Ne sont pas abordées en détail, les préparations de terrain visant l'andainage des débris de coupe ou celles visant exclusivement le contrôle de la végétation compétitrice.



Figure 6. Préparation du terrain par scarifiage à disques. Le principal objectif du scarifiage est de créer, par un travail mécanique du sol, un environnement favorable à l'établissement et à la croissance des plants qui seront mis en terre.

Les effets du scarifiage

Le scarifiage influence, entre autres, la température du sol (Prévost, 1996), la disponibilité en eau du sol (Brais *et al.*, 1996), la densité apparente du sol (Örlander *et al.*, 1990), l'environnement des organismes décomposeurs (Lundmark-Thelin et Johansson, 1997) et les processus de minéralisation (Munson *et al.*, 1993). De plus, le scarifiage et son intensité ont une influence directe sur la végétation, en termes de croissance, de composition et de diversité (Durand *et al.*, 1988; Jobidon, 1990; Haeussler *et al.*, 1999; Thiffault *et al.* 2001). Les effets du scarifiage sur les propriétés du sol sont discutés en détail par Prévost (1992).

Les effets du scarifiage sur les propriétés des microsites de plantation et la croissance des plants sont grandement dépendants du type de scarifiage pratiqué, des caractéristiques initiales de l'humus forestier, de la nature du sol et des conditions environnementales locales. Sur deux sites de la

sapinière à bouleau jaune de l'est, caractérisés par des humus minces, aucun effet du scarifiage à disques sur la température du sol n'a été noté (Thiffault *et al.*, soumis-b). À l'instar de la température, le contenu en eau du sol n'a pas été influencé par le scarifiage et un effet limité sur la disponibilité des éléments nutritifs a été observé (Thiffault *et al.*, soumis-b). Le scarifiage n'a pas influencé la densité de la végétation compétitrice évaluée trois années après le traitement, de même que la quantité de lumière reçue par les plants mis en terre (Thiffault *et al.*, soumis-b). De la même manière, des travaux ayant visé à comparer l'efficacité de différents modes de préparation mécanique du terrain, pour l'établissement de plantations dans des coupes récentes dans la sapinière à bouleau jaune de l'est, ont démontré une majorité de réponses non significatives (Belleau et Bell, 1995).

Scarifier ou pas ?

Il importe que les effets du scarifiage sur les facteurs de production de la station (température du sol, teneur en eau du sol, fertilité du sol, disponibilité des éléments nutritifs, aération et densité du sol, radiation solaire incidente, température et humidité de l'air) se traduisent par une amélioration du taux de survie et de la croissance des plants. Considérant la variabilité des réponses au scarifiage selon les caractéristiques des stations, une approche unique ne saurait être suggérée. L'épaisseur de l'humus est l'un des facteurs principaux justifiant l'intervention; le recours à ce traitement n'apparaît pas nécessaire sur les stations à humus mince, en particulier celles des domaines de l'érablière à bouleau jaune et de la sapinière à bouleau jaune. Sur ces stations, une simple mise en andains permettra de gérer la distribution des débris de coupe afin d'améliorer l'accessibilité, tout en minimisant la perturbation du sol. Cependant, sur les stations de la forêt boréale à humus mince sujettes à un envahissement par les éricacées (notamment le *Kalmia*) ou les cladonies (*Cladina* spp.), un scarifiage qui expose en partie le sol minéral et qui incorpore la matière organique au sol minéral est de mise afin de diminuer l'interférence de ces espèces sur les conifères en régénération et d'augmenter la température du sol. Sur les stations à humus épais ($\geq 15 - 20$ cm), un scarifiage mélangeant la matière organique au sol minéral devrait être pratiqué afin d'améliorer le régime thermique du sol et la croissance des plants. Ceux-ci devraient être plantés dans les microsites situés à mi-chemin entre le creux des sillons et les buttes adjacentes (Örlander *et al.*, 1990). Dans la majorité des cas, la plantation dans le creux des sillons ou sur les buttes expose les plants à des risques élevés d'inondation, de sécheresse et de déchaussement.

Le dégauchement

La gestion de la compétition

La maîtrise de la végétation de compétition au cours des premières années d'une plantation est une pratique sylvicole essentielle pour assurer un environnement favorable

à la survie et à la croissance des plantations résineuses, pour en gérer la composition, pour l'obtention de la production attendue, et donc, pour garantir la rentabilité de la station plantée. Le dégagement mécanique de plantations constitue la seule méthode de maîtrise de la végétation utilisée au Québec, avec plus de 25 000 ha dégagés annuellement (Parent, 2002).

Les effets du dégagement mécanique sont étudiés depuis plus de 15 ans au Québec. Les gains de croissance en diamètre de l'épinette noire atteignent 25 à 43 % après cinq ans dans le domaine de la sapinière à bouleau blanc (Jobidon *et al.*, 1999) et 24 % après dix ans dans la sapinière à bouleau jaune (Jobidon et Charette, 1997). De plus, on observe que les plants des parcelles dégagées affichent un rythme de croissance supérieur à ceux des parcelles témoins et cet écart s'accroît significativement dans le temps (Jobidon *et al.*, 1999). Par ses effets sur la croissance, la compétition provoque une forte hiérarchisation des dimensions des individus. Plus la compétition perdure et est sévère, plus l'étalement des classes de diamètre s'accroît et plus la majorité des individus appartient aux classes de dimensions inférieures (Jobidon et Charette, 1997; Jobidon, 2000a). Sachant, d'une part, que les positions sociales acquises tendent à se préserver dans le temps et, d'autre part, que les pertes de croissance juvénile ne peuvent être compensées par des interventions tardives, les premiers traitements de gestion de la végétation seront les plus conséquents sur le devenir du peuplement. La gestion de la végétation de compétition en bas âge permettra à l'espèce plantée de conserver une position dominante ou codominante. Bien que l'on traduise généralement les effets positifs du dégagement en termes de croissance ou de survie, comparativement à un témoin non dégagé, il demeure que le bénéfice principal réside dans l'obtention d'une plantation productive où l'hectare planté est occupé majoritairement, sinon uniquement, par l'espèce cultivée.

Quand faut-il dégager une plantation résineuse ?

Le dégagement des plantations dès les premières années représente l'élément clé de leur réussite. Un des engagements de la Stratégie de protection des forêts du Québec (Gouvernement du Québec, 1994) visait à améliorer les méthodes de prescription des travaux de dégagement. Pour s'assurer que la plantation offre un rendement qui reflétera à la fois la qualité du matériel mis en terre et la qualité de la station, il importe d'effectuer un suivi de l'état compétitif des plants et de les dégager dès qu'une situation de compétition est détectée. Le dégagement n'est pas effectué à une année précise après la plantation, mais plutôt lorsque le statut compétitif le commande. La croissance en hauteur et le taux de survie des plants sont tardivement liés à un effet compétitif. Ils ne sont donc pas de bons indicateurs. Au Québec, nous disposons d'un outil objectif de prise de décision pour prescrire un dégagement qui est basé sur la quantité de lumière reçue par les plants (Jobidon, 1992; 1994) (figure 7). Par

exemple, pour les épinettes, les plants qui reçoivent une quantité de lumière inférieure à 60 % de la pleine lumière solaire sont jugés en situation de compétition et nécessitent aussitôt un traitement de dégagement (figure 8). Aussi, le rapport h/d des plants est très sensible à la compétition. On doit viser le maintien d'un rapport h/d le plus faible possible. Par exemple, pour l'épinette blanche, le maintien d'un rapport h/d inférieur à 55 devrait limiter les pertes de croissance (Jobidon, 2000a).



Figure 7. Plantation résineuse en situation de compétition où l'on mesure, à l'aide d'un radiomètre portatif, la quantité de lumière utile à la photosynthèse qui atteint la moitié supérieure du plant (indiqué par une flèche). Cette valeur est ensuite exprimée en pourcentage de la quantité de lumière mesurée au-dessus du couvert de compétition et sert à évaluer le besoin d'un traitement de dégagement.

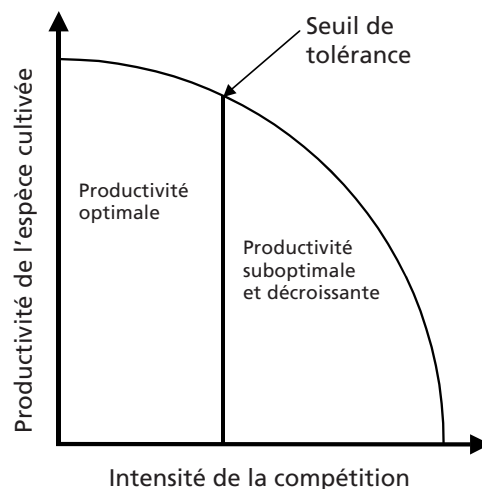


Figure 8. Définition schématique du seuil de tolérance à la compétition d'une espèce cultivée. Adaptée de Jobidon (1996)

En général, le premier dégagement aura lieu entre deux et quatre années après la mise en terre. Par ailleurs, la forte reproduction végétative (soit par rejets de souche, par drageonnement ou les deux à la fois) de plusieurs espèces de compétition fait en sorte que la couverture végétale se

reformé rapidement après la coupe des tiges et un second dégagement est parfois nécessaire. Les travaux de recherche sur le dégagement mécanique ont toutefois permis d'en préciser les conditions optimales de réalisation. La coupe en saison feuillée, soit des mois de juillet à septembre, conduit aux meilleurs résultats de croissance en hauteur et en diamètre des plants résineux (Jobidon et Charette, 1997), en raison d'un retour moindre des espèces de compétition. De plus, pour le bouleau blanc, l'érable à épis (*Acer spicatum* Lamb.) et le cerisier de Pennsylvanie, on recommande une coupe à une hauteur de 15 cm lors du dégagement mécanique en raison d'une proportion plus grande de mortalité des souches, comparativement à des hauteurs de coupe plus élevées (Jobidon, 1997a).

