

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À
L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À CHICOUTIMI
COMME EXIGENCE PARTIELLE
DE LA MAÎTRISE EN RESSOURCES RENOUVELABLES

PAR
ÉMILIE PAMERLEAU-COUTURE
BIOLOGISTE B. Sc

IMPACT DE TROIS INTERVENTIONS SYLVICOLES SUR LA
CROISSANCE ET LA QUALITÉ DU BOIS DE L'ÉPINETTE NOIRE EN
FORÊT BORÉALE

MARS 2011

RÉSUMÉ

Au cours des dernières années, l'exploitation forestière en forêt boréale a atteint ses limites dans certaines régions. De nouvelles stratégies doivent être établies afin d'augmenter le volume de bois produit en forêt. Dans cette perspective, des interventions sylvicoles, comme l'éclaircie commerciale (EC) et les coupes avec protection des petites tiges marchandes (CPPTM) et de la régénération et des sols (CPRS) représentent des interventions intéressantes à préconiser puisqu'elles permettent une récolte plus hâtive et plus productive des peuplements traités grâce à l'augmentation de croissance des tiges résiduelles. Par contre, une forte croissance peut entraîner une baisse de la qualité du bois (propriétés mécaniques) en agissant sur les paramètres anatomiques, la masse volumique du bois et le diamètre des branches. L'objectif de ce projet est d'évaluer la croissance ainsi que la qualité du bois de l'épinette noire à la suite de trois différentes interventions sylvicoles (EC, CPPTM et CPRS). À cette fin, le projet a analysé les effets de ces interventions en évaluant la variabilité de l'accroissement radial à l'échelle du peuplement en plus d'évaluer le volume de bois produit et la qualité du bois en fonction de la proportion de bois final, de la masse volumique du bois, des paramètres anatomiques et du diamètre des branches. Pour ce faire, cinq stations par intervention, avec leur témoin respectif, ont été échantillonnées. À l'intérieur de chaque station, cinq individus ont été sélectionnés selon un dispositif de sous-échantillonnage. La croissance radiale est accélérée à la suite des trois interventions avec une forte variabilité intra-station. Aucun changement significatif n'a été observé dans la proportion de bois final, dans la masse volumique du bois et dans l'aire du lumen à la suite de l'EC et de la CPPTM. Seule une diminution dans l'épaisseur des parois cellulaires dans les stations de CPPTM a été constatée. De plus, dans ces stations, le diamètre des branches est supérieur aux témoins, mais cette augmentation ne semble pas suffisante pour influencer la classification des tiges selon les normes. Après la CPRS, la période de juvénilité semble être prolongée et celle-ci pourrait nuire à la qualité du bois produit. Il est possible de conclure que l'effet des interventions en peuplement mature (EC, CPPTM) n'affecte pas significativement les paramètres de qualité analysés dans cette étude. Par contre, les peuplements juvéniles (CPRS) semblent plus affectés.

REMERCIEMENTS

Je voudrais avant tout remercier ma directrice, Cornelia Krause. Son soutien, ses précieux conseils, sa confiance, sa grande disponibilité et son appui tout au long du projet m'ont permis de mener à terme cette étude. Je remercie également mon codirecteur, Ahmed Koubaa; j'ai pu bénéficier de sa spécialisation dans le domaine de la qualité du bois.

Toutes les personnes qui ont participé au travail de terrain et de laboratoire: Pierre-Yves Plourde (que je remercie également pour ses précieux conseils), Audrey Lemay, Mireille Boulianne, Caroline Soucy, Geneviève Dumont-Frenette, Charles Augustin Déry-Bouchard, Manon Vincent, Germain Savard, Jean-Guy Girard et finalement, Denis Walsh pour ses explications et conseils pour les traitements statistiques utilisés. Je remercie le groupe CL50 pour ses conseils et le temps qu'ils m'ont consacré.

Je remercie les partenaires financiers, le Conseil National de Recherche en Sciences Naturelles et Génie (CRSNG), le Fonds Québécois de la Recherche sur la Nature et les Technologies (FQRNT) et le consortium de recherche sur la forêt boréale commerciale.

Je remercie également ma famille, en particulier ma mère, Diane Pamerleau, qui, grâce à son soutien, ses conseils, et sa précieuse aide dans la rédaction de ce mémoire, m'a permis de compléter cette étape importante.

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ	i
REMERCIEMENTS	ii
LISTE DES TABLEAUX.....	vi
LISTE DES FIGURES.....	viii
INTRODUCTION	1
MATÉRIEL ET MÉTHODES.....	11
Aire d'étude.....	11
Caractérisation des stations et évaluation de la variabilité intra-station.....	13
Caractérisation des stations.....	13
Évaluation de la variabilité intra-station.....	14
Analyse détaillée des épinettes noires	17
Croissance.....	18
Volume annuel	18
Qualité du bois.....	21
Volume de bois final	21
Masse volumique du bois.....	21
Paramètres anatomiques.....	23
Houppier et branches.....	25
Houppier.....	25
Diamètre des branches.....	26
RÉSULTATS	28
Caractérisation des stations et évaluation de la variabilité intra-station.....	28

Caractérisation des stations.....	28
Évaluation de la variabilité intra-station.....	30
Analyses détaillées des épinettes noires : croissance et qualité du bois.....	33
Volume annuel.....	33
Volume de bois final.....	38
Masse volumique du bois	44
Paramètres anatomiques	49
Houppier et branches	55
DISCUSSION	59
Effets de l'EC et de la CPPTM sur la croissance et la qualité du bois de l'épinette noire.....	59
Croissance.....	59
Variabilité intra-station dans la croissance radiale.....	59
Volume annuel	61
Qualité du bois.....	63
Proportion de bois final.....	63
Masse volumique du bois.....	64
Branches et houppier.....	67
Effets de la CPRS sur la croissance et la qualité du bois de l'épinette noire	69
Croissance.....	70
Variabilité de la croissance intra-station et volume annuel	70
Qualité du bois.....	71
Proportion de bois final et masse volumique du bois	71
Branches et houppier.....	72
Limite de l'étude et perspectives d'avenir.....	74
CONCLUSION.....	79
RÉFÉRENCES.....	81
ANNEXE 1	93

