Coefficients de distribution de la régénération, cinq ans après des coupes avec protection des petites tiges marchandes appliquées dans des sapinières et des pessières noires du Québec

par Martin Riopel^{1,2}, Jean Bégin¹ et Jean-Claude Ruel¹

RÉSUMÉ

Pour certaines forêts mûres dominées par le sapin baumier (*Abies balsamea* [L.] Mill.) ou l'épinette noire (*Picea mariana* [Mill.] BSP), il peut être avantageux de récolter les tiges d'un diamètre à hauteur de poitrine supérieur à 15 cm tout en préservant celles plus petites. Ce traitement, nommé coupe avec protection des petites tiges marchandes, produit une alternance de bandes, où la modalité de coupe partielle est appliquée, et de corridors affectés par le passage de la machinerie. L'étude visait à étudier la présence de régénération, cinq ans après traitement dans 22 blocs expérimentaux, à partir de 4896 sous-placettes de 4 m². Les coefficients de distribution de la régénération (CDR) des résineux et des feuillus ont été modélisés afin d'identifier les variables qui les conditionnent. La bande se distingue avec une régénération résineuse très bien distribuée alors que le sentier présente des CDR plus variables et plus faibles, parfois inférieurs à 60 %. Les stations dominées par l'épinette noire sont moins bien régénérées que les stations associées aux sapinières. La densité de tiges marchandes résineuses protégées affecte positivement les CDR des résineux et des feuillus dans le sentier. La présence de résineux y est aussi affectée par la saison de récolte et la précipitation totale annuelle. Des alternatives sylvicoles pouvant être pratiquées dans certains sentiers sont suggérées.

Mots-clés : régénération, coupe partielle, coefficient de distribution, *Picea mariana*, *Abies balsamea*, *Betula papyrifera*, Québec, sentier, précipitation, saison de récolte, végétation potentielle

ABSTRACT

For certain mature forests dominated by balsam fir (*Abies balsamea* [L.] Mill.) or black spruce (*Picea mariana* [Mill.] BSP), it may be preferable to harvest trees with diameter at breast height greater than 15 cm while conserving smaller ones. This treatment, called harvesting with protection of small merchantable trees, produces strips, where partial cutting is applied, alternating with corridors, which are disturbed by heavy equipment during harvesting. This project studied stocking levels five years after treatment on 4896 sub-plots of 4 m² in 22 blocks. Stocking coefficients (SC) for coniferous and deciduous species were modeled in order to identify variables affecting stocking. The strips had well-distributed coniferous regeneration, while SC in the corridors were more variable and lower, occasionally less than 60%. Black spruce-dominated sites were not as well stocked as balsam fir-dominated sites. Stocking levels of protected coniferous merchantable trees positively influence coniferous and deciduous SC in the corridors. The presence of coniferous species is also affected by harvest season and total annual rainfall. Alternative silvicultural treatments applicable in certain corridors are presented.

Key words: regeneration, partial cut, stocking coefficient, *Picea mariana*, *Abies balsamea*, *Betula papyrifera*, Quebec, corridor, rainfall, harvesting period, potential vegetation

Martin Riopel

Jean Bégin

Jean-Claude Ruel

¹Université Laval, Faculté de foresterie, de géographie et de géomatique, 2405, rue de la Terrasse, Québec (Québec) G1V 0A6

²Auteur correspondant. Courriel : Martin.Riopel@live.ca

Introduction

En général, les peuplements résineux mûrs dominés par le sapin baumier (*Abies balsamea* [L.] Mill.) ou l'épinette noire (*Picea mariana* [Mill.] BSP) sont naturellement bien régénérés dans la forêt boréale québécoise (Ruel 1989, Pothier 1996). Une stratégie de récolte axée sur la protection de la régénération préétablie avec des sentiers espacés apparaît donc une avenue intéressante pour exploiter la forêt tout en assurant la création d'un nouveau peuplement productif (Pothier 1996). C'est pourquoi la coupe avec protection de la régénération et des sols (CPRS) est largement utilisée. Celle-ci consiste essentiellement en la récolte de toutes les tiges marchandes, soit celles dont le diamètre à hauteur de poitrine (dhp, mesuré à 1,3 m du sol) est supérieur à 9,0 cm, tout en limitant la circulation de la machinerie (MRNFP 2003). Dans le cadre d'un aménagement forestier s'inspirant des perturbations naturelles, les pratiques sylvicoles ne devraient pas se limiter qu'à la CPRS. Il importe d'intégrer d'autres stratégies de récolte comme les coupes partielles afin de perpétuer une diversité de peuplements d'âges, de compositions et de structures variés que l'on retrouve naturellement lorsque les cycles de perturbations sont longs (Bergeron *et al.* 1999).

Pour des forêts irrégulières à dominance résineuse où l'on retrouve un sous-étage composé d'une portion importante de gaules (dhp, 1,1–9,0 cm) et de petites tiges marchandes (dhp, 9,1–15,0 cm) vigoureuses de sapin baumier, d'épinette noire et (ou) d'épinette blanche (*Picea glauca* [Moench] Voss), il peut être avantageux de les préserver tout en prélevant les tiges de plus fortes dimensions. Une des options est la coupe avec protection des petites tiges marchandes (CPPTM) qui consiste principalement à récolter les tiges au-dessus d'un diamètre limite prescrit (généralement dhp de 15,0 cm) tout en protégeant soigneusement les tiges de dimensions inférieures (Riopel *et al.* 2010). Un traitement similaire (nommé HARP pour *harvest with regeneration protection*) est utilisé en Ontario dans les pessières noires sur sols organiques (Groot 2002). Malgré le taux de prélèvement élevé (70–90 %), il peut être considéré comme faisant partie du régime sylvicole d'aménagement équienné ou inéquienne, dépendamment de la séquence prévue de traitements sylvicoles (Groot *et al.* 2005). L'appartenance à l'un ou l'autre des régimes dépend de l'évolution à long terme des peuplements résiduels, laquelle est encore méconnue, d'où l'importance d'améliorer nos connaissances sur l'effet de cette nouvelle pratique sur la dynamique des écosystèmes traités. À cause des risques élevés de pertes, la CPPTM n'est pas recommandée pour les peuplements équiennés et les peuplements mixtes d'épinette noire et de pin gris (Riopel *et al.* 2010).

Le succès du traitement repose sur plusieurs éléments dont l'établissement et le développement de la régénération. La présence de celle-ci permet de combler les espaces non occupés par les tiges protégées et contribue à la formation d'une structure verticale hétérogène. Lorsque la régénération préétablie est abondante, le succès de régénération après coupe dépend de deux principaux éléments : 1) la protection et la survie de la régénération préétablie et 2) l'installation de nouveaux semis (recrutement). Les facteurs associés à la régénération préétablie touchent essentiellement à leur vigueur, à l'effort accordé à leur préservation durant les opérations (Ruel *et al.* 1995), ainsi qu'au procédé (Ruel 1992) et à la saison de récolte (Groot 1995). L'installation des recrues est complexe car elle dépend non seulement de la présence de semences viables,

mais aussi de leur germination et de leur survie (Greene *et al.* 1999, Philippe *et al.* 2006). L'efficacité de ces étapes dépend, entre autres, de la qualité du lit de germination et de l'exposition du sol minéral (Raymond *et al.* 2000, Calogeropoulos *et al.* 2004), de la région (Ruel 1992, Messaoud *et al.* 2007), des conditions climatiques (Hogg et Schwarz 1997, Messaoud *et al.* 2007, Martin-DeMoor *et al.* 2010), du taux de rétention des coupes partielles ou éclaircies (Raymond *et al.* 2000, Groot 2002, Calogeropoulos *et al.* 2004, Solarik *et al.* 2010), de la proximité des semenciers ou de la forêt mûre (Frisque et Vézina 1977, Payendeh et Haavisto 1982, Ruel 1992, Martin-DeMoor *et al.* 2010) et des caractéristiques écologiques de la station (Harvey et Bergeron 1989, Ruel 1992, Harvey et Brais 2002, Dubois *et al.* 2006, Lafleur *et al.* 2010). De plus, la composition spécifique avant traitement joue un rôle important car chaque espèce possède une stratégie de reproduction qui lui est propre (Ruel 1989, Pothier 1996, Greene *et al.* 1999). En plus de la reproduction sexuée, l'épinette noire et, dans une moindre mesure, le sapin baumier et l'épinette blanche peuvent se reproduire par marcottage alors que le bouleau à papier (*Betula papyrifera* Marsh.) peut produire des rejets de souche (Greene *et al.* 1999).

Les parterres issus des CPPTM sont caractérisés par une alternance de bandes, où la modalité de coupe partielle est appliquée, et de corridors affectés par le passage de la machinerie (sentiers de débardage). Ces deux zones distinctes de perturbation sont fort différentes au niveau du taux de protection de la régénération préétablie (Harvey et Brais 2002), de la compaction du sol (Brais et Camiré 1998), des conditions microclimatiques (luminosité et température) et des lits de germination (Solarik *et al.* 2010). Les perturbations engendrées dans les sentiers peuvent favoriser certaines espèces et affecter la productivité (Harvey et Brais 2002, Lafleur *et al.* 2010). Il apparaît donc d'intérêt d'étudier ces deux zones séparément.

Malgré qu'il soit reconnu que le succès de régénération dépende de plusieurs facteurs, l'impact simultané de différentes variables sur l'abondance de régénération a été peu étudié dans des coupes partielles comme la CPPTM. Pour ce traitement, les résultats publiés jusqu'à présent portent essentiellement sur des analyses descriptives des densités (Groot 2002, Fenton *et al.* 2008, Cimon-Morin *et al.* 2010). L'abondance relative des espèces de sous-bois a aussi été décrite dans des CPPTM de l'Abitibi (Bescond *et al.* 2011). La présente étude profite d'un large réseau de suivi (Riopel *et al.* 2010) dans des sapinières et des pessières de différentes conditions écologiques, dendrométriques et climatiques pour étudier l'abondance de la régénération, cinq ans après des CPPTM. Pour ce faire, des analyses ont été faites en tenant compte du programme québécois de classification écologique (Saucier 2004). La végétation potentielle, une unité de classification permanente de la station qui synthétise les caractéristiques dynamiques de la végétation, est une des variables écologiques qui peut aider à mieux prédire l'évolution de la forêt après perturbation et la compétition exercée sur les espèces arborescentes. Par exemple, la sapinière à bouleau blanc (MS2) signifie que la dynamique naturelle de cette station devrait mener vers une forêt composée de sapins baumiers et de bouleaux à papier accompagnés d'épinettes blanches. Cette information écologique disponible aux chercheurs et aux praticiens mérite d'être prise en considération afin de mieux évaluer l'effet des interventions sylvicoles sur l'évolution future de la forêt.