En résumé, plus la station est fertile, plus la productivité de la plantation est potentiellement élevée, plus la probabilité d'une forte compétition s'accroît, et plus il importe de dégager hâtivement et fréquemment (figure 9).

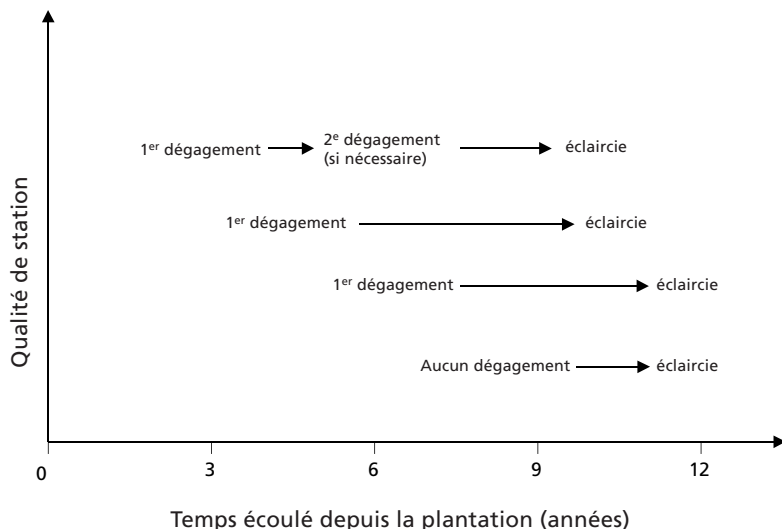


Figure 9. Représentation schématique d'un modèle d'intervention en plantation d'épinette pour la maîtrise d'une végétation de compétition dominée par les feuillus de lumière. L'échelle de temps et le nombre d'interventions sont tous deux donnés à titre indicatif seulement; ils ne remplacent pas l'évaluation de l'état compétitif à faire sur le terrain. Adaptée de Jobidon (2000b)

Stratégies de gestion de la compétition

La Stratégie de protection des forêts du Québec a conduit à l'élimination des phytocides en milieu forestier (Gouvernement du Québec, 1994). Sur les stations à forte compétition, on a maintenant recours à une stratégie de reboisement hâtif, le printemps suivant la coupe, afin que les plants mis en terre aient un avantage compétitif sur la végétation, avant qu'elle ne s'installe. De plus, sur ces mêmes stations, on recommande la mise en terre de PFD. Les suivis de la performance de ces plants indiquent que les plus fortes caractéristiques dendrométriques (diamètre et hauteur) au moment de la mise en terre leur procurent un meilleur potentiel de croissance que les plants de dimensions stan-

dards. Après huit années de croissance, le PFD produit en récipients de 340 cm³ présente un indice de volume de 1,3 à 1,5 fois supérieur à celui du plant standard (Jobidon et Roy, soumis). De plus, le PFD est mieux nanti pour croître en présence de compétition puisque ses fortes dimensions lui confèrent un avantage compétitif pour la lumière. Les gains de croissance découlant de la combinaison d'une plantation de PFD avec maîtrise de la compétition ont été multiplicatifs. Le reboisement avec des PFD devrait permettre à la fois de diminuer la fréquence des dégagements mécaniques et d'obtenir une meilleure réaction de croissance à la suite de ceux-ci.

L'éclaircie précommerciale

Dans le cas des plantations, l'éclaircie précommerciale représente principalement une extension du dégagement, mais ne le remplace pas, surtout sur les stations les plus fertiles. Elle est généralement réalisée entre huit et 15 ans et vise la plupart du temps à réduire la compétition exercée par d'autres espèces, favorisant ainsi l'accroissement en diamètre des arbres conservés (Ker, 1987; Pothier et Margolis, 1991; Morris *et al.*, 1994; Zhang *et al.*, 1998; Brisette *et al.*, 1999; Jobidon, 2000a; Pothier, 2002). Cette nouvelle situation de compétition provient de la forte reproduction végétative de certaines espèces feuillues à la suite du dernier dégagement, ou encore du recrutement de nouveaux individus par la germination de semences. L'objectif est de maintenir les arbres plantés dans les étages dominant et codominant et de minimiser la présence des feuillus dans ces étages de façon à assurer l'atteinte du rendement escompté et ainsi protéger les investissements importants consentis. La structure de la plantation se prêtera alors à des travaux d'éclaircie commerciale dans le futur.

Dans certaines circonstances, on doit couper des arbres plantés. En présence d'une forte densité de reboisement, la rentabilité de la première éclaircie commerciale peut être compromise en raison des petites dimensions des tiges. Dans ce cas, il est préférable de réduire le nombre de tiges le plus tôt possible au lieu de retarder l'exécution de la première éclaircie commerciale (voir la section *L'éclaircie commerciale*). Néanmoins, la solution idéale serait de réduire la densité de reboisement. De même, l'élimination d'arbres plantés s'avère nécessaire lorsque plusieurs tiges sont de piètre qualité. Certaines plantations de pin gris, de pin sylvestre (*Pinus sylvestris* L.), ou encore de pin blanc ou d'épinette de Norvège atteintes par le charançon du pin blanc (*Pissodes strobi* Peck) s'y prêtent.

L'éclaircie précommerciale a aussi comme avantage d'augmenter la fertilité du sol au cours des premières années suivant le traitement. En effet, l'élimination d'arbres provoque une hausse de la température du sol qui a pour conséquence d'accélérer la minéralisation de l'azote (Piene, 1978; Thibodeau *et al.*, 2000). Cependant, les résultats des

études sur la contribution des essences pionnières au cycle des éléments minéraux soulèvent des appréhensions quant aux effets de l'éclaircie précommerciale sur le maintien de la fertilité à long terme des écosystèmes forestiers, si le traitement réduit trop fortement l'espace occupé par des espèces compagnes.

L'élagage

L'élagage est un traitement qui vise l'obtention de bois de qualité. Il ne s'agit pas d'une intervention qui a pour but d'augmenter la croissance ou le rendement de la plantation. L'élagage naturel se fait peu ou pas dans les plantations, même lorsqu'elles sont réalisées à de faibles espacements. L'élagage artificiel est requis pour produire du bois sans nœuds et de meilleure qualité à l'intérieur de la période de révolution du peuplement. On reproche généralement au bois issu de plantations ses caractéristiques désavantageuses par rapport à celui issu de forêts naturelles plus denses; son plus fort défilement, de même que sa nodosité et sa proportion de bois juvénile plus élevées diminuent son attrait. L'élagage permet d'atténuer, voire d'éliminer ces inconvénients.

Les effets de l'élagage

Les objectifs poursuivis par l'élagage sont d'abord de produire du bois sans nœuds, ce qui améliore ses propriétés mécaniques et son apparence (Briggs, 1995). S'il est pratiqué sur des branches vivantes, plusieurs études montrent que l'élagage a comme effet de hâter la transition de formation de bois juvénile en bois mature (Gerischer et Devilliers, 1963; Cown, 1973; Megraw, 1985). Toutefois, des travaux récents minimisent la portée de l'élagage à cet égard (Gartner *et al.*, 2002). Comme la croissance radiale est d'autant ralentie qu'on la mesure loin de la cime vivante (Keller et Thiercelin, 1984; Kershaw et Maguire, 2000), l'élagage de branches vivantes a comme effet de modifier le modèle de croissance de la portion élaguée du tronc en réduisant le défilement de celui-ci. Cette caractéristique augmente la proportion du volume total qui peut être utilisable pour le débitage. Dans certaines circonstances, l'élagage peut provoquer la formation de gourmands et la décoloration du bois consécutive à l'infection fongique des plaies d'élagage (Cyr, 2002). Les effets de l'élagage sur ces aspects de même que sur la formation du bois mature demeurent à être précisés dans le contexte québécois.