RECOUVREMENT DES STRATES ARBUSTIVES, HERBACÉES ET MUSCINALES	93
ANNEXE 2	97
CARACTÉRISTIQUES DES SOLS.....	97

LISTE DES TABLEAUX

- Tableau 1.** Caractéristiques des stations d'échantillonnage. Les valeurs ont été calculées avec tous les arbres présents dans les stations (gaules exclues) (écarts-types entre parenthèses; Surf. T.= surface terrière; DHP= diamètre à hauteur de poitrine)..... 12
- Tableau 2.** Résultats des analyses de variance (ANOVA) à mesures répétées par période (avant/après) du volume annuel, du volume en bois final, du pourcentage de volume en bois final et de la masse volumique du bois en fonction des traitements (Tr= traités vs témoins) et des années (An). 34
- Tableau 3.** Résultats des analyses de variance (ANOVA) à mesures répétées du volume annuel, du volume en bois final, du pourcentage de volume en bois final et de la masse volumique du bois des stations traitées en fonction des années (An). 35
- Tableau 4.** Résultats des analyses de variance (ANOVA) à mesures répétées de l'aire du lumen (μm^2), de l'épaisseur des parois cellulaires (μm), du ratio entre l'épaisseur de la paroi et l'aire du lumen des cellules et du nombre de cellules par cerne et par type de bois (bois initial [Bi] et bois final [Bf]) en fonction des traitements (Tr= traités vs témoins) et des années (An). 50
- Tableau 5.** Résultats des analyses de variance (ANOVA) à mesures répétées de l'aire du lumen (μm^2), de l'épaisseur des parois cellulaires (μm), du ratio entre l'épaisseur de la paroi et l'aire du lumen et le nombre de cellules des stations traitées en fonction du type de bois (bois initial [Bi] et bois final [Bf]) et des années (An). 54
- Tableau 6.** Résultats de l'analyse de covariance (ANCOVA) à mesures répétées du diamètre des branches (mm) par section (DBS), de l'analyse de covariance (ANCOVA)

du diamètre (mm) moyen des branches (DMB) et de l'analyse de variance (ANOVA) à un facteur de la longueur relative (%) du houppier (LRH) en fonction des traitements (Tr= traités vs témoins).....	58
Tableau 7. Classification selon la <i>Nation Lumber Grade Authority</i> (NLGA 2008).....	69
Tableau 8. Recouvrement (%) des espèces de la strate arbustive par station d'échantillonnage.....	94
Tableau 9. Recouvrement (%) des espèces de la strate herbacée par station d'échantillonnage.....	95
Tableau 10. Recouvrement (%) des espèces de la strate muscinale par station d'échantillonnage.....	96
Tableau 11. Caractéristiques du sol par station d'échantillonnage.....	98

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Distribution de l'épinette noire au Canada (adaptée de Farrar (1995)).	1
Figure 2. Représentation schématique de l'éclaircie commerciale (EC), de la coupe avec protection des petites tiges marchandes (CPPTM) et de la coupe avec protection de la régénération et des sols (CPRS).	4
Figure 3. Représentation schématique d'une station pour l'étape de caractérisation.	14
Figure 4. Débitage des individus et analyses effectuées.	18
Figure 5. Représentation schématique des différentes sections du houppier.	27
Figure 6. Courbes moyennes de l'indice de croissance radiale (sans unité) à l'échelle du peuplement, par intervention. La ligne pointillée représente l'année de l'intervention. Seule une station témoin est présentée contre cinq traitées pour les EC.	29
Figure 7. Histogramme représentant la distribution des arbres (%), avec les écarts-types, en fonction des différentes classes d'accroissement, selon chaque type d'intervention.	31
Figure 8. Courbes moyennes de l'indice d'accroissement radial (sans unité) en fonction des différentes classes d'accroissement, par intervention. La ligne pointillée représente l'année de l'intervention.	32
Figure 9. Courbes moyennes d'accroissement annuel en volume indicé (sans unité) avec les intervalles de confiance, par intervention, comparées avec les stations témoins. La ligne pointillée représente l'année de l'intervention. Les astérisques (*) représentent les résultats significatifs du test de comparaisons multiples par tranche.	36

Figure 10. Courbes moyennes d'accroissement en volume annuel indicé (sans unité) avec les intervalles de confiance, des stations traitées. Comparaison de toutes les années suivant l'intervention avec la moyenne des dix années (AVANT) précédant celle-ci. La ligne pointillée représente l'année de l'intervention. Les astérisques (*) représentent les résultats significatifs du test de comparaisons multiples de Tukey-Kramer.....37

Figure 11. Courbes moyennes d'accroissement annuel en volume de bois final indicé (sans unité) avec les intervalles de confiance, par intervention, comparées avec les stations témoins. La ligne pointillée représente l'année de l'intervention. Les astérisques (*) représentent les résultats significatifs du test de comparaisons multiples par tranche.39

Figure 12. Courbes moyennes d'accroissement en volume de bois final annuel indicé (sans unité) avec les intervalles de confiance, des stations traitées. Comparaison de toutes les années suivant l'intervention avec la moyenne des dix années (AVANT) précédant celle-ci. La ligne pointillée représente l'année de l'intervention. Les astérisques (*) représentent les résultats significatifs du test de comparaisons multiples de Tukey-Kramer.40

Figure 13. Courbes moyennes d'accroissement du volume en bois final annuel (%), avec les intervalles de confiance, par intervention, comparées avec les stations témoins. La ligne pointillée représente l'année de l'intervention.....42

Figure 14. Courbes moyennes du volume en bois final annuel (%) avec les intervalles de confiance, des stations traitées. Comparaison de toutes les années suivant l'intervention avec la moyenne des dix années (AVANT) précédant celle-ci. La ligne pointillée représente l'année de l'intervention. Les astérisques (*) représentent les résultats significatifs du test de comparaisons multiples de Tukey-Kramer.43