Les objectifs de l'étude visaient (1) l'analyse de l'effet de la végétation potentielle et de la zone (bande vs sentier) sur la présence de régénérations résineuses et feuillues, (2) la comparaison de la distribution de la régénération en sapins baumiers et en épinettes (3) et l'identification des variables qui conditionnent la présence de régénération résineuse et feuillue dans le sentier.

Matériel et Méthodes

Description des dispositifs

L'étude tire avantage de dispositifs de recherche qui permettent le suivi de placettes permanentes dans des CPPTM réalisées au Québec (Canada) entre les latitudes 47°20'N et 51°10'N et les longitudes 65°00'O et 77°00'O (Riopel *et al.* 2010), à des altitudes variant entre 310 m et 735 m. Selon le système hiérarchique de classification écologique de Saucier *et al.* (1998), les domaines bioclimatiques couverts sont ceux de la sapinière à bouleau jaune, de la sapinière à bouleau blanc et de la pessière à mousses (tableau 1). Les végétations potentielles ont été identifiées pour chaque placette à l'aide des guides de reconnaissance des types écologiques (p. ex., Morneau et Landry 2007). Elles se classent parmi la sapinière à bouleau blanc (MS2), la sapinière à épinette noire (RS2) et la pessière noire à mousses ou à éricacées (RE2). Les blocs sont pour la plupart situés sur des dépôts glaciaires et fluvioglaciaires. La forte majorité des placettes est caractérisée par des sols bien drainés de plus de 50 cm d'épaisseur (stations mésiques) et de texture moyenne à grossière. Des observations faites avant traitement dans certains blocs ont révélé que la régénération résineuse préétablie était abondante et très bien distribuée (résultats non présentés).

Réalisation du traitement

Ces dispositifs de recherche ont fait l'objet de CPPTM réalisées, entre 1997 et 2002, par bois courts (abatteuse-façonneuse munie d'une tête multifonctionnelle et porteur de bois tronçonnés) ou par arbres entiers (abatteuse-groupeuse et débardeur à grappin ou à câbles) en respectant le mieux possible le diamètre-limite prescrit (généralement 15 cm de dhp) et en limitant la circulation des débardeurs et des porteurs à l'intérieur de sentiers de 3 m à 5 m de largeur. Les traitements ont été appliqués en été ou en automne, à l'exception d'un bloc récolté durant la période hivernale (tableau 1). Tel que pratiqué dans plusieurs forêts boréales à dominance résineuse, les bouleaux à papier n'ont généralement pas été récoltés, faute d'un marché suffisant pour la

pâte feuillue (Roy *et al.* 2001). Ainsi on retrouve, dans certains blocs après CPPTM, des bouleaux pouvant atteindre 34 cm de dhp et présentant parfois des signes de dépérissement.

Échantillonnage

Des placettes permanentes de forme polygonale ou rectangulaire, d'une superficie moyenne de 384 m², ont été établies de manière à évaluer leurs caractéristiques avant et immédiatement après traitement ainsi que pour effectuer leur suivi deux et cinq ans plus tard. Entre autres, toutes les tiges vivantes de plus de 1,1 cm de dhp ont été mesurées et des données ont été récoltées concernant les sentiers de débardage traversant les placettes. Une description détaillée du protocole d'inventaire des placettes permanentes est présentée par Riopel *et al.* (2010). Notons que, suite aux pertes observées les cinq premières années après CPPTM, les blocs caractérisés par un mélange d'épinettes noires et de pins gris avant traitement ont été soustraits de l'analyse (risques trop élevés de chablis) pour se concentrer sur ceux qui sont susceptibles de répondre adéquatement au traitement. Un des blocs a dû être éliminé de l'analyse parce que les sentiers ont été affectés par un scarifiage. Quelques placettes ne font pas partie de cette étude car l'inventaire de régénération n'a pu y être effectué. Avant traitement, les blocs de RE2 étaient des pessières noires pures (plus de 75 % de la surface terrière résineuse en épinettes noires) alors que ceux de MS2 et RS2 étaient composés d'un mélange de sapin baumier et d'épinettes (principalement *P. mariana*).

Tableau 1. Description des blocs étudiés pour l'analyse de la régénération, cinq ans après des coupes avec protection des petites tiges marchandes.

Bloc	Nombre de placettes analysées	Végétations potentielles échantillonnées ^a	Sous-domaine bioclimatique ^b	Procédé de récolte ^c	Période de récolte
1	16	RE2	6 de l'est	A.E.	Été 1997
2	12	RS2	6 de l'est	A.E.	Été 1997
3	16	RS2	5 de l'est	A.E.	Été 1997
4	27	RS2/RE2	6 de l'est	B.C.	Automne 1997
5	28	RE2/RS2	6 de l'est	B.C./A.E.	Été 1998
6	17	RE2	6 de l'est	B.C.	Été 1998
8	9	MS2/RS2	6 de l'est	B.C.	Été 1999
9	20	RS2/MS2	5 de l'est	B.C.	Été 1999
10	17	MS2/RS2	5 de l'est	B.C.	Été 1999
12	17	RE2	4 de l'ouest	A.E.	Automne 1999
14	21	RE2	6 de l'est	B.C.	Automne 1999
16	19	RE2	5 de l'ouest	B.C.	Hiver 2000
17	15	MS2/RS2	6 de l'est	B.C.	Automne 1999
18	14	RE2	6 de l'ouest	B.C.	Été 2000
19	15	RE2	6 de l'ouest	B.C.	Été 2000
20	17	RS2	5 de l'est	B.C.	Été 2000
21	13	RE2/RS2	6 de l'ouest	B.C.	Automne 2000
22	17	RE2	4 de l'ouest	A.E.	Été 2000
26	17	RS2/MS2	6 de l'est	B.C.	Été 2001
27	13	RS2	6 de l'est	B.C.	Automne 2001
28	13	MS2/RS2	5 de l'est	B.C.	Automne 2001
29	12	MS2	5 de l'est	B.C.	Automne 2002

^aCodes des végétations potentielles (représentés par ordre décroissant d'importance) : RE2, pessière noire à mousses ou à éricacées; RS2, sapinière à épinette noire; MS2, sapinière à bouleau blanc.

^bCodes des sous-domaines bioclimatiques : 4, sapinière à bouleau blanc; 5, sapinière à bouleau blanc; 6, pessière à mousses.

^cCodes des procédés de récolte : A.E., arbres entiers; B.C., bois courts.

Un total de 365 placettes permanentes, établies dans 22 blocs expérimentaux, ont été sélectionnées pour l'analyse de la régénération (tableau 1). Des sous-placettes ont été mesurées à l'intérieur des placettes permanentes, cinq ans après traitement, en distinguant deux zones distinctes de perturbation : la bande boisée résiduelle (intersentier non affecté par la circulation des porteurs et des débardeurs) et le sentier de débardage. La bande a été échantillonnée en tirant une ligne entre deux poteaux afin de traverser la placette en diagonale. Des sous-placettes circulaires de 1,128 m de rayon (4 m²) ont été positionnées de façon systématique à tous les 2,5 m. Celles dont la périphérie touchait à un sentier de débardage ont été éliminées. En moyenne, sept sous-placettes de régénération étaient mesurées dans la bande. Dans le sentier, l'échantillonnage visait l'établissement de six sous-placettes de forme rectangulaire de 4 m² installées systématiquement de manière à couvrir une portion représentative du sentier c'est-à-dire la zone de compaction affectée par le passage des roues (ou des chenilles) ainsi que la zone entre les traces de roues. Pour ce faire, la largeur de la sous-placette (LARG en m) devait couvrir la moitié de la largeur du sentier. La longueur de la sous-placette (LONG en m) était déterminée de façon à obtenir une superficie de 4 m² (LONG = 4/LARG).

Dans chaque sous-placette, la présence d'individu a été notée par essence et selon cinq classes de dimensions, soit les semis (hauteur ≤ 15 cm), la basse régénération (hauteur à plus de 15 cm et ≤ 60 cm), la haute régénération (hauteur à plus de 60 cm et dhp ≤ 1,0 cm), les gaules et les tiges marchandes. Un dénombrement des semis et de la régénération a été effectué dans une sous-placette sur deux afin d'évaluer la densité. Une évaluation du recouvrement des éricacées, c.-à-d. *Rhododendron groenlandicum* (Oeder) Kron & Judd (anciennement *Ledum groenlandicum* Oeder) et *Kalmia angustifolia*, a été faite à l'intérieur de chaque sous-placette.

Compilations

À partir des données de mesurage immédiatement après CPPTM, la densité et la surface terrière des tiges protégées ont été compilées par placette. Une tige est considérée protégée si elle est vivante immédiatement après traitement et inclinée de moins de 45° par rapport à la verticale. Les arbres sur pied mais auxquels la machinerie avait infligé des blessures suffisamment importantes pour en compromettre la survie étaient déclassés. À partir de l'inventaire de régénération cinq ans après CPPTM, des coefficients de distribution de la régénération (CDR) ont été calculés par placette et par zone (bande et sentier). Le CDR représente la proportion des sous-placettes de 4 m² renfermant au moins une tige du genre ou du groupe d'espèces considéré (toutes classes de dimensions confondues). Seules les tiges vivantes sur pied ont été prises en considération. Un total de 4896 sous-placettes ont été analysées, dont 45 % ont été établies dans le sentier. L'analyse s'est concentrée exclusivement sur les tiges d'origine naturelle, de manière à ne pas considérer les tiges plantées lors du regarnissage de certains sentiers. À partir des sous-placettes de dénombrement, les densités de basse et haute régénérations ont été calculées pour les résineux, les feuillus commerciaux et les espèces non commerciales.

Données supplémentaires

Pour chaque placette, la distance par rapport à la bordure de la forêt non coupée la plus proche a été calculée à l'aide de cartes ou de photos aériennes. À partir de l'altitude, de la

pente (inclinaison et orientation) et des coordonnées géographiques (latitude et longitude), des variables climatiques ont été évaluées avec le logiciel BioSim 9 (Régnière 1996, Régnière et Saint-Amant 2008). Le simulateur utilise un algorithme permettant d'évaluer, pour n'importe quel point géographique, différentes variables sur la base des normales climatiques de 1971 à 2000 mesurées dans les huit stations météorologiques les plus proches. Un ajustement des séries temporelles de températures journalières et de précipitations mensuelles (Régnière et Saint-Amant 2007) est réalisé pour tenir compte de la différence entre les caractéristiques des stations météorologiques choisies et celles des placettes à évaluer. Les valeurs générées proviennent de la moyenne de 30 simulations. Pour les besoins de l'étude, le nombre de degrés-jours de croissance (température de référence de 5°C), le déficit de pression de vapeur (cumul des mois de juin, juillet et août), la précipitation utile (précipitation totale durant les mois de juin, juillet et août) et la précipitation totale annuelle ont été évalués pour chacune des placettes. Le nombre de degrés-jours de croissance (DJC, °C/an) et le déficit de pression de vapeur (DPV, mbar) ont été calculés selon les formules suivantes (Ung *et al.* 2001) :

$$[1] \quad DJC = \sum_{i=1}^{365} \max \left[0, \left(\frac{T_{max_i} + T_{min_i}}{2} \right) - 5 \right]$$

$$[2] \quad DPV = 6,108 \times \sum_{i=152}^{243} \left[10^{\left(\frac{7,5 \times T_{max_i}}{287,5 + T_{max_i}} \right)} - 10^{\left(\frac{7,5 \times T_{min_i}}{287,5 + T_{min_i}} \right)} \right]$$

où T_{max_i} et T_{min_i} sont les températures (°C) maximum et minimum pour le $i^{ème}$ jour de l'année (jours du calendrier julien).