Les modalités d'intervention

Pour maximiser les bénéfices potentiels, l'élagage doit être réservé aux stations où les objectifs de production sont le sciage ou le déroulage. On recommande de n'élaguer que sur les meilleures stations, où la croissance est avantageuse et d'élaguer uniquement les tiges d'avenir qui demeureront jusqu'à la récolte finale du peuplement, soit environ 400 tiges ha⁻¹. L'intensité d'élagage (qui correspond à la

proportion de cime vivante enlevée) et le moment d'intervention doivent être établis en tenant compte de trois facteurs principaux, qui sont : 1) la hauteur des arbres (qui est fonction de la qualité de la station); 2) la hauteur d'élagage (qui sera d'une valeur suffisante pour produire une bille exempte de nœuds et de longueur commercialisable); et 3) la hauteur de la cime vivante. La considération combinée de ces trois paramètres indique que l'intensité d'élagage ne doit pas dépasser 40 %, valeur au-delà de laquelle une diminution de croissance notable peut s'ensuivre (Staebler, 1963; O'Hara, 1991; Uotila et Mustonen, 1994). Pour un élagage de 4 m, le moment optimal est généralement atteint lorsque les arbres ont 8 m de hauteur. Afin de maximiser la proportion de bois sans nœuds, il n'y a pas d'intérêt à retarder l'élagage lorsque ces critères sont atteints. De plus, l'élagage de jeunes arbres a l'avantage d'être plus rapide et la coupe de branches relativement fines favorise une cicatrisation rapide des plaies. La valeur d'intensité maximale d'élagage demeure à être spécifiquement établie pour nos principales espèces résineuses. Les projets de recherche en cours permettront de la préciser (figure 10). À ce jour, l'élagage en un seul passage est préconisé. L'outil privilégié pour l'exécution du traitement est la scie à élaguer manuelle. Celle-ci a été jugée favorablement par rapport aux outils mécanisés, à la fois du point de vue du coût et de la qualité d'exécution (St-Amour, 2001).



Figure 10. Élagage expérimental en plantation d'épinette blanche dans le Bas-Saint-Laurent. Ces travaux permettent de déterminer des modalités d'exécution (saison, outil, intensité, etc.) avantageuses et de quantifier l'effet du traitement sur la croissance des arbres et la qualité du bois produit.

Le contexte québécois

L'élagage des résineux n'est actuellement pas une pratique courante au Québec. Les prix offerts pour le bois résineux destiné au sciage ou au déroulage ne varient pas (sauf en de rares exceptions) en fonction des qualités d'apparence ou de structure des billes (SPBQ, 2002). Toutefois, la proportion grandissante de l'approvisionnement des usines de transformation, qui proviendra de plantations plutôt que

de forêts naturelles, pourrait favoriser ce traitement. Il faudrait que des processus soient mis en place afin que le bois issu de peuplements élagués soit systématiquement reconnu comme tel, du début à la fin de la chaîne de transformation, pour ainsi s'assurer qu'un juste prix vienne rétribuer les efforts investis dans sa production.

L'éclaircie commerciale

L'éclaircie commerciale constitue un traitement sylvicole où le rôle du sylviculteur prend tout son sens. Par le choix d'un scénario d'éclaircies, il pourra façonner en grande partie l'évolution du peuplement et atteindre les objectifs de production prédéterminés.

Les types d'éclaircies

Trois grands types d'éclaircies sont reconnus, soit l'éclaircie systématique, l'éclaircie sélective et l'éclaircie mixte (Savill *et al.*, 1997). Globalement, il est important de prélever, dès la première éclaircie, les tiges les plus déformées, blessées ou malades. Quelques-unes de ces tiges peuvent se situer dans les étages dominant ou codominant et il est encore plus important de les couper tôt dans la vie du peuplement afin de ne pas entraver plus longtemps la croissance de plus belles tiges. En second lieu, la coupe devrait viser à éliminer les plus petites tiges, soit celles qui ne pourront répondre suffisamment à une éclaircie, soit celles d'autres espèces de moindre valeur commerciale qui nuiront à la croissance de l'espèce plantée (figure 11).



Figure 11. Éclaircie commerciale dans une plantation d'épinette de Norvège de 20 ans, en Estrie. Un total de 40 m³ ha⁻¹ a été récolté, avec des arbres d'un DHP moyen de 11 cm.

Les avantages

Le principal avantage de l'éclaircie est d'augmenter le taux de croissance en diamètre des arbres résiduels en diminuant le degré de compétition entre les tiges, principalement

pour la lumière (Aussenac *et al.*, 1984; Sheedy et Bertrand, 1997). De plus, dans le cas de l'éclaircie sélective, l'objectif est d'accroître la qualité du peuplement en éliminant les tiges déformées ou sans avenir et en attribuant le gain de croissance aux tiges de meilleure qualité (Bennett, 1971). L'éclaircie accroît la production en volume d'une station en récupérant le volume de bois qui serait perdu par mortalité. La mortalité étant plus élevée pour les stations les plus fertiles et avec les densités de reboisement les plus fortes, les gains de productivité liés aux éclaircies y sont potentiellement plus importants (Prégent, 1998). Toutefois, les gains en volume sont généralement faibles (Pardé, 1964; Oswald et Pardé, 1984; Savill *et al.*, 1997), particulièrement lorsque la première éclaircie est retardée (Prégent, 1998).

L'éclaircie favorise un meilleur développement des racines des arbres (Zahner et Whitmore, 1960) et le maintien d'un ratio h/d relativement bas, ce qui contribue à la stabilité des peuplements à long terme. Ils sont donc moins sujets aux dommages causés par le vent, la neige ou le verglas (Burton, 1981; Riou-Nivert, 2001; Cameron, 2002). Les plantations éclaircies sont, de plus, moins vulnérables aux dommages causés par certains insectes ou certaines maladies (Hedden, 1983; Mitchell *et al.*, 1983).

Les plantations denses sont souvent caractérisées par une faible luminosité en sous-étage et une très faible régénération naturelle. L'ouverture du couvert par les éclaircies favorise la régénération d'espèces naturelles (Von Althen et Stiell, 1965), améliorant ainsi la biodiversité et les conditions pour la faune (Guitton et Ruchaud, 1996).

L'éclaircie constitue une source importante d'emplois tout en permettant une augmentation potentielle de la rentabilité économique des plantations. Elle procure des revenus périodiques et assure un retour plus rapide sur les investissements (Bennett, 1971), tout en haussant la valeur des produits (Liechty *et al.*, 1988). Comme les arbres récoltés à partir de la seconde éclaircie sont plus gros et plus homogènes, les coûts d'exploitation et de transformation s'en trouvent réduits (Lundgren, 1981; Liechty *et al.*, 1988).

Les désavantages

L'éclaircie accentue le défilement de la tige au cours des premières années. Toutefois, cet effet s'atténue avec le temps (Berry, 1971; André *et al.*, 1994) de sorte qu'à maturité, l'éclaircie n'affecte pas significativement la forme de la tige (Bastien, 1986; Pape, 1999). Les effets sur la

densité du bois ou sur la formation de bois de compression seraient également négligeables (André *et al.*, 1994; Reader et Kurmes, 1996; Tasissa et Burkhart, 1998; Pape, 1999).

L'ouverture du couvert peut favoriser la croissance des branches et retarder l'élague naturel. Toutefois, l'intégration de l'élague artificiel dans les scénarios sylvicoles permettra d'atténuer ce désavantage. Dans ces circonstances, l'éclaircie est bénéfique puisque l'élague artificiel peut être réalisé sur un plus faible nombre d'arbres et la croissance individuelle des tiges élaguées est favorisée par un espace de croissance accru.

Les effets négatifs de l'éclaircie peuvent résulter de mauvaises pratiques sylvicoles. Des pertes de production en volume peuvent survenir dans les peuplements éclaircis trop intensément et surtout trop tardivement ou encore, dans ceux dont les tiges dominantes sont récoltées (Reukema et Bruce, 1977; Savill *et al.*, 1997). De plus, dans ces conditions, les arbres résiduels sont plus vulnérables au vent, au verglas ou à la neige (Cremer *et al.*, 1982).

Le moment d'intervention

Le moment d'intervention, dans la vie du peuplement, détermine en grande partie la réussite du scénario sylvicole. Une première éclaircie trop tardive peut compromettre la réponse à l'éclaircie et même l'avenir de la plantation. Les paramètres suivants peuvent servir à déterminer le moment de réalisation de l'éclaircie : la surface terrière totale, le coefficient de Hart-Becking, le rapport h/d des dominants, la hauteur dominante et le taux de cime vivante.

La surface terrière est un bon indicateur du degré de compétition entre les tiges. Il est recommandé d'éclaircir lorsque la surface terrière atteint une valeur variant de 25 à 35 m² ha⁻¹, environ. On tendra vers la valeur minimale en présence d'un objectif de production de gros bois, d'essence de lumière ou de jeunes peuplements. L'âge d'obtention de la surface terrière visée varie selon l'essence, la qualité de la station, la densité de reboisement et le taux de survie (Prégent, 1998).

Le coefficient de Hart-Becking est également un bon paramètre. Il exprime, en pourcentage, le rapport entre l'espacement moyen entre les arbres et la hauteur dominante. Des valeurs au-dessus de 20 % signifient qu'il n'y a pas de problème majeur de densité, alors que des valeurs inférieures à 10 % sont obtenues dans des peuplements très denses, où aucune intervention n'est possible (Riou-Nivert, 1984). Pour l'épinette de Norvège, Riou-Nivert (1984) recommande d'éclaircir lorsque le coefficient atteint 20 % de façon à le hausser à 25 %. La valeur ciblée est atteinte à des âges variant selon la qualité de la station, la densité de reboisement et le taux de survie. Selon les tables de rendement de Bolghari et Bertrand (1984), pour des plantations de densité moyenne (2 500 plants ha⁻¹), le coefficient de 20 % est atteint à 39 ans sur de faibles qualités de station et à 19 ans sur les meilleures.