- Figure 15.** Variation radiale moyenne de la masse volumique (Kg/m^3) de l'épinette noire (arbres témoins) en fonction de l'âge cambial. La ligne pointillée représente la transition approximative entre le bois juvénile et le bois mature.....45
- Figure 16.** Courbes moyennes de la masse volumique annuelle (Kg/m^3) avec les intervalles de confiance, par intervention, comparées avec les stations témoins. La ligne pointillée représente l'année de l'intervention. Les astérisques (*) représentent les résultats significatifs du test de comparaisons multiples par tranche.46
- Figure 17.** Courbes moyennes de la masse volumique annuelle (Kg/m^3) avec les intervalles de confiance, des stations traitées. Comparaison de toutes les années suivant l'intervention avec la moyenne des dix années (AVANT) précédant celle-ci. La ligne pointillée représente l'année de l'intervention. Les astérisques (*) représentent les résultats significatifs du test de comparaisons multiples de Tukey-Kramer.....47
- Figure 18.** Courbes moyennes de la masse volumique annuelle (Kg/m^3) avec les intervalles de confiance, des stations traitées. Comparaison entre la densité du bois initial et du bois final. La ligne pointillée représente l'année de l'intervention.48
- Figure 19.** Valeurs moyennes et intervalles de confiance de l'aire du lumen (μm^2) par cerne selon le bois initial et le bois final en comparaison avec les stations témoins. Les lettres correspondent au test de comparaisons multiples de Tukey-Kramer effectué sur les stations traitées. Les lettres différentes représentent les valeurs significativement différentes.....51
- Figure 20.** Valeurs moyennes et intervalles de confiance de l'épaisseur des parois cellulaires (μm) par cerne selon le bois initial et le bois final en comparaison avec les stations témoins. Les astérisques (*) représentent les résultats significatifs du test de comparaisons multiples par tranche et les lettres correspondent à celui de Tukey-Kramer effectué sur les stations traitées. Les lettres différentes représentent les valeurs significativement différentes.....52

Figure 21. Valeurs moyennes et intervalles de confiance du nombre de cellules par cerne selon le bois initial et le bois final en comparaison avec les stations témoins. Les lettres correspondent au test de comparaisons multiples de Tukey-Kramer effectué sur les stations traitées. Les lettres différentes représentent les valeurs significativement différentes.....53

Figure 22. Diamètre moyen des branches (mm) par section du houppier et diamètre moyen des branches (mm) sur toute la longueur du houppier en comparaison avec les stations témoins, avec les intervalles de confiance. Les astérisques (*) représentent les résultats significatifs du test de comparaisons multiples par tranche.56

Figure 23. Longueur relative du houppier (%), avec les intervalles de confiance, en comparaison avec les stations témoins (ECTEM et CPTEM) par type d'intervention....57

INTRODUCTION

L'épinette noire (*Picea mariana* (Mill.) B.S.P.) est l'une des espèces les plus importantes dans l'est du Canada (Alteyrac, 2005; Vincent *et al.*, 2009). En plus d'être présente dans tout le Canada (Figure 1), elle couvre, au Québec, plus de 412 400 km² entre les 49^e et 52^e parallèles (Gagnon, 1995; Bergeron, 1996; Saucier *et al.*, 1998). Dans la région du Saguenay-Lac-Saint-Jean, elle constitue près de 80 % du couvert résineux (Fillion, 2004). Son abondance et ses propriétés en font une espèce très prisée par l'industrie forestière (Burns et Honkala, 1990; Vincent *et al.*, 2009). Elle était utilisée principalement pour la pâte à papier, mais aujourd'hui, l'est davantage en construction (charpente), en plus d'être utilisée, depuis les dernières années, dans les produits à valeur ajoutée (Alteyrac, 2005).



Figure 1. Distribution de l'épinette noire au Canada (adaptée de Farrar (1995)).

Au cours des dernières années, l'exploitation forestière en peuplements d'épinettes noires a atteint ses limites dans certaines régions. De plus, au Québec, la réduction des terres allouées à la production de fibre de bois (Coulombe *et al.*, 2004) couplée à une augmentation globale de la compétition dans l'industrie forestière a mené au développement de nouvelles stratégies afin d'augmenter le volume de bois produit dans les forêts restantes (Vincent *et al.*, 2009). Dans cette perspective, des traitements sylvicoles comme l'éclaircie commerciale (EC), la coupe avec protection des petites tiges marchandes (CPPTM) et la coupe avec protection de la régénération et des sols (CPRS) représentent des interventions intéressantes à préconiser puisqu'elles favorisent un accroissement des tiges résiduelles ainsi qu'une récolte plus hâtive et plus productive des secteurs traités.

L'application de l'EC dans des peuplements d'épinettes noires dans la forêt boréale du Québec a débuté au début des années 1990 (Vincent *et al.*, 2009). Cette opération s'effectue dans des peuplements équiens et consiste à récolter une partie des tiges marchandes d'un peuplement (Figure 2). Normalement, la récolte se situe entre 30 et 35 % de la surface terrière du peuplement afin d'avoir comme résultat une densité de 1500 tiges résiduelles/ha (MRNFP, 2003). Les arbres de moins bonne qualité sont récoltés (Alteyrac, 2005) et ainsi, il y a sélection des meilleurs phénotypes en plus de régulariser les classes de diamètre des tiges (O'Neil, 1998; Cameron, 2002). L'accroissement en diamètre des arbres résiduels est ainsi amélioré, de même que la qualité du peuplement final (MRNFP, 2003). Bref, les pratiques d'éclaircies commerciales, qui sont de plus en plus fréquentes, permettent de raccourcir les rotations et d'accélérer la croissance des arbres (Zhang et Chauret, 2001).