Analyses statistiques

Étant donné que le coefficient de distribution de la régénération est considéré comme une variable plus utile que la densité pour évaluer le succès de régénération (Frisque et Vézina 1977, Greene *et al.* 1999), les densités ont été présentées à l'échelle des blocs uniquement à titre indicatif. Les analyses se concentrent plutôt sur les CDR. Cette variable peut être traitée comme une fonction de probabilité où l'on cherche à discriminer cinq ans après traitement les sous-placettes où il y a présence de régénération (PRÉSENCE = 1), de celles où elle est absente (PRÉSENCE = 0). La prévision de la probabilité de présence pour un site donné représente donc la prévision du CDR. La fonction de lien LOGIT a été utilisée pour permettre la transformation linéaire des deux événements possibles et ainsi prévoir la probabilité de présence pour une sous-placette k dans une placette j située dans un bloc i en fonction de n variables explicatives. La fonction prend la forme suivante :

$$[3] \quad \text{LOGIT}_{\text{présence}} = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_n X_n$$

où les β_n sont les coefficients de régression, et X_n , les variables indépendantes.

Afin d'obtenir la prévision du coefficient de distribution de la régénération dans une sous-placette donnée (CDR_{ijk}), une transformation algébrique est nécessaire :

$$[4] \quad \text{CDR}_{ijk} = \frac{1}{1 + \exp[-\text{LOGIT}_{\text{presence}}]}$$

Les analyses logistiques visant à vérifier l'effet de la végétation potentielle et de la zone (bande vs sentier) ou du genre (*Abies* vs *Picea*) ont été réalisées à l'aide de la procédure GLIMMIX du progiciel SAS (SAS Institute Inc. 2006) pour tenir compte des placettes et des blocs comme variables aléatoires. Ces deux variables sont importantes car les sous-placettes mesurées à l'intérieur d'une placette sont corrélées entre elles, de même que les placettes à l'intérieur d'un même bloc. Les variables indépendantes et l'interaction ont été introduites dans les régressions. Les degrés de liberté ont été calculés avec la méthode de Satterthwaite, laquelle considère l'échelle associée à chacune des variables (SAS Institute Inc. 2006). Des tests de comparaisons multiples ont été effectués en appliquant la correction de Bonferroni, c'est-à-dire en divisant le seuil ($\alpha = 5\%$) par le nombre total de comparaisons.

Une analyse plus approfondie a été conduite afin d'identifier les facteurs déterminants permettant d'expliquer les CDR dans les sentiers de débardage. Deux modèles (résineux et feuillus commerciaux) ont donc été construits. Dans une première étape, la procédure LOGISTIC (SAS Institute Inc. 2006) a été utilisée avec l'option *stepwise* (pas-à-pas) de manière à identifier les variables contribuant le plus à l'explication des probabilités de présence. Les variables indépendantes continues et catégoriques qui ont été testées sont présentées aux tableaux 2 et 3. Elles peuvent être divisées en cinq grandes catégories : les caractéristiques dendrométriques du peuplement immédiatement après traitement, les caractéristiques écologiques des stations, les opérations de récolte, les conditions climatiques et la configuration des coupes. Par la suite, les variables retenues par les régressions pas-à-pas ont été intégrées dans les régressions logistiques mixtes avec la procédure GLIMMIX. Plusieurs essais ont été réalisés de manière à obtenir des modèles simples (en ne retenant que les variables significatives au seuil $\alpha = 5\%$) et en vérifiant si les

interactions entre les variables obtenues étaient significatives. Les variables explicatives retenues ne devaient pas être fortement corrélées entre elles ($|r| < 0,6$). Tel que proposé par Hosmer et Lemeshow (2000), une évaluation de l'ajustement global des modèles a été faite sur la base de l'aire sous la courbe ROC (*receiver operating characteristics*; en français, fonctions d'efficacité du récepteur). Celle-ci est une mesure de la capacité du modèle à discriminer les sous-placettes qui contiennent de la régénération de celles qui n'en ont pas. Elle est évaluée à partir de calculs de la spécificité et de la sensibilité des tests pour différents points de coupure. Les probabilités prévues utilisées pour ces calculs ont été obtenues à partir des prévisions basées uniquement sur les effets fixes (option *nobhup*). Lorsque l'aire sous la courbe ROC se situe entre 0,7 et 0,8, la discrimination est acceptable, alors qu'entre 0,8 et 0,9, elle est excellente (Hosmer et Lemeshow 2000). Les modèles retenus devaient obtenir la valeur la plus élevée.

Résultats

État des dispositifs

Immédiatement après traitement, les densités moyennes des placettes analysées étaient de 2359 tiges résineuses protégées à l'hectare, dont 454 tiges marchandes. Ces dernières avaient généralement une cime bien développée (aux alentours de 50 % de cime vivante) et une hauteur moyenne de 9,9 m. La surface terrière totale résiduelle (résineux et feuillus de 1,1 cm et plus de dhp) s'élevait à 8,4 m²/ha, représentée à 96 % par les essences résineuses (tableau 2). En moyenne, 61 % des gaules présentes avant coupe ont été protégées et 20 % de la superficie a été affectée par la circulation de la machinerie. Le quart des placettes a été traité par arbres entiers (tableau 3).

Cinq ans après CPPTM, les moyennes par bloc montrent que les CDR des résineux dans la bande sont tous supérieurs à 75 % alors qu'ils varient entre 35 % et 100 % dans la zone affectée par le passage de la machinerie (tableau 4). Les genres *Abies* et *Picea* sont présents dans tous les blocs dominés par les végétations potentielles MS2 et RS2. Dans les pes-

Tableau 2. Description, moyenne, écart type (s) et étendue des variables indépendantes continues à l'échelle de la placette évaluées dans les régressions logistiques pas-à-pas des coefficients de distribution de la régénération dans le sentier des résineux et des feuillus.

Variable	Signification et unité	Moyenne ^a	Min.	Max.
NR10	Nombre de tiges marchandes ^b résineuses protégées (tiges/ha)	454 (269)	67	1639
NF10	Nombre de tiges marchandes ^b feuillues protégées (tiges/ha)	18 (56)	0	505
NT10	Nombre total de tiges marchandes ^b protégées (tiges/ha)	471 (279)	67	1639
GRG	Surface terrière des gaules ^c résineuses protégées (m ² /ha)	3,0 (1,8)	0,0	9,9
GTG	Surface terrière (toutes essences) des gaules ^c protégées (m ² /ha)	3,1 (1,9)	0,0	10,8
GR10	Surface terrière des tiges marchandes ^b résineuses protégées (m ² /ha)	5,0 (3,0)	0,8	17,0
GT10	Surface terrière (toutes essences) des tiges marchandes ^b protégées (m ² /ha)	5,3 (3,2)	0,8	17,0
SENTIER	Proportion de la placette affectée par les sentiers de débardage	0,20 (0,07)	0,08	0,54
DJC	Degrés-jours de croissance ^d (°C/an)	1101 (127)	882	1353
DPV	Déficit cumulatif de pression de vapeur durant les mois de juin, juillet et août ^d (mbar)	1227 (118)	1072	1448
P_UTI	Précipitation utile durant les mois de juin, juillet et août ^d (mm)	343 (46)	275	456
P_TOT	Précipitation totale annuelle ^d (mm/an)	1051 (81)	941	1220
DIST_NC	Distance entre la placette et la forêt non coupée la plus proche (m)	123 (84)	7	397

Nota : Max., maximum; Min., minimum.

^aLes moyennes sont suivies des écarts types entre parenthèses.

^bLes tiges marchandes sont celles dont le dhp est $\geq 9,1$ cm.

^cLes gaules sont celles dont le dhp est entre 1,1 et 9,0 cm.

^dVariables climatiques évaluées à partir du logiciel BioSim 9 (Régnière et Saint-Amant 2008) sur la base des normales climatiques de 1971 à 2000.

sières à mousses ou à éricacées (RE2), généralement moins de 20 % des sous-placettes contiennent du sapin baumier. Quant aux feuillus commerciaux, ils sont plus abondants dans les sentiers des végétations potentielles riches (MS2, RS2). Le bouleau à papier est presque la seule essence observée, le peuplier faux-tremble (*Populus tremuloides* Michx.) étant observé en quantité minime. La présence de compétiteurs non commerciaux est très variable en termes de coefficient de distribution (tableau 4) et de représentativité des espèces (tableau 5). Les espèces les plus fréquemment observées sont le saule (*Salix* spp.) et l'amélanchier (*Amelanchier* spp.).

En termes de densité de basse et haute régénérations (tiges de plus de 15 cm de hauteur et de moins de 11 mm de dhp) dans le sentier, les résultats varient beaucoup d'un bloc à l'autre (tableau 5). Elle est inférieure à 2000 tiges résineuses/ha dans deux blocs. Les densités des feuillus commerciaux ainsi que des non commerciaux varient généralement entre 1000 et 8000 tiges/ha. Les végétations potentielles MS2-RS2 sont plus densément régénérées en essences commerciales (résineuses et feuillues), dépassant 10 000 tiges/ha dans neuf

Tableau 3. Description des variables indépendantes catégoriques évaluées dans les régressions logistiques pas-à-pas des coefficients de distribution de la régénération dans le sentier des résineux et des feuillus.

Variable	Signification et catégories	Répartition (%)
Variables indépendantes à l'échelle de la placette ($n_i = 365$)		
FEUILLU	Tige marchande ^a feuillue protégée dans la placette	
	• Présence	21
	• Absence	79
PROCEDE	Procédé de récolte utilisé lors du traitement	
	• Bois courts	75
	• Arbres entiers	25
VEGPOT	Végétation potentielle	
	• Pessière noire à mousses ou à éricacées (RE2)	45
	• Sapinière à épinette noire (RS2)	36
	• Sapinière à bouleau blanc (MS2)	19
Variables indépendantes à l'échelle du bloc ($n_i = 22$)		
SAISON	Saison de récolte	
	• Automne	36
	• Été	59
	• Hiver	5
DOMAINE	Domaine bioclimatique selon Saucier <i>et al.</i> (1998)	
	• Sapinière à bouleau jaune	9
	• Sapinière à bouleau blanc	32
	• Pessière à mousses	59

Nota : n_i , nombre de blocs expérimentaux; n_j , nombre de placettes.