Le rapport h/d des arbres dominants peut également servir de repère. Les éclaircies devraient viser à maintenir la valeur sous 80, afin d'assurer la stabilité de la plantation. Les éclaircies devraient être moins intenses lorsque la valeur se

situe entre 80 et 100 avant l'éclaircie. Enfin, l'éclaircie devrait être proscrite si la valeur est supérieure à 100 puisque celle-ci indique que le peuplement est devenu trop instable (Becquey, 1986), en d'autres termes, que l'éclaircie a été trop retardée.

Bien que la hauteur dominante soit parfois proposée comme paramètre pour choisir le moment de l'intervention (Tisserand et Pardé, 1982; Becquey, 1986), une norme de hauteur dominante ne pourrait être valable pour toutes les densités de reboisement. En effet, la hauteur dominante est généralement indépendante du nombre de tiges alors que la compétition entre les tiges l'est très fortement. De même, bien que le taux de cime vivante soit un indicateur du degré de vitalité d'un arbre et de son potentiel de réponse à une éclaircie, ce paramètre varie grandement entre les tiges d'une même plantation et rend difficile l'application d'une norme.

L'intensité et la fréquence des éclaircies

Quel que soit le type d'éclaircie, plus l'intensité est forte, plus la croissance des arbres résiduels est forte (Bouchon, 1977). L'intensité et la période entre deux éclaircies sont grandement liées. Une forte intensité permet d'allonger le passage de l'éclaircie suivante et inversement (Reukema et Bruce, 1977). La période entre deux éclaircies dépend également de la productivité de l'espèce et de la station. Plus l'espèce et la station sont productives, plus les éclaircies seront rapprochées et fréquentes (Prégent, 1998). Les éclaircies de forte intensité sont à proscrire pour les peuplements instables de sorte que dans ces conditions, les éclaircies devront être de faible intensité et plus fréquentes.

Le choix d'un scénario d'éclaircies commerciales

Le choix d'un scénario optimal d'éclaircies commerciales est complexe puisqu'il dépend principalement de trois facteurs : 1) les objectifs de production; 2) les moyens disponibles; et 3) l'état du peuplement à traiter. Plusieurs paramètres sont associés à ces trois facteurs. Puisqu'ils peuvent varier considérablement, il ne peut y avoir de recette unique, ni de réponse unique.

Il est primordial de déterminer les types de bois désirés et les moments auxquels ils doivent être obtenus (Riou-Nivert, 1982). Il est possible que l'éclaircie ne soit pas nécessaire pour la production de bois à pâte (Little *et al.*, 1968; Bennett 1971) à moins que son prix soit élevé (Haight, 1993). Toutefois, les éclaircies sont nécessaires pour obtenir le maximum de bois de grandes dimensions et de bonne qualité dans un temps minimum (Day et Rudolph, 1972). Plus on visera l'obtention de gros bois en fin de révolution, plus les éclaircies devront être fréquentes et de forte intensité, et plus le nombre de tiges à conserver pour la coupe finale devra être faible (Prégent, 1998).

Le choix d'un scénario d'éclaircies repose également sur les moyens techniques et financiers disponibles. Ainsi,

un propriétaire souhaitant réaliser lui-même ses travaux sans comptabiliser ses coûts de main-d'œuvre pourra opter pour des éclaircies fréquentes et de faible intensité. Toutefois, l'ajout des coûts de main-d'œuvre et de machinerie tend à faire augmenter l'intensité des éclaircies afin d'en réduire le nombre.

Les caractéristiques du peuplement à traiter déterminent également les modalités optimales des éclaircies. Les plantations ayant un nombre élevé de tiges (densité de reboisement élevée ou peu de mortalité) requièrent une première éclaircie plus hâtive (Prégent, 1998). Les éclaircies doivent être sélectives et de faible intensité pour les peuplements en retard d'éclaircie ou potentiellement instables.

L'enjeu de la biodiversité

Les plantations font parfois l'objet de critiques quant à leurs répercussions sur la biodiversité. On leur reproche de créer une structure de peuplement uniforme, de diminuer le nombre d'espèces présentes et de changer la composition de l'étage dominant. Au Québec, les plantations résineuses sont appelées à être soumises à un aménagement intensif dirigé vers des objectifs de production ligneuse, objectifs qui peuvent paraître conflictuels avec celui du maintien de la biodiversité (Wagner *et al.*, 1998). La mise en terre d'espèces résineuses peu ou mal adaptées aux stations a des effets néfastes sur la composition et la dynamique de l'écosystème du point de vue de la biodiversité. C'est le cas principalement dans le sud du Québec, où des résineux ont été plantés sur des stations où croissaient auparavant des forêts feuillues ou mélangées. Depuis l'adoption de la Stratégie de protection des forêts du Québec, la conversion de peuplement n'est plus permise (Gouvernement du Québec, 1994).

L'importance des plantations à l'échelle provinciale doit être relativisée. En 1999-2000, 18 % des aires de récolte ont été reboisées, en tout ou en partie, dans ce dernier cas pour compléter une régénération naturelle insuffisante. Ces aires de récolte représentent, quant à elles, 1,22 % des forêts productives (Parent, 2002). Par conséquent, les plantations représentent une faible proportion du territoire québécois. À l'échelle du paysage, les plantations s'insèrent comme un élément de la diversité écosystémique. Un souci doit être porté à la répartition spatiale des plantations afin d'assurer une hétérogénéité au sein des paysages forestiers, laquelle est intimement liée au maintien de la biodiversité (Bélanger, 2001; Boudreault, 2001; De Grandpré *et al.*, sous presse; Despons *et al.*, 2001; Gauthier *et al.*, 2001).

À l'échelle du peuplement, les plantations bien entretenues sont caractérisées par une diversité floristique très faible au niveau de la strate arborée en conséquence du choix d'une espèce unique lors du reboisement. Toutefois, le recrutement d'espèces après la plantation et leur reprise de croissance après les dégagements, diminuent les craintes à l'égard d'une réduction de la diversité floristique. De même, le traitement d'éclaircie précommerciale réalisé en plantation d'épinette ne provoque pas une baisse de la diversité ou

de la richesse floristique des strates intermédiaires ou inférieures, mais abaisse la valeur de ces indices pour la strate supérieure (Jobidon *et al.*, en préparation). La relation entre la richesse floristique et la proportion de feuillus – épinette est de type curvilinéaire. Une faible augmentation de la richesse floristique dans la strate supérieure pour les parcelles dominées par l'épinette, se fait au détriment d'une forte baisse de la surface terrière de l'épinette. Ainsi, le maintien d'individus feuillus au sein du couvert arboré de la plantation doit être envisagé selon deux facteurs : le premier en lien avec la productivité, c'est-à-dire l'effet compétitif des individus à maintenir; le second en lien avec la diversité, c'est-à-dire le rôle attendu des individus à maintenir. Il y a donc lieu d'établir des standards de diversité floristique à atteindre dans le couvert arboré des plantations d'épinette (voir Spellerberg et Sawyer, 1996), pour satisfaire des critères précis.

Bien qu'une baisse des indices de diversité de la strate supérieure ait été notée à la suite du traitement d'éclaircie précommerciale, il y a lieu de se questionner pour savoir si cette baisse a des conséquences écologiques. La reproduction végétative des feuillus nordiques, par rejets de souche ou dragonnement (Jobidon, 1995; 1997a; 1997b), est fréquente après une coupe telle que pratiquée par le traitement d'éclaircie précommerciale. Dans un écosystème forestier naturel, la diversité du peuplement augmente avec une augmentation du nombre d'espèces, chacune en plusieurs classes d'âge et de dimensions, ce qui correspond à la diversité structurale du peuplement (Buongiorno *et al.*, 1994; Lähde *et al.*, 1999). En plantations d'épinette, l'âge de l'espèce dominante ne varie pas et les variations de dimensions sont normalement faibles, pour autant que les traitements juvéniles de dégagement aient été effectués (Jobidon et Charette, 1997; Jobidon, 2000a). Un traitement d'éclaircie précommerciale peut augmenter les classes d'âge et de dimensions des espèces compagnes, par les modes de reproduction végétative. Le traitement peut donc accroître la diversité structurale, ce qui est de première importance pour la protection de la biodiversité (Hansen *et al.*, 1991). Par exemple, la baisse observée des indices de diversité de la strate supérieure sera probablement compensée dans le temps par une croissance d'individus occupant la strate intermédiaire. D'ailleurs, l'importance du traitement en regard de sa contribution à la diversité structurale en plantations de pin sylvestre, par les modes de reproduction végétative, est soulignée par Lust *et al.* (1998).

Diverses recommandations d'aménagement en regard de la conservation de la biodiversité des plantations ont été formulées (voir Hartley, 2002). On prône notamment le maintien d'un niveau élevé de diversité génétique des plantations en ayant recours à du matériel diversifié, ce qui est d'ailleurs à la base des programmes d'amélioration génétique au Québec. En effet, le souci accordé dans les programmes d'amélioration génétique et la production de semences aux fins de reboisement fait en sorte que le niveau de diversité génétique des plantations, issues de semences récoltées dans des vergers à graines, est comparable à celui des forêts

naturelles (Beaulieu *et al.*, 2001). On préconise ensuite le maintien d'autres espèces à l'intérieur de la plantation, même si l'espèce plantée constitue 90 % de l'espace occupé. On prône aussi l'exécution de travaux de dégagement et d'éclaircie précommerciale effectués en bas âge et de forte intensité pour maintenir une communauté végétale diversifiée en sous-étage, ce que les stratégies actuelles au Québec recommandent. Certaines études confirment d'ailleurs que l'éclaircie précommerciale permet un tel maintien (Jobidon *et al.*, en préparation). On recommande finalement un usage restreint d'herbicides. À ce titre, le Québec est à l'avant-garde depuis l'implantation de la recommandation de la Stratégie de protection des forêts, d'éliminer l'usage des phytocides chimiques en forêt publique (Gouvernement du Québec, 1994).