La CPPTM, contrairement à l'EC, est appliquée dans des peuplements inéquiens. L'épinette noire, à l'est de sa distribution, est souvent trouvée dans des peuplements de

structure irrégulière (Boucher *et al.*, 2003). Ces structures se forment sous l'influence de perturbations mineures (McCarthy et Weetman, 2006), comme les épidémies d'insectes et les chablis. Il y aurait entre 60 et 70 % des peuplements de la pessière noire à mousse de l'est en structure irrégulière (Boucher *et al.*, 2003; Coté *et al.*, 2010). Selon le principe de l'aménagement écosystémique, il faut aménager les forêts en s'inspirant des perturbations naturelles (Bergeron *et al.*, 1999) et ainsi faire des interventions qui se situent dans les limites de la variation naturelle des écosystèmes (Hunter, 1990). Tout en visant une meilleure production en volume de bois, la CPPTM tente d'émuler ces perturbations et ainsi conserver la structure irrégulière du peuplement. Cette intervention vise la récolte entre 70 et 90 % du volume marchand, tout en protégeant les petites tiges marchandes de moins de 16 cm au DHP (diamètre à hauteur de poitrine) en plus de protéger la régénération préétablie (MRNFP, 2003) (Figure 2). L'implantation des premiers dispositifs d'étude sur la CPPTM en forêt boréale remonte à l'année 1997 (Bégin, 2002) et peu d'études ont, à ce jour, analysé les effets à long terme de cette intervention.

Depuis des décennies, la coupe à blanc a été une des pratiques sylvicoles les plus utilisées dans l'est du Canada (Canadian Council of Forest Minister, 2002). Depuis le début des années 1990, la coupe totale s'est transformée en CPRS, où l'opération consiste également en la récolte de tous les arbres marchands du peuplement (100 % du volume marchand), mais en protégeant la régénération préexistante et en minimisant les perturbations du sol (MRNFP, 2003) (Figure 2). Il s'agit d'une intervention adaptée pour des peuplements équiens, car lorsqu'elle est appliquée à des peuplements inéquiens, ceux-ci se transforment par la suite en structure régulière (Groot *et al.*, 2005).

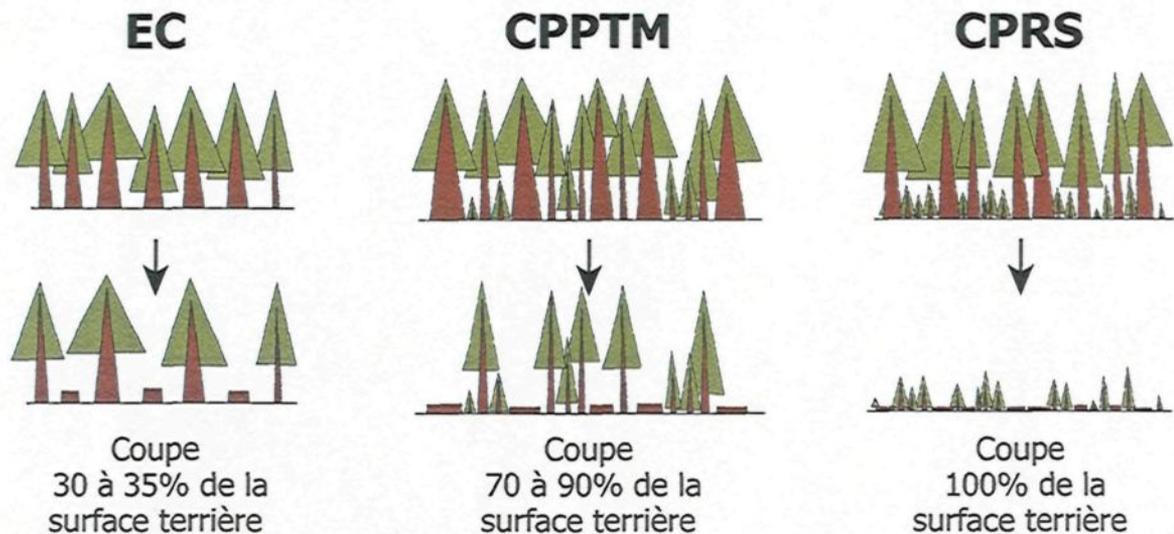


Figure 2. Représentation schématique de l'éclaircie commerciale (EC), de la coupe avec protection des petites tiges marchandes (CPPTM) et de la coupe avec protection de la régénération et des sols (CPRS).

L'EC, la CPPTM et la CPRS ont comme objectif commun d'augmenter la croissance des arbres résiduels en raison de la diminution de la compétition dans le peuplement. L'effet d'interventions de différentes intensités sur la croissance des tiges résiduelles a déjà été étudié pour différentes espèces dont le pin sylvestre (*Pinus sylvestris* (L.); Peltola *et al.*, 2002), l'épinette de Norvège (*Picea abies* (L.) Karst.; Pape, 1999), le pin gris (*Pinus banksiana* Lamb.; Schneider *et al.*, 2008), le sapin baumier (*Abies balsamea* (L.) Mill.; Raulier *et al.*, 2003; Bourgeois *et al.*, 2004) et sur des peuplements mixtes de sapin baumier avec l'épinette noire (Liu *et al.*, 2007a). Ces études démontrent, de façon générale, qu'une diminution de la densité du peuplement favorise la croissance des tiges résiduelles. Par contre, très peu d'études, à ce jour, portent sur l'effet d'une intervention sur les peuplements purs d'épinettes noires. Laplante (2009) et Vincent *et al.* (2009) s'intéressent tous deux à l'éclaircie commerciale sur cette espèce, mais aucune étude ne porte sur les deux autres types

d'interventions. Il y a encore moins de travaux sur la comparaison entre différentes interventions sylvicoles en forêt boréale.

De surcroît, les interventions pourraient nuire à la qualité du bois (Kang *et al.*, 2004). Celle-ci peut être définie par l'aptitude du bois à être utilisé pour un usage précis (Jozsa et Middleton, 1997). Considérant les multiples utilisations du bois, toutes ses caractéristiques, telles que chimiques, anatomiques, physiques et mécaniques peuvent être considérées comme des facteurs de qualité (Alteyrac, 2005) et ce, au même titre que les caractéristiques intrinsèques des fibres (Billosta *et al.*, 2007). Selon le type d'interventions sylvicoles, l'espacement entre les arbres dans les peuplements forestiers change et celui-ci aurait un impact direct sur certaines de ces caractéristiques (propriétés anatomiques, mécaniques et la masse volumique du bois) (Alteyrac, 2005). Effectivement, quelques auteurs ont déterminé que les propriétés du bois et des trachéides étaient influencées par l'âge des arbres, l'hérédité et le taux de croissance (Lindstrom, 1996; Makinen *et al.*, 2002a). Cette dernière notion laisse croire que des interventions favorisant la croissance des tiges pourraient mener à des changements dans les propriétés des fibres (Jaakkola *et al.*, 2005a; 2005b), dans la masse volumique du bois (Makinen *et al.*, 2002a) et dans le diamètre des nœuds (Makinen et Hein, 2006), et par le fait même, abaisser les propriétés mécaniques du bois.