^a Les tiges marchandes sont celles dont le dhp est $\geq 9,1$ cm.

Tableau 4. Coefficients de distribution de la régénération (CDR) observés par bloc, cinq ans après des coupes avec protection des petites tiges marchandes.

Bloc	CDR moyen des résineux (%)			CDR moyen des feuillus dans les sentiers (%)	
	Bande	Sentier	Genres commerciaux présents ^a dans les sentiers	Commerciaux	Non commerciaux
Végétation potentielle dominante : sapinière à bouleau blanc (MS2)					
8	100	96	<i>Betula/Abies/Picea</i>	100	34
10	100	93	<i>Abies/Betula/Picea</i>	84	4
17	99	82	<i>Betula/Abies/Picea</i>	83	44
28	93	35	<i>Betula/Picea/Abies</i>	49	69
29	98	76	<i>Abies/Betula/Picea</i>	52	30
Végétation potentielle dominante : sapinière à épinette noire (RS2)					
2	99	85	<i>Picea/Betula/Abies</i>	68	78
3	98	100	<i>Picea/Betula/Abies</i>	52	14
4	97	75	<i>Picea/Abies/Betula</i>	44	54
9	99	96	<i>Abies/Picea/Betula</i>	46	53
20	99	85	<i>Abies/Betula/Picea</i>	71	1
26	100	86	<i>Betula/Abies/Picea</i>	75	52
27	99	74	<i>Abies/Picea/Betula</i>	36	26
Végétation potentielle dominante : pessière noire à mousses ou à éricacées (RE2)					
1	77	40	<i>Picea</i>	0	8
5	91	68	<i>Picea/Abies</i>	4	4
6	91	69	<i>Picea</i>	0	9
12	92	46	<i>Picea</i>	18	25
14	79	53	<i>Picea</i>	0	12
16	96	82	<i>Picea/Betula</i>	70	66
18	93	60	<i>Picea</i>	6	48
19	91	88	<i>Picea/Betula</i>	56	21
21	81	44	<i>Picea/Betula</i>	35	46
22	94	65	<i>Picea/Betula</i>	55	51

^a Essences commerciales ayant au moins 20 % de coefficient de distribution de la régénération (ordre décroissant d'importance).

Tableau 5. Statistiques par bloc du recouvrement des éricacées et des densités de basse et haute régénérations (tiges de plus de 15 cm de hauteur et de moins de 11 mm de dhp) présentes dans les sentiers, cinq ans après des coupes avec protection des petites tiges marchandes.

Recouvrement en éricacées ^a (%)			Densité dans les sentiers (tiges/ha)			
Bloc	Bande	Sentier	Espèces non-commerciales présentes ^b dans les sentiers	Résineux	Feuillus commerciaux	Feuillus non commerciaux
Végétation potentielle dominante : sapinière à bouleau blanc (MS2)						
8	3	3	PRP/AME/SAL	4283	33 582	6256
10	0	0	SAL/PRP	5784	5429	245
17	0	0	AUR/AME	4 940	4387	5264
28	0	0	ERE/AME/COR	1234	7244	25 256
29	0	0	NEM/SAP	4132	6389	4792
Végétation potentielle dominante : sapinière à épinette noire (RS2)						
2	2	1	SAL/AUC	7049	4792	7153
3	0	0	SAL/AME	17 983	5995	1 016
4	18	15	AME	6834	4182	13 657
9	0	1	AME	10 500	4679	18 313
20	0	0	—	4265	4167	0
26	8	3	SAL/AME/AUR	5294	14 371	7280
27	2	3	SAL	6686	10 064	4551
Végétation potentielle dominante : pessière noire à mousses ou à éricacées (RE2)						
1	45	18	SAL	2512	0	547
5	49	29	SAL/AME	3587	89	402
6	48	25	BEG	6467	0	2549
12	23	16	SAL/AME	1373	1324	4118
14	43	33	SAL/AME	3409	0	1349
16	41	46	NEM/VIC	21 910	9168	29 027
18	21	9	PRP	3929	541	12 522
19	41	24	AME	6453	3781	2661
21	15	13	VIE/AUR	2432	2569	8111
22	11	12	PRP	2176	2433	7980

^aReprésentées par *Rhododendron groenlandicum* et *Kalmia angustifolia*.

^bEspèces ligneuses non commerciales représentant au moins 15 % du dénombrement de ce groupe (ordre décroissant d'importance). Codes d'espèces : AME, *Amelanchier* spp.; AUC, *Alnus crispa*; AUR, *Alnus rugosa*; BEG, *Betula glandulosa*; COR, *Cornus stolonifera*; ERE, *Acer spicatum*; NEM, *Nemopanthus mucronatus*; PRP, *Prunus pensylvanica*; SAL, *Salix* spp.; SAP, *Sambucus pubens*; VIC, *Viburnum cassinoides*; VIE, *Viburnum edule*.

des 12 blocs échantillonnés. Quant aux éricacées, elles sont présentes surtout dans la végétation potentielle RE2 et leur pourcentage de couverture est généralement plus faible dans le sentier par rapport à la bande (tableau 5). Le recouvrement moyen par bloc ne dépasse pas 50 %.

Analyse des coefficients de distribution de la régénération (CDR) en fonction de la végétation potentielle et de la zone

Les analyses logistiques mixtes des CDR des résineux et des feuillus, cinq ans après la CPPTM, ont permis de constater l'effet significatif ($p < 0,0004$) de la végétation potentielle et de la zone (bande vs sentier). Pour toutes les végétations potentielles, les tests de comparaison ont révélé que les CDR des résineux sont significativement plus faibles (16 % à 22 % inférieurs) dans le sentier comparativement à la bande (fig. 1A). La situation est inversée pour les feuillus commerciaux car leurs CDR sont plus élevés dans les corridors affectés par le passage de la machinerie (fig. 1B). Dans la bande, les résineux sont fort bien distribués (CDR entre 93 % et 99 %) et en position dominante dans la majorité des sous-placettes. Dans le sentier, les CDR des résineux s'élèvent entre 70 % et 82 % et

sont plus variables (intervalles de confiance plus larges). La pression exercée par les compétiteurs y est aussi plus forte. Par exemple, dans la végétation potentielle MS2, la moitié des sous-placettes régénérées en résineux dans le sentier sont caractérisées par des individus en position désavantageuse par rapport aux compétiteurs ($< C$). Autant pour les résineux que pour les feuillus, il n'y a pas de différence significative entre les deux végétations potentielles associées aux sapinières (MS2 et RS2) pour une zone donnée. La pessière noire à mousses ou à éricacées (RE2) présente des CDR plus faibles, en particulier dans la bande où elle se distingue significativement des autres stations. Pour les feuillus, les CDR les plus élevés sont observés dans les sentiers des végétations potentielles les plus riches (MS2, 63 %; RS2, 55 %). Dans la bande, les feuillus sont moins bien distribués (CDR < 40 %) et sont souvent dominés par les résineux protégés lors des CPPTM.

Comparaison des coefficients de distribution de la régénération (CDR) des sapins baumiers et des épinettes

Étant donné les valeurs élevées de CDR obtenues dans la bande, seuls les résultats pour le sentier sont présentés. L'ana-

Fig. 1. Prévisions du coefficient de distribution de la régénération (CDR) des résineux (A) et des feuillus (B) en fonction de la zone (bande vs sentier) et de la végétation potentielle (VEGPOT). Modèles logistiques mixtes en prenant en considération les deux variables indépendantes et l'interaction. Les variables explicatives sont toutes significatives ($p < 0,0004$) sauf pour l'interaction du modèle des feuillus commerciaux ($p = 0,20$). Pour chaque graphique, les colonnes identifiées par la même lettre minuscule ne sont pas significativement différentes selon les tests de comparaison corrigés avec la méthode de Bonferroni. Les barres d'erreurs représentent l'intervalle de confiance des prévisions au seuil $\alpha = 5\%$. Les résultats sont ventilés par statut de l'individu le plus haut par rapport à la compétition ligneuse; dominé par la compétition ($< C$), dans la même classe de hauteur que le compétiteur le plus haut ($= C$), dominant par rapport à la compétition ($> C$).

lyse de variance du modèle logistique mixte du CDR dans le sentier en fonction du genre (*Abies* vs *Picea*) et de la végétation potentielle a révélé que ces deux variables indépendantes et l'interaction sont toutes hautement significatives ($p < 0,001$). Les tests de comparaison démontrent que les CDR des deux genres sont significativement différents pour toutes les stations (fig. 2). Le sapin est mieux distribué que les épinettes dans MS2 (67 vs 42 %). Dans RS2, même si la différence n'est que de 9 %, le CDR des épinettes est significativement supérieur à celui des sapins. Notons que la situation est inversée dans la bande (résultats non présentés). Quant à RE2, les épinettes (presque exclusivement *P. mariana*) dominent nettement avec un CDR de 66 % comparativement à moins de 10 % chez le sapin. En général, dans une sous-placette régénérée sur trois, l'arbre le plus haut est un semis (fig. 2, hauteur ≤ 15 cm). Une portion négligeable des sous-placettes contient un résineux dans la classe de gaule.

Fig. 2. Prévisions du coefficient de distribution de la régénération (CDR) dans le sentier en fonction du genre (*Abies* vs *Picea*) et de la végétation potentielle (VEGPOT). Modèle logistique mixte en prenant en considération les deux variables indépendantes et l'interaction (tous hautement significatives, $p < 0,001$). Les colonnes identifiées par la même lettre minuscule ne sont pas significativement différentes selon le test de comparaison corrigé avec la méthode de Bonferroni. Les barres d'erreurs représentent l'intervalle de confiance des prévisions au seuil $\alpha = 5\%$. Les résultats sont ventilés par classes de hauteur (H) de l'individu le plus haut.