Conclusion

La sylviculture des plantations des principales essences résineuses commerciales du Québec débute avec le choix du type de plant et de l'espèce mise en terre. Les espèces doivent être choisies en fonction des caractéristiques de la station afin d'atteindre les objectifs de production définis. La densité de plantation a un effet sur la productivité par tige et sur la suite des travaux sylvicoles. Considérant les différents facteurs économiques, de qualité et de productivité forestière, des densités d'environ 2 000 tiges ha⁻¹ apparaissent optimales sous nos conditions. La préparation de terrain doit être réservée aux stations où le micro-environnement des plants peut être amélioré par le travail du sol. Elle est également justifiée pour améliorer l'accessibilité des sites si la qualité du travail ou la sécurité des planteurs en dépend. Une saine gestion de la compétition est primordiale pour obtenir la production attendue et pour garantir la rentabilité de la station plantée. Sur les stations à haut risque de compétition, on préconise le reboisement hâtif avec des plants de fortes dimensions (PFD). Le dégagement mécanique doit être pratiqué dès qu'une situation de compétition est détectée, les pertes de croissance causées par la compétition ne pouvant être compensées par des dégagements tardifs. L'éclaircie précommerciale est vue comme une extension du dégagement et sert à gérer la composition et à redistribuer la croissance de la station sur un nombre restreint de tiges. Elle est particulièrement nécessaire sur les stations les plus fertiles, où les feuillus de lumière recolonisent l'espace de croissance, même après les dégagements. L'élague permet l'obtention de bois de qualité supérieure. Il trouve sa pleine justification avec une classification des bois sciés qui tient compte des caractéristiques physiques et d'apparence de ceux-ci. Bien que les modalités propres à nos espèces demeurent à établir, on préconise l'enlèvement de 40 % de la cime vivante, et ce, dès que les arbres ont atteint 8 m de hauteur. L'éclaircie commerciale augmente le taux de croissance en diamètre des arbres résiduels. Elle influence donc la productivité par tige. Les éclaircies seront d'autant plus hâtives et fréquentes que

les stations sont plus fertiles. Finalement, si les plantations sont aménagées adéquatement, elles contribuent à maintenir la biodiversité à l'échelle du paysage.

Perspectives d'avenir

Les besoins grandissants de la société en matière ligneuse et pour la conservation intégrale de forêts naturelles confirment l'importance du reboisement pour les prochaines années. Le bois est un matériau durable, renouvelable, et dont l'efficacité énergétique (évaluée par la quantité d'énergie nécessaire pour la production d'une masse donnée) est élevée. Bien que les plantations représentent moins de 4 % de la ressource forestière mondiale, l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture estime qu'elles fournissaient, en 2000, 22 % de l'industrie du bois rond; cette proportion atteindra 33 % en 2010. Grâce à un rendement par unité de superficie plus élevé, la foresterie de plantation offre la possibilité de réduire la pression de récolte dans les forêts naturelles et rend celles-ci davantage aptes à assurer un rôle de conservation des habitats et de la biodiversité, cela en maintenant et même en augmentant la disponibilité de la ressource. De plus, la contribution des forêts à la séquestration du carbone peut potentiellement être améliorée par le recours à des plantations de haute productivité. À plus petite échelle, les plantations jouent un rôle de plus en plus significatif pour satisfaire les besoins des communautés, de l'industrie, et offrent des opportunités de développement régional.

L'atteinte de ces objectifs de productivité et de conservation passe par une sylviculture des plantations régulièrement adaptée ainsi que par les nouvelles techniques de production de plants de reboisement. Les connaissances acquises, au cours des 20 dernières années, en matière d'amélioration des arbres, de culture de plants, de traitements sylvicoles et de développement des modèles de croissance, nous permettent de préconiser certaines lignes directrices d'une sylviculture des plantations adaptée au contexte de la foresterie québécoise. Toutefois, l'acquisition de nouvelles connaissances demeure prioritaire afin de poursuivre l'amélioration du rendement de nos plantations et l'augmentation de la qualité du bois récolté, tout en assurant la pérennité de nos forêts. Par exemple, le reboisement avec des essences variées sur une même station devrait être étudié, en portant une attention particulière aux similarités et à la complémentarité des caractéristiques sylvicoles des essences utilisées. Dans le contexte de l'abandon des phytocides chimiques, les travaux en cours doivent se poursuivre afin d'identifier les combinaisons optimales entre espèces, types de plant et scénarios sylvicoles, le tout en fonction des caractéristiques des stations. Par ailleurs, la productivité des plantations a le plus souvent été établie avec des plantations peu aménagées. Les gains réels associés à l'utilisation de plants améliorés par sélection de semences de qualité supérieure doivent être quantifiés afin d'alimenter les modèles de simulation servant

au calcul de la possibilité forestière. De plus, les périodes de révolution devraient être optimisées en fonction des séquences d'intervention et des produits désirés. La régénération naturelle d'espèces commerciales sous le couvert des plantations mérite également d'être documentée.

Bien qu'établies de façon artificielle et le plus souvent soumises à un régime d'aménagement plus intensif, les plantations sont susceptibles d'acquiescer avec le temps le statut de système naturel dans l'opinion du public, particulièrement lorsque les arbres atteignent des dimensions impressionnantes (figure 12). La perception à l'égard de la foresterie de plantation devrait être documentée et prise en considération afin que la sylviculture qui lui est associée puisse tenir compte de cet enjeu.

La globalisation des marchés, la concurrence internationale et les progrès technologiques en matière de foresterie de plantation, ensemble conjugués aux politiques québécoises en économie, foresterie, environnement et développement durable, façonnent la réalité du secteur forestier québécois de demain. Les choix faits aujourd'hui, basés à la fois sur l'état des connaissances et les tendances mondiales, influenceront en grande partie la position concurrentielle du Québec. ◀



Figure 12. Plantation de pin blanc, pin rouge et d'épinette de Norvège dans la région de Berthierville. Les arbres, âgés de 65 ans, mesurent plus de 30 m de hauteur. À noter, la présence d'un randonneur au milieu du sentier.

Références

- ANDRÉ, P., V. BUCHET, E. DEFAYS, P. LHOIR et P. REGINSTER, 1994. Éclaircie en futaie résineuse. Fiche technique no 3, Ministère de la région Wallonne, Direction générale des ressources naturelles et de l'environnement, 37 p.
- AUSSENAC, G., A. GRANIER et R. NAUD, 1984. Éclaircie systématique dans un jeune peuplement de Douglas. Modifications microclimatiques et influences sur la croissance. *Revue forestière française*, 36 : 279-288.
- BACON, G.J., P.J. HAWKINS and J.P. WARD, 1982. Productivity of commercial thinning operations in Queensland plantations : Influence of alternative silvicultural options. *New Zealand Journal of Forestry Science*, 12 : 308-323.
- BASTIEN, Y., 1986. Plaidoyer pour les éclaircies en ligne dans les plantations d'épicéas denses. *Forêt-Entreprise*, 37:18-23.
- BEAULIEU, J., A. RAINVILLE, G. DAOUST et J. BOUSQUET, 2001. La diversité génétique des espèces arborescentes de la forêt boréale. *Le Naturaliste canadien*, 125 : 193-202.
- BECQUEY, J., 1986. Hauteur et facteur d'élancement : un équilibre à respecter. *Forêt-Entreprise*, 34 : 14-21.
- BÉLANGER, L., 2001. La forêt mosaïque comme stratégie de conservation de la biodiversité de la sapinière boréale de l'Est : l'expérience de la forêt Montmorency. *Le Naturaliste canadien*, 125 : 18-25.
- BELLEAU, P. et Y. BELL, 1995. Développement de techniques de préparation de site et de débroussaillage en vue d'assurer une meilleure croissance des plants et de contrôler la végétation compétitive. Essais, expérimentations et transfert technologique en foresterie. Projet 1038, Service canadien des forêts, Causapsal, 82 p.
- BENNETT, F.A., 1971. The role of thinning and some other problems in management of slash pine plantations. Research Paper SE-86, U.S.D.A. Forest Service, 14 p.
- BERRY, A.B., 1971. Stem form and growth of plantation red pine 30 years after heavy thinning. Information Report PS-X-24, Canadian Forestry Service, Department of Fisheries and Forestry, 13 p.
- BOLGHARI, H.A. et V. BERTRAND, 1984. Tables préliminaires de production des principales essences résineuses plantées dans la partie centrale du sud du Québec. Mémoire 79. Ministère de l'Énergie et des Ressources, Service de la recherche (Terres et Forêts), Québec, 392 p.
- BOUCHON, J., 1977. Réflexions sur les premiers résultats d'un dispositif d'éclaircies de pins sylvestres en Forêt de Lamotte-Beuvron. *Annales des sciences forestières*, 34 : 323-329.
- BOUDREAULT, C., 2001. Facteurs-clés pour le maintien de la diversité des lichens épiphytes. *Le Naturaliste canadien*, 125 : 175-179.
- BOWLING, D., 1987. Twenty-year slash pine spacing study: What to optimize? General Technical Report SE-42, U.S.D.A. Forest Service, pp. 300-304.
- BRADLEY, R.L., B.D. TITUS and C.P. PRESTON, 2000. Change to mineral N cycling and microbial communities in black spruce humus after additions of $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ and condensed tannins extracted from *Kalmia angustifolia* and balsam fir. *Soil Biology and Biochemistry*, 32:1227-1240.
- BRAS, S., B. HARVEY et M.-F. TREMBLAY, 1996. Étude des relations entre l'intensité de la préparation de terrain et les impacts sur les sols, la végétation compétitive et la croissance des plants. Essais, expérimentations et transfert technologique en foresterie. Projet 4010, Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue, Rouyn-Noranda, 30 p.
- BRIGGS, D.J., 1995. Pruning in relation to forest inventory, wood quality, and products. In Hanley, D.P., C.D. Oliver, D.A. Maguire, D.G. Briggs and R.D. Fight (éd.), *Forest Pruning and Wood Quality of western North American conifers*. Contribution No. 77, Institute of Forest Resources, University of Washington, pp. 21-35.
- BRISSETTE, J.C., R.M. JR. FRANK, T.L. STONE and T.A. SKRATT, 1999. Precommercial thinning in a northern conifer stand: 18-year results. *The Forestry Chronicle*, 75:967-972.
- BUONGIORNO, J., S. DAHR, H.C. LU and C.R. LIN, 1994. Tree size diversity and economic returns in uneven-aged forest stands. *Forest Science*, 40 : 83-103.