Plusieurs considèrent la masse volumique comme le paramètre le plus important pour définir la qualité du bois (Koubaa *et al.*, 2002). En effet, en connaissant la masse volumique, exprimée en masse par unité de volume (Raven *et al.*, 2000), on peut prédire efficacement ses autres caractéristiques, telles que sa résistance, sa rigidité, sa stabilité dimensionnelle, son potentiel de rendement en pâte ainsi que sa qualité papetière (Jozsa et Middleton, 1997; Koubaa *et al.*, 2002). On considère même que la masse volumique du bois est l'indicateur de base des propriétés mécaniques du bois (Yang et Lu, 1997).

Au niveau anatomique, la proportion de bois final est un des facteurs les plus importants pour définir la masse volumique du bois (Antal et Micko, 1994; Ivkovich *et al.*, 2002). En effet, le bois final est constitué de petites cellules aux parois proportionnellement plus épaisses (Raven *et al.*, 2000), ce qui contribuerait à augmenter la masse volumique du bois. Nicholls (1984) démontre très clairement que la masse volumique du bois augmente significativement avec la proportion de paroi cellulaire par cellule, c'est-à-dire que plus l'épaisseur de la paroi cellulaire est importante plus la masse volumique augmente. Il y a donc des relations entre la masse volumique du bois, l'épaisseur des parois cellulaires et le pourcentage de bois final (de Kort *et al.*, 1991).

La masse volumique du bois serait également reliée au taux de croissance. Certains auteurs ont observé que l'augmentation de croissance était due principalement à l'augmentation de la largeur du bois initial (Zhang, 1998; Wang *et al.*, 2002). De ce fait, en réponse à une intervention sylvicole, il y aurait diminution du pourcentage de bois final et probablement, diminution de la masse volumique moyenne des cerne de croissance associée à une augmentation de la largeur de ceux-ci.

En plus d'influencer positivement la masse volumique du bois (Nicholls, 1984), l'épaisseur des parois cellulaires influence le procédé de fabrication de la pâte et la résistance du papier, ce qui en fait un critère de qualité important (Law et Valade, 1997). En effet, une épaisseur importante de la paroi cellulaire des fibres est reconnue pour en augmenter leur résistance, ce qui augmenterait également celle du papier (Karlsson, 2006). De nombreuses études ont démontré qu'une augmentation de croissance affectait les paramètres des fibres (Dutilleul *et al.*, 1998; Makinen *et al.*, 2002b); soit il y a augmentation de l'aire du lumen et/ou diminution de l'épaisseur des parois cellulaires (Makinen *et al.*, 2002b; Jaakkola *et al.*, 2005b). Les différentes interventions, de par l'augmentation de la croissance des tiges, peuvent donc nuire à la qualité du bois.

Les nœuds sont un autre facteur très important dans la détermination de la qualité du bois. En fait, la fréquence et la grosseur des nœuds compromettent la qualité du bois, peu importe son utilisation (Macdonald et Hubert, 2002). Elles augmentent toutes les deux les coûts reliés à la coupe et aux procédés industriels, en plus de nuire aux propriétés mécaniques du bois solide (Macdonald et Hubert, 2002). Dans le cas du bois solide, la déviation locale des fibres autour du nœud entraîne une diminution de la rigidité et de la résistance du bois (Jozsa et Middleton, 1997; Zhang *et al.*, 1997). Dans les procédés papetiers, les nœuds sont également indésirables (Macdonald et Hubert, 2002). En effet, le bois des nœuds est significativement plus dense que le bois de la tige, ce qui cause des problèmes dans les procédés chimiques et mécaniques de mise en pâte (Walker, 1993). Comme le diamètre des branches dépend du taux de croissance, il peut être affecté par les interventions sylvicoles (Pape, 1999). Ces dernières, en modifiant la densité du peuplement, peuvent augmenter le diamètre des branches et quelques études s'y sont intéressées (Pape, 1999; Makinen et Hein, 2006; Pfister *et al.*, 2007; Weiskittel *et al.*, 2007). Toutefois, les auteurs ne s'entendent pas sur le véritable effet d'un espacement entre les arbres, et ceci peut être causé par un manque de régularité dans les méthodes de prise de mesures. Certains auteurs mesurent les branches à la base de l'arbre seulement (Pape, 1999; Weiskittel *et al.*, 2007), d'autres mesurent la totalité des branches (Makinen et Hein, 2006) et certains mesurent seulement la branche ayant le plus gros diamètre dans l'arbre entier ou à chaque verticille (Fahlvik *et al.*, 2005; Pfister *et al.*, 2007). De ce fait, il est encore difficile de prédire l'effet des différentes interventions sur le diamètre des branches.

La longueur du houppier est également une variable prédictive importante pour la qualité du bois, car plus les branches meurent tôt, plus les nœuds sont petits (Makinen et Colin, 1999). En peuplement naturel dense, il est probable que la croissance des branches les plus basses cesse en raison de la limitation du carbone reliée à la disponibilité insuffisante de la lumière nécessaire à la photosynthèse (Oliver et Larson,

1996; Makela, 1997). À la suite d'une intervention sylvicole diminuant la densité du peuplement, il y a davantage de lumière qui peut atteindre les parties les plus basses du houppier, favorisant ainsi la longévité des branches. La différence dans les dimensions du houppier est le résultat d'un délai dans la récession de celui-ci avec l'augmentation de l'espace entre chaque arbre (Pape, 1999).