Modèles des probabilités de présence de régénération dans le sentier

Parmi les variables testées (tableaux 2 et 3), les régressions des CDR dans le sentier ont permis d'identifier celles ayant le plus d'influence pour les résineux et les feuillus commerciaux. Les deux modèles comportent, entre autres, la végétation potentielle (VEGPOT) et la densité de tiges marchandes résineuses protégées (NR10) qui affectent significativement ($p < 0,01$) la probabilité de présence (tableau 6). Les autres variables associées aux tiges marchandes protégées (NT10, GR10, GT10) peuvent aussi contribuer significativement à expliquer les CDR, mais la variable NR10 permet d'obtenir les aires sous la courbe ROC les plus élevées. Pour les résineux seulement, la précision du modèle est améliorée par l'ajout de la saison de récolte (SAISON, $p = 0,0074$) et de la précipitation totale annuelle (P_TOT, $p = 0,0348$). Dans le cas des feuillus, le CDR est aussi tributaire de la présence d'au moins une tige marchande feuillue dans la placette (FEUILLU, $p = 0,0472$). Cette variable est en interaction avec VEGPOT ($p = 0,0340$). La densité de feuillus marchands protégés (NF10), la surface terrière des gaules protégées (GRG, GTG), la proportion de sentiers (SENTIER), le nombre de degrés-jours de croissance (DJC), le déficit cumulé de pression de vapeur (DPV), la précipitation utile (P_UTI), la proximité d'une forêt non-coupée (DIST_NC), le procédé de récolte (PROCEDE) et le domaine bioclimatique (DOMAINE) n'ont pas d'effet significatif (c.-à-d., $p > 0,05$) sur les CDR des résineux et des feuillus.

Le tableau 6 montre les valeurs estimées des paramètres

Tableau 6. Statistiques sur les effets fixes concernant les variables retenues pour les modèles logistiques mixtes de prévision des coefficients de distribution de la régénération (CDR) dans le sentier des résineux et des feuillus commerciaux, cinq ans après des coupes avec protection des petites tiges marchandes.

Variable modélisée	Variables explicatives	Valeur estimée du paramètre	Erreur type	Probabilité > t
CDR résineux	Ordonnée à l'origine	-3,97	2,49	0,1236
	NR10	0,00086	0,00033	0,0095
	P_TOT	0,00525	0,00235	0,0348
	SAISON			
	Automne	-1,07	0,35	0,0074
	Été ou hiver	0,00	–	–
	VEGPOT			
	RE2	-0,66	0,25	0,0090
	MS2 ou RS2	0,00	–	–
CDR feuillus	Ordonnée à l'origine	-0,55	0,47	0,2522
	NR10	0,00160	0,00043	0,0002
	FEUILLU			
	Présence de feuillus	0,55	0,28	0,0472
	Absence de feuillus	0,00	–	–
	VEGPOT			
	RE2	-2,23	0,47	<0,0001
	MS2 ou RS2	0,00	–	–
	FEUILLU*VEGPOT			
	Présence de feuillus dans RE2	1,20	0,56	0,0340

Nota : NR10, nombre de tiges marchandes résineuses protégées (tiges/ha); P_TOT, précipitation totale annuelle (mm/an); SAISON, saison de récolte; VEGPOT, végétation potentielle; FEUILLU, présence ou absence d'au moins une tige marchande feuillue protégée dans la placette. Des regroupements de classes à l'intérieur des variables VEGPOT et SAISON ont été réalisés pour les catégories qui n'étaient pas significativement différentes.

pour les variables explicatives qui ont été retenues dans les modèles de prévision. Notons que ces valeurs doivent être utilisées pour obtenir la prévision du LOGIT^{présence}, laquelle doit être transformée avec l'éq. [4] afin d'obtenir la probabilité de présence (CDR). Les aires sous la courbe ROC pour les régressions des résineux et des feuillus atteignent respectivement 0,71 et 0,76, ce qui est considéré comme étant une discrimination acceptable par Hosmer et Lemeshow (2000). À partir des équations obtenues, des prévisions sont présentées pour diverses conditions de peuplement et de végétation potentielle (fig. 3 et 4). Seules les portions de courbes incluses à l'intérieur des limites observées dans la base de données sont présentées.

Pour les résineux, la précipitation totale annuelle affecte positivement le CDR. Sous des conditions moyennes, une CPPTM qui en reçoit 1000 mm/an aura un CDR des résineux dans le sentier de 64 % comparativement à 83 % pour 1150 mm/an. Les blocs provenant du sous-domaine de la sapinière à bouleau blanc de l'est de la Côte-Nord (blocs 3, 9, 10 et 20) sont donc mieux régénérés en partie à cause des conditions climatiques plus humides qui prévalent dans cette région. La végétation potentielle de la pessière noire à mousses ou à éricacées (RE2) présente des CDR significativement plus faibles alors que les deux végétations potentielles associées aux sapinières (MS2, RS2) sont non significativement différentes. Le modèle détecte aussi un effet significatif de la saison de récolte sur la régénération résineuse. Ainsi, les sentiers récoltés en automne sont moins bien régénérés d'environ 20 % comparativement à ceux d'été ou d'hiver (fig. 3). Pour une précipita-

tion totale annuelle de 1050 mm/an et à l'intérieur des conditions échantillonnées, le modèle prévoit des CDR inférieurs à 60 % dans la végétation potentielle RE2 lorsque la récolte est effectuée en automne. Enfin, le CDR prévu dans les sentiers est directement proportionnel à la densité de tiges marchandes résineuses protégées. La présence, après CPPTM, de 700 petites tiges marchandes par hectare au lieu de 125 contribue à une hausse de 6 à 12 % du CDR des résineux dans le sentier (fig. 3).

Pour les feuillus commerciaux, la végétation potentielle RE2 se démarque avec des CDR dans le sentier beaucoup plus faibles (fig. 4). La dynamique forestière favorise une plus forte colonisation des sentiers par le bouleau à papier dans les végétations potentielles de la sapinière à bouleau blanc (MS2) et de la sapinière à épinette noire (RS2). Les prévisions des CDR des feuillus pour ces végétations potentielles varient entre 40 % et 90 %. La présence d'au moins un feuillu de dimension marchande dans la placette améliore le CDR. Cet effet est plus grand pour la végétation potentielle RE2; dans des conditions moyennes, les hausses de

CDR pour RE2 et MS2-RS2 sont respectivement de 31 % et 13 %. De plus, la densité de tiges marchandes résineuses protégées affecte positivement les CDR des feuillus. Par exemple, les prévisions de CDR dans MS2-RS2 avec feuillu augmentent de 23 % lorsque l'on passe de 125 à 700 tiges marchandes résineuses protégées à l'hectare (fig. 4).

Discussion

La CPPTM réalisée dans un contexte opérationnel contemporain (récolte entièrement mécanisée) a été peu étudiée. Pour ce traitement, les résultats publiés jusqu'à présent sur la régénération se limitent généralement à des études descriptives des densités (Groot 2002, Deans *et al.* 2003, Fenton *et al.* 2008). Ils ont observé des hausses de densité d'épinettes noires suite à l'ouverture partielle du couvert dans des pessières noires. Bescond *et al.* (2011) ont aussi étudié l'abondance relative des espèces de sous-bois après CPPTM dans deux blocs de recherche. La présente étude contribue à une meilleure compréhension des facteurs qui affectent la distribution de la régénération dans une coupe partielle où une portion élevée de la surface terrière est prélevée.

Effet de la zone (bande vs sentier) et de la végétation potentielle

Dans les CPPTM, on prévoit récolter le prochain peuplement à l'intérieur d'une révolution raccourcie (MRNFP 2003). À ce moment, la circulation de la machinerie se fera au centre des bandes actuelles où l'on devrait retrouver des tiges à récolter (dhp > 15,0 cm), appuyées de cohortes plus jeunes. Il importe aussi qu'il se développe de nouveaux semis dans la bande

Fig. 3. Effet du nombre de tiges marchandes résineuses protégées (NR10), de la végétation potentielle (VEGPOT, RE2 vs MS2-RS2) et de la saison de récolte (SAISON, automne vs été-hiver) sur les coefficients de distribution des résineux dans le sentier. Prévisions obtenues, à partir du modèle présenté au tableau 6, pour un site où la précipitation totale annuelle (P_TOT) est de 1050 mm/an.

Fig. 4. Effet du nombre de tiges marchandes résineuses protégées (NR10), de la végétation potentielle (VEGPOT, RE2 vs MS2-RS2) et de la présence de feuillu marchand protégé (FEUILLU) sur les coefficients de distribution des feuillus commerciaux dans le sentier. Prévisions obtenues, à partir du modèle présenté au tableau 6.

pour être capable de perpétuer une structure qui soit irrégulière (Groot 2002). À l'intérieur des sentiers actuels, des gaules et des petites tiges marchandes se développeront, créant un continuum dans le couvert forestier. Étant donné que les sentiers représentent 15 % à 30 % de la superficie après CPPTM, il importe que des tiges d'essences désirées s'y développent en quantité suffisante pour assurer un plein boisement. Celles-ci constitueront probablement une part importante des tiges protégées lors de la récolte subséquente.

Peu d'études ont comparé l'abondance de la régénération dans les bandes protégées et dans les sentiers de débardage. Ces deux zones sont pourtant fort différentes. De plus, le sentier peut faire l'objet d'interventions ciblées, comme le regarni

ou le scarifiage. À l'instar de Harvey et Brais (2002) qui ont étudié des CPRS, la régénération résineuse cinq ans après CPPTM est mieux distribuée dans la bande comparativement au sentier (fig. 1A). Le taux de destruction plus élevé de la régénération préétablie, dû au passage de la machinerie, est probablement la cause principale de ce constat. Harvey et Brais (2002) ont d'ailleurs évalué que la zone entre les traces de roues était affectée par une baisse de la densité de régénération résineuse d'au moins 89 % après traitement. Toutefois, étant donné que les CDR des résineux dans le sentier ne sont que 16 % à 22 % inférieurs à ceux de la bande, on peut présumer que la perturbation produite par la circulation de la machinerie favorise le recrutement de nouveaux semis grâce à la création de milieux de germination favorables. Ainsi, Solarik *et al.* (2010) ont observé une densité en épinettes blanches post-établies six fois plus élevée dans le sentier par rapport au centre de la bande. Ils considèrent que les sentiers constituent une perturbation passive du sol qui est une méthode efficace pour perpétuer cette essence. Toutefois, les perturbations engendrées dans le sentier favorisent aussi un envahissement par des espèces pionnières comme le bouleau à papier (fig. 1B) et des arbustes non commerciaux (tableau 5), créant une pression de compétition sur les résineux de certaines stations. Ces observations concordent avec celles de Raymond *et al.* (2000) qui indiquent que l'exposition du minéral jumelée à une ouverture du couvert permet une meilleure colonisation des microsites par le sapin baumier, l'épinette blanche et le bouleau à papier.

Enfin, le recouvrement des éricacées cinq ans après traitement est généralement plus élevé dans le sentier comparativement à la bande (tableau 5). Toutefois, les travaux de Harvey et Brais (2002) suggèrent que cette différence s'amenuisera avec le temps. Suite à des CPPTM, Fenton *et al.* (2008) ont d'ailleurs observé un envahissement du *Kalmia* alors que Hébert *et al.* (2010a) ont démontré que la réponse physiologique à court terme du *Rhododendron* est meilleure que celle des marcottes d'épinettes noires.