- BURTON, J.D., 1981. Thinning and pruning influence glaze damage in a loblolly pine plantation. Research Note SO-264, U.S.D.A. Forest Service, 4 p.
- CAMERON, A.D., 2002. Importance of early selective thinning in the development of long-term stand stability and improved log quality : a review. *Forestry*, 75: 25-35.
- CARMEAN, W.H., 1975. Forest site quality evaluation in the United States. *Advances in Agronomy*, 27: 209-269.
- CARTER, K.K and L.O. SELIN, 1987. Larch plantation management in the northeast. *Northern Journal of Applied Forestry*, 4:18-20.
- CAUBOUÉ, M., 1988. Le reboisement au Québec : choix des essences résineuses. Ministère de l'Énergie et des Ressources, Québec, 38 p.
- CAUBOUÉ, M. et D. MALENFANT, 1988. Le reboisement au Québec : exigences écologiques des épinettes (*Picea*), des pins (*Pinus*) et des mélèzes (*Larix*) plantés au Québec. Ministère de l'Énergie et des Ressources, Québec, 90 p.
- COWN, D.J., 1973. Effects of severe thinning and pruning treatments on the intrinsic wood properties of young radiata pine. *New Zealand Journal of Forestry Science*, 3: 379-389.
- CREMER, K.W., C.J. BOROUGH, F.H. MCKINNELL and P.R. CARTER, 1982. Effects of stocking and thinning on wind damage in plantations. *New Zealand Journal of Forestry Science*, 12: 244-268.
- CYR, G., 2002. L'élagage des résineux. Contexte, effets et modalités. Rapport interne 475, Direction de la recherche forestière, ministère des Ressources naturelles, Québec, 28 p.
- DAMMAN, A.W.H., 1971. Effect of vegetation changes on the fertility of a Newfoundland forest site. *Ecological Monographs*, 41: 253-270.
- DAY, M.W. and V.J. RUDOLPH, 1972. Thinning plantation red pine. Research Report 151, Michigan State University, Agricultural Experiment Station East Lansing, 12 p.
- DE GRANDPRÉ, L., Y. BERGERON, T. NGUYEN, C. BOUDREAU and P. GRONDIN, sous presse. Composition and dynamics of the understory vegetation in the boreal forests of Quebec. In Gilliam, F. S. and M. R. Roberts (éd.), Composition and dynamics of the herbaceous layer of forests of eastern North America.
- DESPONTS, M., G. BRUNET et L. BÉLANGER, 2001. Diversité structurale et biodiversité des plantes vasculaires de la sapinière à bouleau blanc de la Gaspésie. *Le Naturaliste canadien*, 125: 168-174.
- DURAND, F., Y. BERGERON et B. HARVEY, 1988. Effets de la préparation de terrain sur le type et l'abondance des espèces végétales compétitrices dans le canton d'Hébertcourt, Abitibi. Rapport de recherche 4, Université du Québec à Montréal, Montréal, 87 p.
- FLAMMARION, J.P., 1988. Interactions entre l'espacement, le cloisonnement et l'élagage dans les plantations de Douglas. *Revue forestière française*, 40: 33-40.
- FOWLER, D.P., J.D. SIMPSON, Y.S. PARK and M.H. SCHNEIDER, 1988. Yield and wood properties of 25-year-old Japanese Larch of different provenance in eastern Canada. *The Forestry Chronicle*, 64: 475-479.
- GARTNER, B. L., E. M. NORTH, G. R. JOHNSON and R. SINGLETON, 2002. Effects of live crown on vertical patterns of wood density and growth in Douglas-fir. *Canadian Journal of Forest Research*, 32: 439-447.
- GAUTHIER, S., A. LEDUC, B. HARVEY, Y. BERGERON et P. DRAPEAU, 2001. Les perturbations naturelles et la diversité écosystémique. *Le Naturaliste canadien*, 125: 10-17.
- GERISCHER, G.F.R. and A.M. DEVILLIERS, 1963. The effect of heavy pruning on timber properties. *Forestry in South Africa*, 3:15-41.
- GINGRAS, B.M., S. RICHARD et N. ROBERT, 2002. Performance de cinq ans en plantations comparatives de plants résineux de fortes dimensions et de feuillus cultivés dans des récipients à parois ajourées. Mémoire de recherche forestière 141, Direction de la recherche forestière, ministère des Ressources naturelles, Québec, 100 p.
- GOUVERNEMENT DU QUÉBEC, 1994. Une stratégie : Aménager pour mieux protéger les forêts. Publication FQ94-3051, ministère des Ressources naturelles, Québec, 197 p.
- GOUVERNEMENT DU QUÉBEC, 1999. Le plant résineux cultivé à racines nues, un costaud tout terrain. Publication RN99-3089d, ministère des Ressources naturelles, Québec.
- GOUVERNEMENT DU QUÉBEC, 2000. Pour une flexibilité accrue, le plant résineux cultivé en récipient. Publication 2000-3103d, ministère des Ressources naturelles, Québec.
- GROSSNICKLE, S.C., 2000. Ecophysiology of Northern Spruce Species: The Performance of Planted Seedlings. NRC Research Press, Ottawa, 409 p.
- GUITTON, J.-L. et F. RUCHAUD, 1996. Conséquences écologiques de l'éclaircie des peuplements résineux. Informations – Forêt no. 1 fiche n° 523, 6 p.
- HAEUSSLER, S., L. BEDFORD, J.O. BOATENG and A. MACKINNON, 1999. Plant community responses to mechanical site preparation in northern interior British Columbia. *Canadian Journal of Forest Research*, 29:1084-1100.
- HAIGHT, R.G., 1993. Optimal management of loblolly pine plantations with stochastic price trends. *Canadian Journal of Forest Research*, 23: 41-48.
- HALL, J.P., 1983. Comparison of the growth of larch and other conifers on reforested and afforested sites in Newfoundland. *The Forestry Chronicle*, 59: 14-16.
- HANSEN, A.J., T.A. SPIES, F.J. SWANSON and J.L. OHMANN, 1991. Conserving biodiversity in managed forests. *Bioscience*, 41: 382-392.
- HARTLEY, M.J., 2002. Rationale and methods for conserving biodiversity in plantation forests. *Forest Ecology and Management*, 155: 81-95.
- HEDDEN, R.L., 1983. Evaluation of loblolly pine thinning regimes for reduction of losses from southern pine beetle attack. General Technical Report SE-24, U.S.D.A. Forest Service, pp. 371-375.
- INDERJIT and A.U. MALLIK, 2002. Can *Kalmia angustifolia* interference to black spruce (*Picea mariana*) be explained by allelopathy? *Forest Ecology and Management*, 160: 75-84.
- JOBIDON, R., 1990. Short-term effect of three mechanical site preparation methods on species diversity. *Tree Planters' Notes*, 41: 39-42.
- JOBIDON, R., 1992. Measurement of light transmission in young conifer plantations: a new technique for assessing herbicide efficacy. *Northern Journal of Applied Forestry*, 9: 112-115.
- JOBIDON, R., 1994. Light threshold for optimal black spruce (*Picea mariana*) seedling growth and development under brush competition. *Canadian Journal of Forest Research*, 24:1629-1635.
- JOBIDON, R., 1995. Autécologie de quelques espèces de compétition d'importance pour la régénération forestière au Québec : Revue de littérature. Mémoire de recherche forestière 117, Direction de la recherche forestière, ministère des Ressources naturelles, Québec, 180 p.
- JOBIDON, R., 1996. Quand faut-il déloger une plantation de conifères de la végétation de compétition? *L'aubelle*, 114: 17-19.
- JOBIDON, R., 1997a. Stump height effects on sprouting of mountain maple, paper birch and pin cherry – 10 year results. *The Forestry Chronicle*, 73: 590-595.
- JOBIDON, R., 1997b. Pin cherry sucker regeneration after cutting. *Northern Journal of Applied Forestry*, 14:117-119.
- JOBIDON, R., 2000a. Density-dependent effects of northern hardwood competition on selected environmental resources and young white spruce (*Picea glauca*) plantation growth, mineral nutrition, and stand structural development – a 5-year study. *Forest Ecology and Management*, 130: 77-97.
- JOBIDON, R., 2000b. Les feuillus de lumière : une menace au succès des plantations d'épinette. *L'aubelle*, 133: 13-15.
- JOBIDON, R., G. CYR and N. THIFFAULT, en préparation. Plant species diversity and composition along an experimental gradient of northern hardwood abundance in *Picea mariana* plantations.
- JOBIDON, R. et L. CHARETTE, 1997. Effet, après 10 ans, du dégagement manuel simple ou répété et de la période de coupe de la végétation de compétition sur la croissance de l'épinette noire en plantation. *Canadian Journal of Forest Research*, 27:1979-1991.
- JOBIDON, R., L. CHARETTE and P.Y. BERNIER, 1998. Initial size and competing vegetation effects on water stress and growth of *Picea mariana* (Mill.)