De plus, selon Koubaa *et al.* (2005), à la suite d'une intervention sylvicole, le ralentissement dans la récession du houppier pourrait prolonger la période de bois juvénile. Une proportion élevée de ce type de bois peut entraîner une diminution de la qualité du bois. D'après plusieurs études, le bois juvénile serait de qualité inférieure en raison des différences marquées dans sa résistance (module de rupture (MOR)), sa stabilité et sa rigidité (module d'élasticité (MOE)) (Clark *et al.*, 2006; Jordan *et al.*, 2006). Le bois juvénile a aussi tendance à avoir plus de bois de compression et un angle de microfibrilles plus élevé (Jordan *et al.*, 2006). Ces deux propriétés nuisent à l'utilisation du bois de construction en augmentant le niveau de distorsion des planches (Zobel et Sprague, 1998). De plus, le bois juvénile a moins de force de cohésion et une plus grande instabilité dimensionnelle lors du séchage (Zobel et van Buijtenen, 1989; Zobel et Sprague, 1998), provoquant ainsi une plus grande proportion de défauts que dans le bois mature (Mansfield *et al.*, 2009).

Des résultats contradictoires laissent supposer que la relation entre les différents paramètres de qualité (masse volumique du bois, paramètres anatomiques, diamètre des branches) et la croissance des arbres est moins claire qu'elle y paraît. La communauté scientifique ne s'entend pas sur les réels effets d'une augmentation de croissance sur les propriétés du bois. La qualité du bois de l'épinette noire en forêt boréale est encore trop peu étudiée et après intervention, celle-ci doit tendre vers ou même excéder les normes de l'industrie de la transformation du bois. Dans le contexte actuel et futur de

convergence vers les produits du bois à haute valeur ajoutée, l'assurance d'un produit final de qualité dépendra de l'état des arbres marchands qui est étroitement lié aux interventions sylvicoles.

L'objectif principal de cette étude est d'évaluer l'impact de l'EC, la CPPTM et la CPRS sur la croissance et la qualité du bois de l'épinette noire en forêt boréale. Spécifiquement, le projet vise à :

- 1) évaluer la croissance du peuplement et la variabilité intra-station de la croissance des arbres;
- 2) évaluer le volume de bois produit annuellement;
- 3) analyser différents attributs influençant la qualité du bois (proportion de bois final, masse volumique, paramètres anatomiques, longueur du houppier et diamètre des branches).

Selon ces objectifs, nous émettons l'hypothèse que l'accroissement radial des tiges devrait augmenter à l'échelle des stations en fonction des interventions sylvicoles, mais avec une forte variabilité entre les arbres résiduels. Cette augmentation entraînerait des modifications dans les propriétés anatomiques (augmentation de l'aire du lumen et diminution de la largeur des parois cellulaires), une diminution du pourcentage de bois final et de la masse volumique du bois ainsi qu'une taille plus élevée des nœuds, ce qui contribuera de façon générale à diminuer la qualité du bois dans les stations à l'étude. En effet, ces attributs devraient être étroitement liés au taux de croissance (Zhang *et al.*, 1996). Les changements devraient être plus importants dans le cas d'une intervention de forte intensité (CPRS) qu'à une de faible intensité (EC). Il existe peu de données, à ce jour, pour évaluer le gain en volume et la qualité du bois subséquent aux

interventions sylvicoles; celles-ci sont plutôt récentes dans les peuplements dominés par l'épinette noire en forêt boréale. De plus, il y a très peu de publications traitant de la qualité du bois et encore moins de la comparaison entre différentes interventions sylvicoles en forêt boréale, d'où l'importance de la présente étude.

MATÉRIEL ET MÉTHODES

Aire d'étude

Les interventions sylvicoles étudiées sont l'éclaircie commerciale (EC) et les coupes avec protection des petites tiges marchandes (CPPTM) et de la régénération et des sols (CPRS). Pour évaluer l'impact de ces interventions sylvicoles, cinq stations par intervention, avec leur témoin respectif, ont été échantillonnées. Il s'agit d'un dispositif en tiroir (bloc). Chaque bloc correspondant à une station traitée, jumelée à une station témoin, sauf pour les CPRS où les témoins sont inexistantes. Le dispositif n'est pas balancé dans le cas des EC, car une des stations traitées n'est pas jumelée à une station témoin (ECLC2).

Les stations à l'étude se situent dans la région du Saguenay-Lac-Saint-Jean et font partie des domaines bioclimatiques de la sapinière à bouleau jaune (forêt mélangée) et de la sapinière à bouleau blanc (forêt boréale) (MRNF, 2006). Les stations d'échantillonnage, pour les trois interventions, ont été sélectionnées grâce aux cartes écoforestières du Ministère des Ressources Naturelles et de la Faune du Québec et proviennent de la base nationale de données topographiques développées par le conseil canadien de géomatique (GéoBase®). Le critère de base pour la sélection des stations était le nombre d'années depuis l'intervention. Ce nombre devait être d'au moins 10 ans pour la CPRS et l'EC et d'au moins 5 ans pour la CPPTM (étant donné que celle-ci est une intervention récente). Ensuite, les stations ont été choisies selon des critères descriptifs (pente faible, bon drainage, sol mésique, âge, etc.) afin de limiter les variations liées à l'environnement local (Tableau 1).

Tableau 1. Caractéristiques des stations d'échantillonnage. Les valeurs ont été calculées avec tous les arbres présents dans les stations (gaules exclues) (écarts-types entre parenthèses; Surf. T.= surface terrière; DHP= diamètre à hauteur de poitrine).