Pour les résineux, la cible généralement suggérée pour l'atteinte d'un coefficient de distribution adéquat après coupe (sur la base de sous-placettes de 4 m²) est de 60 % (Harvey et Bergeron 1989, Ruel 1989). Selon ce critère, les bandes sont très bien régénérées en résineux dans tous les blocs (CDR > 75 %). De plus, les résineux dominent généralement les compétiteurs feuillus. Dans le sentier, les CDR des résineux sont en moyenne entre 70 % et 82 % (fig. 1A). Pour des stations semblables à celles étudiées, ces résultats se comparent avantageusement à d'autres obtenus sur l'ensemble de parterres de coupe totale ou de CPRS (Harvey et Bergeron 1989, Ruel 1992, Pothier 1996, Dubois *et al.* 2006, Lafleur *et al.* 2010). Par contre, cinq des 22 blocs étudiés obtiennent des CDR insatisfaisants (tableau 4). La plupart des cas probléma-

tiques sont observés dans la végétation potentielle de la pessière noire à mousses ou à éricacées (RE2). Dans les sentiers des autres végétations potentielles (MS2 et RS2), les résineux sont bien distribués sauf pour un bloc où l'érable à épis (*Acer spicatum* Lamb.) s'est vigoureusement installé (tableau 5). En général, les feuillus commerciaux y sont plus fréquemment observés (fig. 1B, CDR 55–63 %). Ainsi, les espèces pionnières comme le bouleau à papier ont profité de la perturbation dans le sentier pour envahir cette portion des parterres après CPPTM.

Comparaison dans le sentier des CDR *Abies* vs *Picea*

La composition de la nouvelle cohorte après traitement suscite aussi des questionnements notamment au sujet de l'envahissement de certaines essences moins recherchées en forêt boréale. C'est le cas du bouleau à papier et du sapin baumier. À l'échelle du peuplement, Cimon-Morin *et al.* (2010) ont observé que la proportion de sapin dans la régénération après CPPTM était plus élevée que celle qui était initialement présente dans le couvert. Par contre, la proportion de sapin dans la régénération de moins de 5 cm de hauteur était inférieure à celle présente dans les peuplements non traités, tout en demeurant supérieure à celle présente dans le couvert initial. Dans la présente étude, la composition en essences dans la régénération des sentiers de CPPTM se rapproche de celle mesurée dans le couvert arborescent avant traitement. Ainsi les proportions de la surface terrière marchande résineuse avant coupe représentées par le genre *Picea* étaient de respectivement 41 %, 58 % et 94 % pour MS2, RS2 et RE2. Si l'on compare avec la fig. 2, il semble que la perturbation des sentiers ait favorisé la présence de régénération dans des proportions équivalentes à celles initialement présentes. Ainsi la végétation de la sapinière à bouleau blanc (MS2) est caractérisée par une bonne distribution (CDR > 60 %) de *Betula* (fig. 1B) et d'*Abies* (fig. 2) tout en permettant l'installation de *Picea* (CDR = 42 %). Dans la sapinière à épinette noire (RS2) c'est plutôt *Picea* qui est le mieux distribué (CDR = 59 %), suivi de près par *Betula* et *Abies*. Pour ce qui est de la pessière noire à mousses ou à éricacées (RE2), l'épinette noire domine nettement, cette station n'étant pas propice au sapin baumier.

Modélisation des CDR dans le sentier

Malgré que les CDR soient difficiles à prédire dû aux nombreux facteurs en cause (Ruel 1992), il a été possible d'établir des modèles avec une précision acceptable à partir de variables explicatives disponibles pour les praticiens. La modélisation des coefficients de distribution résineux et feuillus dans le sentier a permis de constater l'influence déterminante de la végétation potentielle et des caractéristiques dendrométriques du peuplement immédiatement après traitement. De plus, la saison de récolte et la précipitation totale annuelle affectent significativement les CDR des résineux. Les modèles logistiques mixtes développés (tableau 6) peuvent être utilisés pour prédire l'état des sentiers cinq ans après CPPTM pour des conditions similaires à celles échantillonnées, c'est-à-dire des sapinières ou des pessières sur des stations mésiques à texture moyenne à grossière.

Effet de la végétation potentielle

Les caractéristiques écologiques des stations sont souvent mentionnées comme des variables importantes pour étudier le succès de régénération après perturbation (Harvey et Ber-

geron 1989, Ruel 1992, Harvey et Brais 2002, Dubois *et al.* 2006, Lafleur *et al.* 2010). Dans les CPPTM étudiées, la végétation potentielle est déterminante pour expliquer les CDR des résineux et des feuillus. Cette unité de classification, conçue pour caractériser la dynamique de la végétation (Saucier 2004), peut être divisée en deux groupes distincts. Les stations associées aux sapinières (MS2, RS2) se démarquent avec des CDR plus élevés que dans la pessière noire à mousses ou à éricacées (RE2). Cette dernière station se caractérise par une régénération dominée par l'épinette noire où la faible fertilité (rapport C/N trop élevé) limite le développement des autres essences (Brumelis et Carleton 1988). L'agressivité du sapin à s'établir sous couvert (Burns et Honkala 1990, Pothier 1996) ajoutée à la capacité des épinettes à s'établir sur les sols perturbés pourrait expliquer en partie le succès de régénération dans MS2-RS2. Notons toutefois que Dubois *et al.* (2006) avaient observé des CDR plus faibles sur les stations MS2 après coupe. Il importe de souligner que la CPPTM est appliquée pour des forêts qui, au départ, sont bien régénérées en hautes régénérations préétablies et en gaules et où des trouées ont permis l'installation de semis qui ont pu être protégés lors du traitement (entre les traces de roues). Aussi, l'érable à épis, qui est souvent associé aux végétations potentielles riches comme MS2, est présent dans un seul bloc. Sa présence semble avoir affecté négativement l'établissement d'essences commerciales dans les sentiers. La situation devrait être suivie de près dans les CPPTM où ce compétiteur est susceptible d'envahir les parterres après traitement.

Notons que l'échantillonnage des placettes permanentes ne permettait malheureusement pas d'étudier l'impact du drainage et de la texture. On peut toutefois présumer sur la base des résultats d'autres études (Ruel 1992, Harvey et Brais 2002, Lafleur *et al.* 2010) que les pessières noires sur les sites organiques, mal drainés ou de texture fine pourraient être mieux régénérées en résineux et présenter un recouvrement plus faible en éricacées. Ces sites pourraient toutefois nécessiter une récolte durant l'hiver afin d'éviter les perturbations trop sévères.

Effet des caractéristiques du peuplement

Le modèle prévoit qu'une amélioration significative des CDR des résineux est obtenue dans le sentier lorsqu'une quantité appréciable de petites tiges marchandes sont protégées lors des CPPTM (fig. 3). Les petites tiges marchandes résineuses pourraient donc jouer un rôle après traitement en contribuant à ensemençer les sentiers. Ainsi le sapin baumier, l'épinette noire et l'épinette blanche peuvent produire des semences en abondance à partir de l'âge de 20 à 30 ans (Burns et Honkala 1990). Pour des arbres de l'étage principal, la production de cônes a été observée sur des sapins baumiers et des épinettes noires entre 10 et 15 cm de dhp (Messoud *et al.* 2007). Greene *et al.* (2002) ont d'ailleurs observé, sous un couvert de peupliers, que les hauteurs minimales de production pour le sapin baumier et l'épinette blanche sont respectivement de 10 m et 14 m. De plus il apparaît que les épinettes noires présentes dans l'étage intermédiaire peuvent produire une quantité appréciable de cônes (Payandeh et Haavisto 1982). Par conséquent, il est probable que plusieurs petites tiges marchandes protégées avaient la capacité de produire des semences au moment du traitement. D'un autre point de vue, l'ombrage qu'elles procurent pourrait favoriser la colonisation et la survie de nouveaux semis, en les protégeant de la séche-

resse excessive et des extrêmes de température (Calogeropoulos *et al.* 2004).

Notons que le nombre de tiges marchandes protégées dépend de deux principaux facteurs. Premièrement, la densité avant traitement des tiges marchandes inférieures au diamètre limite affectera nécessairement la densité retrouvée après CPPTM. Ensuite, la qualité des opérations de récolte influencera l'effectif qui sera préservé. À ce propos, le procédé de récolte joue un rôle important car les taux de protection des petites tiges marchandes sont généralement 10 % à 20 % plus élevés dans le procédé par bois courts comparativement à celui par arbres entiers (Riopel *et al.* 2000).

La colonisation des sentiers par les feuillus semble aussi être favorisée par la présence de petites tiges marchandes résineuses. Ceci est une indication que, tout comme pour les résineux, l'ombrage du couvert formé par les tiges résiduelles stimule la germination et la survie des bouleaux à papier (Perala et Alm 1990). Cet avantage semble être présent même sous des densités moyennement élevées de petites tiges marchandes puisque l'effet est directement proportionnel à la densité de tiges marchandes résineuses protégées (fig. 4). Frisque et Vézina (1977) ont d'ailleurs observé que la coupe par bande ne freine pas l'envahissement des feuillus de lumière, l'intensité lumineuse atteignant le sol étant suffisante pour l'établissement du bouleau à papier. En effet, même si cette essence est intolérante à l'ombre, les semis peuvent tolérer une faible luminosité (Perala et Alm 1990).

Une autre variable s'est ajoutée au modèle des feuillus : la présence d'au moins une tige marchande feuillue protégée dans la placette. Ruel (1992) avait aussi détecté une corrélation entre le CDR des feuillus et la présence de semenciers feuillus. La plupart des bouleaux étaient en mesure de produire des semences au moment du traitement. De plus, il est reconnu que les arbres stressés sont stimulés à produire des semences (Waring et Schlesinger 1985). Notons que la présence du bouleau à papier dans le sentier pourrait être bénéfique sur les stations plus pauvres (RE2) dans la mesure où elle peut améliorer la composition de l'humus (Frisque et Vézina 1977), réduire la compaction des sentiers (Perala et Alm 1990) et atténuer l'envahissement des éricacées par la fermeture rapide du couvert. Dans les pessières noires, le bouleau est un compétiteur de faible longévité dont le CDR diminue avec le temps (Pothier 1996). L'ombrage qu'il procure à l'épinette noire pourrait donc ne pas être si nuisible à son développement. Par contre, pour les végétations potentielles plus riches (MS2, RS2), la présence des feuillus risque de causer des changements de composition du futur peuplement (Brumelis et Carleton 1988, Harvey et Bergeron 1989, Dubois *et al.* 2006).