- BSP seedlings planted in three different environments. *Forest Ecology and Management*, 103: 293-305.
- JOBIDON, R. and G. CYR, soumis. Consequences of two contrasting competing vegetation covers on black and white spruce plantation establishment. II. Temporal variations of the root-zone soil temperature profiles. *Annals of Forest Science*.
- JOBIDON, R., F. TROTTIER et L. CHARETTE, 1999. Dégagement chimique ou manuel de plantations d'épinette noire? Étude de cas dans le domaine de la sapinière à bouleau blanc au Québec. *The Forestry Chronicle*, 76: 973-979.
- JOBIDON, R. and V. ROY, soumis. Consequences of two contrasting competing vegetation covers on black and white spruce plantation establishment. I. Performance of four seedling stock sizes after eight years. *Annals of Forest Science*.
- JOHANSSON, K., 1993. Influence of initial spacing and tree class on the basic density of *Picea abies*. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 8: 18-27.
- JONES, E.P. Jr., 1987. Slash pine plantation spacing study - age 30. General Technical Report SE-42, U.S.D.A. Forest Service, pp. 45-49.
- KASPAR, T.C. and W.L. BLAND, 1992. Soil temperature and root growth. *Soil Science*, 154: 290-299.
- KELLER, R. et F. THERCELIN, 1984. L'élagage des plantations d'épicéa commun et de douglas. *Revue forestière française*, 36: 289-302.
- KER, M.F., 1987. Effects of spacing on balsam fir: 25-year results from the Green River spacing trials. In: *Proceedings of the precommercial thinning workshop*, Fredericton Canadian Forest Service, Maritimes Region, pp. 58-75.
- KERSHAW Jr., J.A. and D.A. MAGUIRE, 2000. Influence of vertical foliage structure on the distribution of stem cross-sectional area increment in western hemlock and balsam fir. *Forest Science*, 46: 86-94.
- KOZLOWSKI, T.T., 1982. Water supply and tree growth. Part I: Water deficits. *Forestry Abstracts*, 43: 57-95.
- KUBIN, E. and L. KEMPPAINEN, 1991. Effect of clearcutting of boreal spruce forest on air and soil temperature conditions. *Acta Forestalia Fennica*, 225, 42 p.
- LÄHDE, E., O. LAIHO, Y. NOROKORPI and T. SAKSA, 1999. Stand structure as the basis for diversity index. *Forest Ecology and Management*, 115: 213-220.
- LAMHAMED, M.S., P.Y. BERNIER and C. HÉBERT, 1997. Effect of shoot size on the gas exchange and growth of containerized *Picea mariana* seedlings under different watering regimes. *New Forests*, 13: 209-223.
- LAMHAMED, M.S., P.Y. BERNIER, C. HÉBERT and R. JOBIDON, 1998. Physiological and growth response of three sizes of containerized *Picea mariana* seedlings outplanted with and without vegetation control. *Forest Ecology and Management*, 110: 13-23.
- LEAKE, J.R. and D.J. READ, 1989. The effects of phenolic compounds on nitrogen mobilisation by ericoid mycorrhizal systems. *Agricultural Ecosystem Environment*, 29: 225-236.
- LIECHTY, H.O., D.D. REED and G.D. MROZ, 1988. An interim economic comparison of thinning treatments in a high site quality red pine plantation. *Northern Journal of Applied Forestry*, 5: 211-215.
- LITTLE, S., J.J. MOHR and P.V. MOOK, 1968. Ten-year effects from row thinning in loblolly pine plantations of eastern Maryland. *Research Note NE-77*, U.S.D.A. Forest Service, 8 p.
- LUNDGREN, A.L., 1981. The effect of initial number of trees per acre and thinning densities on timber yields from red pine plantations in the Lake States. *Research Paper NC-193*, U.S.D.A. Forest Service, 25 p.
- LUNDMARK-THELIN, A. and M.J. JOHANSSON, 1997. Influence of mechanical site preparation on decomposition and nutrient dynamics of Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) needle litter and slash needles. *Forest Ecology and Management*, 96: 101-110.
- LUST, N., B. MUYS and L. NACHTERGALE, 1998. Increase of biodiversity in homogeneous Scots pine stands by an ecological diversified management. *Biodiversity and Conservation*, 7: 249-260.
- MALLIK, A.U., 1993. Ecology of a forest weed of Newfoundland: vegetative regeneration strategy of *Kalmia angustifolia*. *Canadian Journal of Botany*, 71: 161-166.
- MARGOLIS, H.A. and D.G. BRAND, 1990. An ecophysiological basis for understanding plantation establishment. *Canadian Journal of Forest Research*, 20: 375-390.
- MCCLAIN, K.M., D.M. MORRIS, S.C. HILLS and L.J. BUSE, 1994. The effects of initial spacing on growth and crown development for planted northern conifers - 37-year results. *The Forestry Chronicle*, 70: 174-182.
- MEGRAW, R.A. (éd.), 1985. Wood quality factors in loblolly pine: the influence of tree age, position in tree, and cultural practice on wood specific gravity, fiber length, and fibril angle. Tappi Press, Atlanta, 88 p.
- MITCHELL, R.G., WARING, R.H. and G.B. PITMAN, 1983. Thinning lodgepole pine increases tree vigor and resistance to mountain pine beetle. *Forest Science*, 29: 204-211.
- MORRIS, D.M., C. BOWLING and S.C. HILLS, 1994. Growth and form responses to pre-commercial thinning regimes in aerially seeded jack pine stands: 5th year results. *The Forestry Chronicle*, 70: 780-787.
- MUNSON, A.D., H.A. MARGOLIS and D.G. BRAND, 1993. Intensive silvicultural treatment: impact on soil fertility and planted conifer response. *Soil Science Society of America Journal*, 57: 246-255.
- NILSSON, U. and G. ÖRLANDER, 1995. Effects of regeneration methods on drought damage to newly planted Norway spruce seedlings. *Canadian Journal of Forest Research*, 25: 790-802.
- O'HARA, K.L., 1991. A biological justification for pruning in coastal Douglas-fir stands. *Western Journal of Applied Forestry*, 6: 59-63.
- ÖRLANDER, G., P. GEMMEL and J. HUNT, 1990. Site Preparation: A Swedish Overview. FRDA Report 105, British Columbia Ministry of Forests, Victoria, 61 p.
- OSWALD, H., 1984. Production et sylviculture du Douglas en plantations. *Revue forestière française*, 36: 268-278.
- OSWALD, H. et J. PARDÉ, 1984. Le Douglas en France: sylviculture et production. *Revue forestière française*, 36: 56-68.
- PAPE, R., 1999. Effects of thinning regime on the wood properties and stem quality of *Picea abies*. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 14: 38-50.
- PARDÉ, J., 1964. Intensité des éclaircies et production ligneuse. *Revue forestière française*, 12: 936-945.
- PARENT, B., 2002. Ressources et industries forestières: portrait statistique édition 2002. Publication 2002-3500, Gouvernement du Québec, Québec. [En ligne] <http://www.mrn.gouv.qc.ca/forets/>
- PATERSON, J., D. DEYOE, S. MILLSON and R. GALLOWAY, 2001. Handling and planting of seedlings. In: *Wagner, R.G. and S.J. Colombo (éd.), Regenerating the Canadian Forest: Principles and Practice for Ontario*. Fitzhenry & Whiteside, Markham, pp. 325-341.
- PIENE, H., 1978. Effects of increased spacing on carbon mineralization rates and temperature in a stand of young balsam fir. *Canadian Journal of Forest Research*, 8: 398-406.
- POTHIER, D., 2002. Twenty-years results of precommercial thinning in a balsam fir stand. *Forest Ecology and Management*, 168: 177-186.
- POTHIER, D. and H.A. MARGOLIS, 1991. Analysis of growth and light interception of balsam fir and white birch saplings following precommercial thinning. *Annales des sciences forestières*, 48: 123-132.
- PRÉGENT, G., 1998. L'éclaircie des plantations. Mémoire de recherche forestière 133, Direction de la recherche forestière, ministère des Ressources naturelles, Québec, 38 p.
- PRÉGENT, G., en préparation. Caractéristiques du bois coupé et du peuplement résiduel à la première éclaircie commerciale des plantations résineuses. Mémoire de recherche forestière, Direction de la recherche forestière, ministère des Ressources naturelles, Québec.
- PRÉGENT, G., V. BERTRAND et L. CHARETTE, 1996. Tables préliminaires de rendement pour les plantations d'épinette noire au Québec. Mémoire de recherche forestière 118, Direction de la recherche forestière, ministère des Ressources naturelles, Québec, 70 p.