Bloc	Année	Intervention	Latitude (N)	Longitude (W)	Densité avant (Tiges/ha)	Densité après (Tiges/ha)	Surf. T. avant (m ² /ha)	Surf. T. après (m ² /ha)	Âge Moyen (an)	DHP moyen (cm)	Hauteur moyenne (m)
ECLA1	1998	EC	47°51'19.54"	71°18'09.93"	2775	1000	43.0	17.5	50 (6)	14.7 (2.4)	10.4 (1.2)
		Témoin	47°51'49.72"	71°19'08.55"	N/D	N/D	N/D	N/D	129 (24)	16.0 (3.4)	13.2 (1.8)
ECLC1	1998	EC	48°08'58.91"	71°52'00.08"	2475	1725	47.8	34.6	73 (4)	15.7 (3.0)	15.2 (2.1)
		Témoin	48°08'41.35"	71°52'51.51"	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D
ECLC2	1998	EC	48°08'17.20"	71°52'46.48"	1588	1324	44.6	37.6	68 (7)	19.1 (3.7)	17.9 (3.1)
		Témoin	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D
ECMV3	1997	EC	48°47'37.98"	70°21'32.96"	2950	1300	55.5	29.3	73 (4)	16.8 (3.1)	12.9 (1.7)
		Témoin	48°47'40.22"	70°21'31.15"	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D
ECMV4	1998	EC	48°46'51.72"	70°33'05.84"	2375	1025	52.9	25.5	70 (14)	17.8 (2.9)	13.5 (1.6)
		Témoin	48°46'45.42"	70°32'53.01"	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D
Moyenne EC		EC	-	-	2433 (525)	1275 (293)	48.8 (5.3)	28.9 (7.9)	67 (10)	16.8 (1.7)	14.0 (2.8)
		Témoin	-	-	N/D	N/D	N/D	N/D	129 (24)	16.0 (3.4)	13.2 (1.8)
CPPTMB3	1997	CPPTM	48°41'10.20"	70°21'51.10"	3900	1800	62.4	15.8	67 (11)	10.2 (2.8)	6.8 (2.5)
		Témoin	48°41'10.00"	70°21'50.00"	N/D	4100	N/D	52.3	69 (16)	12.6 (3.6)	10.2 (1.7)
CPPTMB10	1999	CPPTM	48°41'34.40"	70°21'33.40"	2650	1950	62.6	22.3	75 (20)	11.6 (3.8)	7.8 (2.8)
		Témoin	48°41'36.30"	70°22'07.60"	N/D	2400	N/D	42.8	86 (21)	14.5 (4.8)	9.7 (0.9)
CPPTMB20	2000	CPPTM	48°42'58.60"	70°13'13.70"	1350	1000	28.3	12.9	83 (27)	12.5 (2.6)	9.1 (2.2)
		Témoin	48°43'02.30"	70°13'27.40"	N/D	2222	N/D	34.4	78 (25)	13.9 (3.0)	9.3 (1.3)
CPPTMB21	2000	CPPTM	50°15'53.50"	72°11'14.70"	1667	1200	27.0	7.4	67 (18)	8.5 (2.5)	6.6 (1.8)
		Témoin	50°16'03.40"	72°11'29.60"	N/D	1800	N/D	19.3	113 (12)	11.4 (3.4)	10.6 (2.8)
CPPTMB5	2003	CPPTM	50°25'26.50"	72°00'49.70"	2400	2050	26.0	14.4	98 (19)	9.3 (2.3)	7.5 (1.7)
		Témoin	50°25'28.50"	72°00'51.40"	N/D	2667	N/D	25.1	108 (33)	10.5 (3.0)	8.6 (2.6)
Moyenne CPPTM		CPPTM	-	-	2393 (994)	1600 (470)	41.3 (19.4)	14.5 (5.4)	78 (13)	10.4 (1.7)	7.6 (1.0)
		Témoin	-	-		2638 (876)		34.8 (13.3)	91 (19)	12.6 (1.7)	9.7 (0.8)
CPRSMV1	1989	CPRS	48°51'32.00"	70°18'42.90"	2600	1867	36.0	3.8	21 (12)	5.7 (3.5)	3.6 (0.7)
CPRSMV2	1994	CPRS	48°51'20.30"	70°21'43.30"	3300	1667	57.4	2.3	11 (9)	3.9 (1.5)	3.2 (0.8)
CPRSMV3	1990	CPRS	48°46'37.50"	70°34'47.00"	3889	2611	49.4	11.4	17 (8)	7.1 (2.6)	4.2 (1.3)
CPRSMV4	1993	CPRS	48°43'36.50"	70°34'24.10"	2467	2133	16.0	6.3	30 (22)	5.9 (2.2)	3.7 (1.2)
CPRSRI69	1991	CPRS	48°11'07.90"	71°39'18.70"	2933	2467	22.3	4.9	16 (7)	4.8 (1.3)	3.7 (0.8)
Moyenne CPRS		CPRS	-	-	3038 (575)	2149 (396)	36.2 (17.5)	5.7 (3.5)	19 (7)	5.5 (1.2)	3.7 (0.4)

Caractérisation des stations et évaluation de la variabilité intra-station

Cette étape permet la caractérisation des stations à analyser et également d'évaluer la variabilité intra-station en réaction aux interventions. Puisque les témoins des stations d'éclaircies commerciales faisaient partie d'un projet différent, cette étape n'a pas été effectuée, car elle n'était pas requise. Seulement une station (ECLA1-Témoin) a été échantillonnée. Dans le cadre du présent projet, l'objectif principal est d'évaluer l'impact des interventions sur la croissance et la qualité du bois. En conséquence, cette première étape, dans les stations témoins, n'est pas nécessaire à la réalisation de cet objectif. Néanmoins, il aurait été préférable que cette caractérisation soit réalisée afin de s'assurer de la similitude des stations témoins avec celles traitées.

Caractérisation des stations

Dans chaque peuplement sélectionné, une parcelle de 400 m², devant contenir un minimum de 35 arbres (gaules exclues), a été délimitée. Afin de caractériser chacune des stations, des sous-parcelles de 1m² ont été installées aux quatre coins de la parcelle principale afin d'y effectuer un relevé de végétation (Figure 3). Ces relevés consistaient à identifier toutes les espèces présentes, et ce, dans toutes les strates de végétation, et d'en évaluer le recouvrement (Annexe 1). De plus, un pèdon a été effectué au centre de la placette principale afin d'y caractériser le type de sol présent (Annexe 2).