Effet de la saison de récolte

Les analyses ont démontré l'influence déterminante de la saison de récolte sur les CDR des résineux. Au niveau de la protection de la régénération préétablie, les opérations réalisées en hiver sont considérées avantageuses car le couvert nival permet de sauvegarder une portion plus grande des petits semis en diminuant la perturbation du sol (Harvey et Bergeron 1989, Groot 1995). De plus, les coupes d'hiver atténuent les changements de composition en espèces grâce à une perturbation moindre du sol (Bescond *et al.* 2011). Dans la présente étude, un seul bloc a été récolté durant cette période, limitant considérablement la capacité de détecter des diffé-

rences significatives avec la saison estivale. On peut présumer qu'il en aurait été autrement si un échantillonnage plus grand avait été fait dans les CPPTM d'hiver. Il apparaît toutefois que la saison d'automne se démarque par des prévisions de CDR résineux plus faibles (fig. 3). Des recherches plus pointues devraient être menées afin d'expliquer la cause de l'impact négatif de l'automne mais des hypothèses peuvent être émises.

Une des hypothèses à vérifier est que, comparativement aux coupes d'étés, les CPPTM d'automne créent un délai d'un an supplémentaire pour obtenir une production semencière accrue des tiges résiduelles. Il est reconnu que les arbres de l'étage dominant produisent plus de semences que les tiges des étages inférieurs (Payandeh et Haavisto 1982, Owens et Blake 1986, Greene *et al.* 2002). Or, avant coupe, les petites tiges marchandes sont en position hiérarchique inférieure dans le couvert. Après CPPTM, leur capacité devrait s'accroître puisqu'une large part des tiges protégées passe de l'étage intermédiaire à celui des dominants. Pour les arbres du genre *Abies* et *Picea*, le cycle de reproduction s'écoule sur une période de 2 ans (Owens et Blake 1986). Une étape critique est l'initiation florale qui se produit au cours de l'été par la différenciation des bourgeons (statut végétatif versus reproductif). Or, un apport de lumière de qualité, le stress hydrique et les blessures causées par les opérations stimuleront le passage des méristèmes à l'état sexué (Owens et Blake 1986, Philippe *et al.* 2006). Une production accrue de cônes se produira un an plus tard et les semences produites tomberont à l'automne pour germer au printemps suivant. Par conséquent, les tiges résiduelles dans les CPPTM réalisées avant ou pendant la période de différenciation (été) pourraient être en mesure de réagir à l'ouverture soudaine du couvert dès l'année suivante. Par contre, pour les tiges résiduelles éclaircies après la période estivale (p. ex., automne), cette production accrue pourrait être retardée à la fin de la saison de croissance de la deuxième année après CPPTM. Cet effet négatif sur la reproduction sexuée devrait aussi se faire sentir dans les coupes d'hiver. Il est toutefois largement compensé par une meilleure protection de la basse régénération préétablie (Groot 1995). Notons que Martin-DeMoor *et al.* (2010) ont détecté que des coupes avec réserve de semenciers réalisées en été avaient permis une meilleure installation de recrues d'épinette blanche. Ils ont plutôt émis l'hypothèse que la récolte estivale crée des lits de germination davantage perturbés, plus propices à l'établissement de nouveaux semis.

Une autre hypothèse à vérifier serait au niveau du taux de survie de la régénération préétablie. Le sol étant souvent plus humide à l'automne, l'impact des opérations de récolte sur le sol et la régénération pourrait être plus important (sentiers plus larges et plus perturbés). De plus, les bouleversements produits dans les sentiers dans une période où les tiges entrent dans la période de dormance créent peut-être des taux de mortalité plus élevés au printemps suivant. Par conséquent, la régénération protégée dans les CPPTM d'été pourrait être davantage en mesure de s'adapter aux changements brusques des conditions microclimatiques.

Effet de la précipitation

La couverture provinciale de l'étude a permis de détecter un lien entre le succès de régénération des résineux et la précipitation totale annuelle (évaluée sur la moyenne des 30 dernières années). L'effet positif de cette variable sur le CDR dans le sentier peut s'expliquer par de meilleures conditions pour la

germination et la survie d'*Abies* et de *Picea* dans les blocs où la précipitation est plus abondante. Sous des conditions très différentes de celles du Québec, Hogg et Schwarz (1997) en Alberta ont d'ailleurs observé que les forêts affectées par un climat sec semblent subir une diminution dans la capacité des résineux à se régénérer. Il est aussi possible que le climat régional affecte la présence de régénération préétablie dans les peuplements mûrs (Ruel 1989). Ainsi, Boucher *et al.* (2003) ont observé que les forêts du sous-domaine de la pessière de l'est, dont le climat est plus humide, ont une structure plus irrégulière que celles du sous-domaine de l'ouest. Ces conditions favorisent l'établissement du sapin considéré comme très agressif sous couvert à cause de sa grande tolérance à l'ombre (Burns et Honkala 1990). Des efforts de recherche supplémentaires devraient être alloués afin d'intégrer des variables climatiques dans l'explication des coefficients de distribution de la régénération car il semble que leur pouvoir explicatif soit encore trop peu exploité.

Implications pour l'aménagement

Cinq ans après traitement, les tiges résineuses présentes dans les bandes protégées du passage de la machinerie sont fort bien distribuées (CDR moyens entre 93 % et 99 %) et en position dominante par rapport à la compétition feuillue (fig. 1A). Si elles se développent bien, aucune intervention ne sera nécessaire dans cette portion des parterres de CPPTM. Même si la densité est élevée, l'hétérogénéité verticale du peuplement devrait faire en sorte qu'un nombre suffisant de tiges resteront libres de croître tout au long de la révolution.

Les résultats sont plus variables dans les sentiers de débarquement. Les CDR des résineux étant plus faibles dans ces zones, on devrait chercher à minimiser la superficie affectée par la circulation de la machinerie. Dû à l'effet positif de la présence des petites tiges marchandes résineuses sur les CDR, il semble d'intérêt d'en protéger le plus grand nombre possible. La sélection de peuplements présentant un nombre adéquat de petites tiges marchandes avant traitement et un bon suivi des opérations de récolte favoriseront l'atteinte de cet objectif.

Pour assurer un plein boisement, il serait avantageux de prévoir un regarni des sentiers de débarquement lorsque les CDR des résineux sont insuffisants (c.-à-d., < 50–60 %). Cette situation devrait survenir plus fréquemment dans les coupes d'automne réalisées sur les stations où la végétation potentielle est la pessière noire à mousses ou à éricacées (RE2). De plus, la présence des éricacées sur ces stations (tableau 4, RE2) devrait inciter à la prudence car elle pourrait limiter le développement de la régénération résineuse (Thiffault et Jobidon 2006, Hébert *et al.* 2010b). La plupart des sous-placettes régénérées dans le sentier étant caractérisées par la présence d'épinettes noires d'au plus 60 cm de hauteur (fig. 2) et par un recouvrement en éricacées souvent supérieur à 15 % (tableau 5), des effets négatifs sur la fermeture du couvert sont à prévoir. Le suivi à plus long terme des placettes permanentes permettra de vérifier si l'envahissement des éricacées est suffisamment sévère pour devoir recourir à d'autres interventions sylvicoles plus intensives comme le scarifiage (Thiffault et Jobidon 2006). Tel que soulevé par Hébert *et al.* (2010a), l'utilisation des coupes partielles pourrait même être remise en question sur ces stations si la régénération résineuse n'arrive pas à se soustraire rapidement de l'emprise des éricacées.

Sur les stations plus riches, c'est-à-dire les végétations

potentielles associées aux sapinières (MS2, RS2), la distribution de la régénération dans les sentiers est généralement adéquate mais la compétition feuillue pourrait causer des pertes de croissance des tiges résineuses et éventuellement diminuer leur taux de survie. Un débroussaillage des sentiers de CPPTM pourrait donc être bénéfique dans certains cas. Puisque ces stations présentent un mélange d'essences commerciales (sapin baumier, bouleau à papier, épinette noire, épinette blanche) assez bien distribuées (tableau 4) et nombreuses (densité totale généralement plus de 10 000 tiges/ha, tableau 5), cette intervention permettrait de favoriser celles qui sont économiquement les plus avantageuses (p. ex., *Picea* au détriment de *Betula* et *Abies*) ou celles représentant le mieux la composition du peuplement avant la coupe.

Remerciements

L'étude de la coupe avec protection des petites tiges marchandes répond à une demande du milieu forestier et a été développée en collaboration avec les intervenants en région. Ce projet n'aurait pu prendre cette ampleur sans l'implication des gens du ministère des Ressources naturelles et de la Faune du Québec, des industriels ainsi que des entrepreneurs et opérateurs de machinerie. Nous tenons à exprimer nos remerciements au Fonds québécois de recherche sur la nature et les technologies ainsi qu'à la chaire de recherche industrielle Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada – Université Laval en sylviculture et faune pour leur contribution financière. Les travaux de terrain ont été financés principalement par les programmes de mise en valeur des ressources du milieu forestier (volet 1 de la Côte-Nord, du Lac-Saint-Jean, de la Gaspésie, de l'Abitibi et de la Mauricie), avec l'apport des partenaires universitaire (Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue) et industriels AbitibiBowater (régions 02, 04 et 09), Almassa Industries (région 09), Boisaco (région 09), Groupe GDS (région 11), Kruger (régions 04 et 09) et Tembec (région 08). Les auteurs remercient Gaétan Daigle, pour son apport statistique, ainsi que les nombreuses personnes ayant participé aux travaux et à la mise à jour de la base de données (entre autres, Sylvain Miron). L'estimation des variables climatiques a été effectuée à l'aide du logiciel BioSim mis au point par le Service canadien des forêts. Nous remercions aussi Chhun-Huor Ung et deux examinateurs anonymes pour leurs commentaires judicieux sur le manuscrit.

Références

- Bergeron, Y., B. Harvey, A. Leduc et S. Gauthier. 1999. Stratégies d'aménagement forestier qui s'inspirent de la dynamique des perturbations naturelles : considérations à l'échelle du peuplement et de la forêt. *For. Chron.* 75(1): 55–61.
- Bescond, H., N.J. Fenton et Y. Bergeron. 2011. Partial harvests in the boreal forest: Response of the understory vegetation five years after harvest. *For. Chron.* 87(1): 86–98.
- Boucher, D., L. De Grandpré et S. Gauthier. 2003. Développement d'un outil de classification de la structure des peuplements et comparaison de deux territoires de la pessière à mousses du Québec. *For. Chron.* 79(2): 318–328.
- Brais, S. et C. Camiré. 1998. Soil compaction induced by careful logging in the claybelt region of northwestern Quebec (Canada). *Can. J. Soil Sci.* 78(1): 197–206.
- Brumelis, G. et T.J. Carleton. 1988. The vegetation of postlogged black spruce lowlands in central Canada. I. Trees and tall shrubs. *Rev. can. rech. for.* 18(12): 1470–1478.