- PRESCOTT, C.E., D.G. MAYNARD and R. LAIHO, 2000. Humus in northern forests: friend or foe? *Forest Ecology and Management*, 133 : 23-36.
- PRÉVOST, M., 1992. Effet du scarifiage sur les propriétés du sol, la croissance des semis et la compétition : revue des connaissances actuelles et perspectives de recherches au Québec. *Annales des sciences forestières*, 49 : 277-296.
- PRÉVOST, M., 1996. Effets du scarifiage sur les propriétés du sol et l'ensemencement naturel dans une pessière noire à mousses de la forêt boréale québécoise. *Canadian Journal of Forest Research*, 26 : 72-86.
- READER, T.G., and E.A. KURMES, 1996. The influence of thinning to different stocking levels on compression wood development in Ponderosa pine. *Forest Products Journal*, 46 : 92-100.
- REUKEMA, D.L., 1970. Forty-Year development of Douglas-fir stands planted at various spacings. Research Paper PNW-100, U.S.D.A. Forest Service, 21 p.
- REUKEMA, D.L., 1979. Fifty-year development of Douglas-fir stands planted at various spacings. Research Paper PNW-253, U.S.D.A. Forest Service, 21 p.
- REUKEMA, D.L. and D. BRUCE, 1977. Effects of thinning on yield of Douglas-fir: Concepts and some estimates obtained by simulation. General Technical Report PNW-58, U.S.D.A. Forest Service, 36 p.
- RIOU-NIVERT, P., 1982. Constatastions et propositions pour un traitement énergétique des peuplements résineux artificiels. 2e partie : Création de nouveaux peuplements. *Forêt-Entreprise*, 81 : 14-21.
- RIOU-NIVERT, P., 1984. L'IDF et les plantations de résineux à grands espacements. *Forêt-Entreprise*, 17 : 8-11.
- RIOU-NIVERT, P., 1989. Douglas, qualités du bois, élagage et sylviculture. *Revue forestière française*, 41 : 387-410.
- RIOU-NIVERT, P., 2001. Facteurs de stabilité des peuplements et gestion de l'équilibre. *Forêt-Entreprise*, 139 : 17-25.
- RIOU-NIVERT, P. et J.-M. GEORGEOT, 1982. Densité de plantation et sylviculture du Douglas en forêt domaniale d'Amanche : Les plus grands espacements ont donné les meilleurs résultats. *Forêt-Entreprise*, 82 : 14-25.
- RIOU-NIVERT, P. et P. LADEN, 1991. Quel avenir pour les plantations d'épicéa commun dans l'est de la France ? *Revue forestière française*, 43 : 413-440.
- ROY, V., P.Y. BERNIER, A.P. PLAMONDON and J.-C. RUEL, 1999. Effect of drainage and microtopography in forested wetlands on the microenvironment and growth of planted black spruce seedlings. *Canadian Journal of Forest Research*, 29 : 563-574.
- SAVILL, P., J. EVANS, D. AUCLAIR and J. FALCK, 1997. *Plantation Silviculture in Europe*. Oxford University Press, Oxford, 297 p.
- SHEEDY, G. et V. BERTRAND, 1997. Résultats de 10 ans concernant les éclaircies en ligne réalisées dans les plantations de la forêt de Drummondville. Note de recherche forestière 77, Direction de la recherche forestière, ministère des Ressources naturelles, Québec, 20 p.
- SPBQ (SYNDICAT DES PRODUCTEURS DE BOIS DE LA RÉGION DE QUÉBEC), 2002. Prix du bois destiné au sciage et déroulage. Les marchés spéciaux. [En ligne] spbrq.qc.ca/Prix/. Page consultée le 13 septembre.
- SPELLERBERG, I.F. and J.W.D. SAWYER, 1996. Standards for biodiversity: a proposal based on biodiversity standards for forest plantations. *Biodiversity and Conservation*, 5 : 447-459.
- STAEBLER, G.R., 1963. Growth along the stems of full-crowned Douglas-fir trees after pruning to specified heights. *Journal of Forestry*, 61 : 124-127.
- ST-AMOUR, M., 2001. Essai opérationnel de trois outils dans des travaux d'élagage. *FERIC. Avantage* 2 (11), 4 p.
- STIELL, W.M., 1986. Fifteen year growth of tamarack planted at six spacings on an upland site. Information Report PI-X-62, Canadian Forestry Service, Natural Resources Canada, 22 p.
- SUTHERLAND, B.J. and F.F. FOREMAN, 1995. Guide to the use of mechanical site preparation equipment in Northwestern Ontario. Technical Report TR-87, Canadian Forest Service, Natural Resources Canada, Sault Ste. Marie, 186 p.
- TASSISSA, G. and H.E. BURKHART, 1998. Modeling thinning effects on ring specific gravity of Loblolly pine (*Pinus taeda* L.). *Forest Science*, 44 : 212-223.
- THIBODEAU, L., P. RAYMOND, C. CAMIRÉ and A.D. MUNSON, 2000. Impact of precommercial thinning in balsam fir stands on soil nitrogen dynamics, microbial biomass, decomposition, and foliar nutrition. *Canadian Journal of Forest Research*, 30 : 229-238.
- THIFFAULT, N., R. JOBIDON and A.D. MUNSON, soumis-a. Scarification and competition effects on spruce plantation establishment. I. Seedling morpho-physiological responses in relation to stock types. *Annals of Forest Science*.
- THIFFAULT, N., R. JOBIDON and A.D. MUNSON, soumis-b. Scarification and competition effects on spruce plantation establishment. II. Responses of soil temperature, water content, and fertility. *Annals of Forest Science*.
- THIFFAULT, N., A.D. MUNSON et R. JOBIDON, 2001. Efficacité du scarifiage à disques pour la gestion du *Kalmia angustifolia* sur un site d'Abitibi récemment coupé. Huitième congrès annuel de l'Association québécoise de gestion de la végétation, Bécancour, 23-24 octobre.
- TIMMER, V.R., 1997. Exponential nutrient loading: a new fertilization technique to improve seedling performance on competitive sites. *New Forests*, 13 : 279-299.
- TIMMER, V.R. and A.D. MUNSON, 1991. Site-specific growth and nutrition of planted *Picea mariana* in the Ontario Clay Belt. IV. Nitrogen loading response. *Canadian Journal of Forest Research*, 21 : 1058-1065.
- TISSERAND, A. et J. PARDÉ, 1982. Le dispositif expérimental des Heez d'Hargnies (Ardennes). Contribution à la définition d'une sylviculture pour les plantations d'épicéa commun dans le nord-est de la France. *Revue forestière française*, 34 : 353-380.
- TROTTIER, F., 1998. Performance des plantations établies par le ministère des Ressources naturelles, dans les forêts publiques du Québec, de 1986 à 1995. Publication RN98-3085, Direction de l'assistance technique, ministère des Ressources naturelles, Québec, 124 p.
- UOTILA, A. and S. MUSTONEN, 1994. The effect of different levels of green pruning on the diameter growth of *Pinus sylvestris* L. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 9 : 226-232.
- VON ALTHEN, F.W. and W.M. STIELL, 1965. Twenty-three years of management in the Rockland red pine plantation. Publication 1123, Department of Forestry, Canada, 20 p.
- WAGNER, R.G., 2000. Competition and critical-period thresholds for vegetation management decisions in young conifer stands. *The Forestry Chronicle*, 76 : 961-968.
- WAGNER, R.G., J. FLYNN, R. GREGORY, C.K. MERTZ and P. SLOVIC, 1998. Acceptable practices in Ontario's forests : differences between the public and forestry professionals. *New Forests*, 16 : 139-154.
- WILLCOCKS, A.J. and W. BELL, 1995. How initial forest plantation density affects future stand growth. TN-08, Ontario Ministry of Natural Resources, Northwest Science & Technology, 16 p.
- ZAHNER, R. and F.W. WHITMORE, 1960. Early growth of radically thinned loblolly pine. *Journal of Forestry*, 58 : 628-634.
- ZHANG, S.Y., G. CHAURET, H.Q. REN and R. DESJARDINS, 2002. Impact of initial spacing on plantation black spruce lumber grade yield, bending properties, and MSR yield. *Wood and Fiber Science*, 34 : 460-475.
- ZHANG, S.Y., Y. CORNEAU and G. CHAURET, 1998. Impact of precommercial thinning on tree and wood characteristics, and product quality and value in balsam fir. Project No 1108, Forintek Canada Corp., Eastern Division, Sainte-Foy, 74 p.
- ZHANG, S.Y. and A. KOUBAA, 2002. Wood characteristics, processing and end uses of black spruce, white spruce, jack pine, and exotic larchs. Report 2313, Canadian Forest Service and Forintek Canada Corp., Sainte-Foy.