- Burns, R.M. et B.H. Honkala. 1990. Silvics of North America. Vol. 1. Conifers. U.S. Dep. Agric. Agric. Handb. 654.
- Calogeropoulos, C., D.F. Greene, C. Messier et S. Brais. 2004. The effects of harvest intensity and seedbed type on germination and cumulative survivorship of white spruce and balsam fir in north-western Quebec. *Rev. can. rech. for.* 34(7): 1467–1476.
- Cimon-Morin, J., J.-C. Ruel et M. Darveau. 2010. Short term effects of alternative silviculture treatments on stand attributes in irregular balsam fir – black spruce stands. *For. Ecol. Manage.* 260(5): 907–914.
- Deans, A.M., J.R. Malcom, S.M. Smith et T.J. Carleton. 2003. A comparison of forest structure among old-growth, variable retention harvested, and clearcut peatland black spruce (*Picea mariana*) forests in boreal northeastern Ontario. *For. Chron.* 79(3): 579–589.
- Dubois, J., J.-C. Ruel, J.-G. Élie et L. Archambault. 2006. Dynamique et estimation du rendement des strates de retour après coupe totale dans la sapinière à bouleau jaune. *For. Chron.* 82(5): 675–689.
- Fenton, N., H. Bescond, L. Imbeau, C. Boudreault, P. Drapeau et Y. Bergeron. 2008. Évaluation sylvicole et écologique de la coupe partielle dans la forêt boréale de la ceinture d'argile. Dans *Aménagement écosystémique en forêt boréale. Sous la direction de S. Gauthier, M.-A. Vaillancourt, A. Leduc, L. De Grandpré, D. Kneeshaw, H. Morin, P. Drapeau et Y. Bergeron.* pp. 393–415. Presses de l'Université du Québec, Québec, QC.
- Frisque, G. et P.E. Vézina. 1977. Reproduction de l'épinette noire (*Picea mariana*) après coupe à blanc de superficie réduite. *Rev. can. rech. for.* 7(4): 648–655.
- Greene, D.F., C. Messier, H. Asselin et M.-J. Fortin. 2002. The effect of light availability and basal area on cone production in *Abies balsamea* and *Picea glauca*. *Can. J. Bot.* 80(4): 370–377.
- Greene, D.F., J.C. Zasada, L. Sirois, D. Kneeshaw, H. Morin, I. Charron et M.-J. Simard. 1999. A review of the regeneration dynamics of North American boreal forest tree species. *Rev. can. rech. for.* 29(6): 824–839.
- Groot, A. 1995. Harvesting method affects survival of black spruce advance growth. *North. J. Appl. For.* 12(1): 8–11.
- Groot, A. 2002. Is uneven-aged silviculture applicable to peatland black spruce (*Picea mariana*) in Ontario, Canada? *Forestry* 75(4): 437–442.
- Groot, A., J.-M. Lussier, A.K. Mitchell et D.A. MacIsaac. 2005. A silvicultural systems perspective on changing Canadian forestry practices. *For. Chron.* 81(1): 50–55.
- Harvey, B.D. et Y. Bergeron. 1989. Site patterns of natural regeneration following clear-cutting in northwestern Quebec. *Rev. can. rech. for.* 19(11): 1458–1469.
- Harvey, B. et S. Brais. 2002. Effects of mechanized careful logging on natural regeneration and vegetation competition in the south-eastern Canadian boreal forest. *Rev. can. rech. for.* 32(4): 653–666.
- Hébert, F., N. Thiffault, J.-C. Ruel et A.D. Munson. 2010a. Comparative physiological responses of *Rhododendron groenlandicum* and regenerating *Picea mariana* following partial canopy removal in northeastern Quebec, Canada. *Rev. can. rech. for.* 40(9): 1791–1802.
- Hébert, F., N. Thiffault, J.-C. Ruel et A.D. Munson. 2010b. Ericaceous shrubs affect black spruce physiology independently from inherent site fertility. *For. Ecol. Manage.* 260(2): 219–228.
- Hogg, E.H. et A.G. Schwarz. 1997. Regeneration of planted conifers across climatic moisture gradients on the Canadian prairies: implications for distribution and climatic change. *J. Biogeogr.* 24(4): 527–534.
- Hosmer, D.W. et S. Lemeshow. 2000. Applied logistic regression. 2^e éd. Wiley, Inc., New York.
- Lafleur, B., D. Paré, N.J. Fenton et Y. Bergeron. 2010. Do harvest methods and soil type impact the regeneration and growth of black spruce stands in northwestern Quebec? *Rev. can. rech. for.* 40(9): 1843–1851.
- Martin-DeMoor, J., V.J. Lieffers et S.E. Macdonald. 2010. Natural regeneration of white spruce in aspen-dominated boreal mixed-woods following harvesting. *Rev. can. rech. for.* 40(3): 585–594.
- Messaoud, Y., Y. Bergeron et H. Asselin. 2007. Reproductive potential of balsam fir (*Abies balsamea*), white spruce (*Picea glauca*), and black spruce (*P. mariana*) at the ecotone between mixedwood and coniferous forests in the boreal zone of western Quebec. *Am. J. Bot.* 94(5): 746–754.
- [MRNFP] Ministère des Ressources naturelles de la Faune et des Parcs. 2003. Manuel d'aménagement forestier. 4^e éd. Direction des programmes forestiers, ministère des Ressources naturelles, de la Faune et des Parcs, Gouvernement du Québec, Québec, Qué. Disponible auprès de la Direction de la planification et des communications, Québec, QC., au www.mrnf.gouv.qc.ca/publications/forets/amenagement/manuel.pdf [cité le 2 novembre 2009].
- Morneau, C. et Y. Landry. 2007. Guide de reconnaissance des types écologiques. Région écologique 6h — Collines du lac Péribonka. Région écologique 6i — Hautes collines du réservoir aux Outardes [en ligne]. Direction des inventaires forestiers, Forêt Québec, ministère des Ressources naturelles et de la Faune, Québec, QC. code de diffusion n° 2007-3008. Disponible auprès de la Division de l'analyse et de la diffusion des informations forestières et écologiques, Québec, QC., au www.mrnf.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/guide-ecologie-6hi.pdf. [cité le 13 mars 2009].
- Owens, J.N. et M.D. Blake. 1986. Production de semences forestières: revue bibliographique et suggestions de recherche. Institut forestier national de Petawawa. Service canadien des Forêts, Chalk River, Ont. Rapport d'information PI-X-53F.
- Payendeh, B. et V.F. Haavisto. 1982. Prediction equations for black spruce seed production and dispersal in northern Ontario. *For. Chron.* 58(2): 96–99.
- Perala, D.A. et A.A. Alm. 1990. Reproductive ecology of birch: A review. *For. Ecol. Manage.* 32(1): 1–38.
- Philippe, G., P. Baldet, B. Héois et C. Ginisty. 2006. Reproduction sexuée des conifères et production de semences en vergers à graines. Cemagref, Collection Synthèses, Paris, France.
- Pothier, D. 1996. Évolution de la régénération après la coupe de peuplements récoltés selon différents procédés d'exploitation. *For. Chron.* 72(5): 519–527.
- Raymond, P., J.-C. Ruel et M. Pineau. 2000. Effet d'une coupe d'ensemencement et du milieu de germination sur la régénération des sapinières boréales riches de seconde venue du Québec. *For. Chron.* 76(4): 643–652.
- Riopel, M., J. Bégin et J.-F. Gingras. 2000. Une option pour la récolte en forêt boréale: la coupe avec protection des petites tiges marchandes. *Avantage* 1(17).
- Riopel, M., J. Bégin et J.-C. Ruel. 2010. Probabilités de pertes des tiges individuelles, cinq ans après des coupes avec protection des petites tiges marchandes, dans des forêts résineuses du Québec. *Rev. can. rech. for.* 40(7): 1458–1472.
- Régnière, J. 1996. Generalized approach to landscape-wide seasonal forecasting with temperature-driven simulation models. *Environ. Entomol.* 25(5): 869–881.
- Régnière, J. et R. Saint-Amant. 2007. Stochastic simulation of daily air temperature and precipitation from monthly normals in North America north of Mexico. *Int. J. Biometeorol.* 51(5): 415–430.
- Régnière, J. et R. Saint-Amant. 2008. BioSIM 9 – Manuel de l'utilisateur. Rapport d'information LAU-X-134F. Ressources naturelles Canada, Service canadien des forêts. Centre de foresterie des Laurentides, Québec, Qué. Disponible auprès de la Librairie du Service canadien des forêts au www.librairie.scf.rncan.gc.ca [cité le 2 novembre 2009].
- Roy, V., R. Jobidon et L. Blais. 2001. Étude des facteurs associés au dépérissement du bouleau à papier en peuplement résiduel après coupe. *For. Chron.* 77(3): 509–517.
- Ruel, J.-C. 1989. Importance de la régénération préexistante dans les forêts publiques du Québec. *Ann. Sci. For.* 46(4): 345–359.
- Ruel, J.-C. 1992. Abondance de la régénération 5 ans après la coupe à blanc mécanisée de peuplements d'épinette noire (*Picea mariana*). *Rev. can. rech. for.* 22(11): 1630–1638.

- Ruel, J.-C., R. Doucet et J. Boily. 1995. Mortality of balsam fir and black spruce advance growth 3 years after clear-cutting. *Rev. can. rech. for.* 25(9): 1528–1537.
- SAS Institute Inc. 2006. The GLIMMIX procedure, June 2006. Cary, NC. Disponible au www.sas.com/statistics/doc.html [cité le 30 mars 2007].
- Saucier, J.-P. 2004. L'information écologique pour la gestion durable des forêts au Québec. *Le Naturaliste Canadien*, 128(2): 85–91.
- Saucier, J.-P., J.-F. Bergeron, P. Grondin et A. Robitaille. 1998. Les régions écologiques du Québec méridional (3^e version) : un des éléments du système hiérarchique de classification écologique du territoire mis au point par le ministère des Ressources naturelles du Québec. *L'Aubelle* 124: S1–S12.
- Solarik, K.A., V.J. Lieffers, W.J.A. Volney, R. Pelletier et J.R. Spence. 2010. Seed tree density, variable retention, and stand composition influence recruitment of white spruce in boreal mixedwood forests. *Rev. can. rech. for.* 40(9): 1821–1832.
- Thiffault, N. et R. Jobidon. 2006. How to shift unproductive *Kalmia angustifolia* – *Rhododendron groenlandicum* heath to productive conifer plantation. *Rev. can. rech. for.* 36(10): 2364–2376.
- Ung, C.-H., P.Y. Bernier, F. Raulier, R.A. Fournier, M.-C. Lambert et J. Régnière. 2001. Biophysical site indices for shade tolerant and intolerant boreal species. *For. Sci.* 47(1): 83–95.
- Waring, R.H. et W.H. Schlesinger. 1985. *Forest ecosystems: concepts and management*. Academic Press, Orlando, FL.