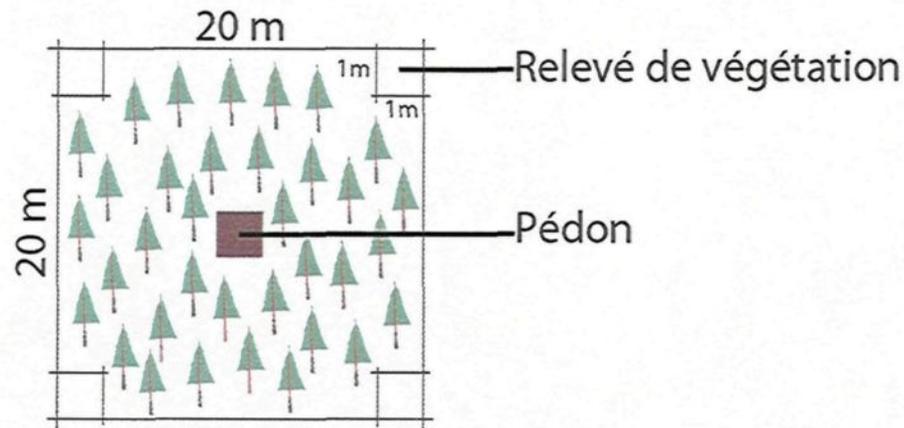


Figure 3. Représentation schématique d'une station pour l'étape de caractérisation.

Évaluation de la variabilité intra-station

Afin de réaliser cette première étape, l'ensemble des arbres présents dans les stations (minimum de 35 arbres, gaules exclues), sans distinction des classes sociales, a été échantillonné à 20 cm de la base. Grâce à ces échantillons, l'âge des individus ainsi que leur croissance radiale annuelle ont été mesurés.

La croissance radiale a été mesurée sur les échantillons préalablement séchés et sablés. La mesure a été effectuée avec un appareil à détection semi-automatique des cernes de croissance, le WinDENDROtm (version, 2003a) et, lorsque les cernes étaient trop petits, à l'aide de la table dendrométrique de marque Henson (précision 0,01 mm).

Dans une même station, les conditions environnementales améliorant ou limitant la croissance des arbres sont similaires (selon le principe d'uniformité de Hutton (1788)), et les variations interannuelles de ces conditions influencent la largeur des cernes de croissance de façon synchrone entre les arbres d'une même région (Fritts,

1976, Fritts et Swetnam, 1989). Cette caractéristique permet la comparaison des courbes de croissance des arbres d'une même station afin d'éliminer les erreurs techniques et de déceler les cernes manquants ou discontinus (O'Neil, 1963; Fritts, 1971, 1976; Swetnam, 1985; Fritts et Swetnam, 1989). Cette méthode se nomme l'interdatation et celle-ci s'est effectuée selon la méthode décrite par Levasseur (2000) avec le logiciel COFECHA (Holmes, 1983).

La standardisation des mesures de largeur de cernes est nécessaire afin d'être en mesure de comparer les arbres et les stations entre eux. Ceci permet d'atténuer les variations pouvant être causées par des facteurs environnementaux, par l'âge des arbres, etc. La standardisation a été effectuée avec le logiciel ARSTAN (Cook et Holmes, 1986). Pour ce faire, seule une courbe exponentielle négative a été appliquée aux données, et ce, dans le but de conserver l'effet des interventions; les valeurs présentées seront alors, indicées. La méthode utilisée est décrite dans Cook et Holmes (1986).

Afin d'évaluer la réaction aux interventions, un pourcentage d'accroissement a été calculé avec la moyenne de la croissance radiale indicée des dix années précédant l'intervention. Une moyenne de l'accroissement depuis l'année de l'intervention a été calculée avec la moyenne de toutes les années suivant l'intervention (Formule 1, selon Vincent *et al.*, 2009).

(Formule 1)

$$\gamma = \frac{\sum_{t=AI}^{t=i} \alpha_t / (i-AI)}{\sum_{t=AI-10}^{t=AI} \alpha_t / 10} \times 100$$

Où : γ = accroissement [%]

AI = année de l'intervention

i = année d'échantillonnage

t = année

α = indice de croissance

Afin d'évaluer la variabilité intra-station, cinq classes d'accroissement moyen ont été déterminées selon la variation de γ (Vincent *et al.*, 2009).

- 1) $\gamma \leq 80$ (%) ; cette classe comprend les individus qui ont une diminution de leur croissance radiale moyenne à la suite de l'intervention;
- 2) $80 < \gamma \leq 120$; cette classe correspond à la variabilité naturelle dans la croissance radiale. Les individus présents dans cette classe n'ont ni diminution ni augmentation de leur croissance radiale;
- 3) $120 < \gamma \leq 150$; il y a une légère augmentation de la largeur des cernes de croissance après l'intervention pour les arbres présents dans cette classe;
- 4) $150 < \gamma \leq 200$; forte augmentation de croissance. Les arbres présents dans cette classe ont très bien réagi à la suite de l'intervention;
- 5) $\gamma > 200$; les individus présents dans cette classe ont plus que doublé leur croissance radiale à la suite de l'intervention.

Aucun des résultats n'a été comparé statistiquement pour cette section; il s'agit seulement de résultats descriptifs.

Analyse détaillée des épinettes noires

Le deuxième échantillonnage permet l'évaluation de l'impact des différentes interventions sylvicoles sur la croissance et la qualité du bois des arbres ayant eu une réponse positive après l'intervention. Ainsi, cinq arbres par station traitée ont été sélectionnés aléatoirement dans les classes 3, 4 et 5 (classes correspondant aux arbres ayant augmenté leur croissance radiale à la base de leur tige), pour un total de 25 dans les stations traitées. Cinq arbres par intervention ont également été sélectionnés dans les stations témoins. Les critères de sélection des arbres dans les stations témoins ont été les mêmes que ceux appliqués lors des interventions. C'est-à-dire, les arbres sélectionnés dans les stations témoins des EC étaient les dominants ou les co-dominants et dans les stations témoins des CPPTM, les petites tiges marchandes (moins de 16 cm de diamètre). À noter que les stations de CPRS, dans cette section, ne sont toujours pas jumelées à des stations témoins. La croissance est évaluée en fonction du volume annuel de bois produit. La qualité du bois est évaluée en fonction du volume de bois final produit, la masse volumique du bois, les paramètres anatomiques ainsi que la longueur du houppier et le diamètre des branches. Chaque arbre a été débité et analysé de la même manière (Figure 4).

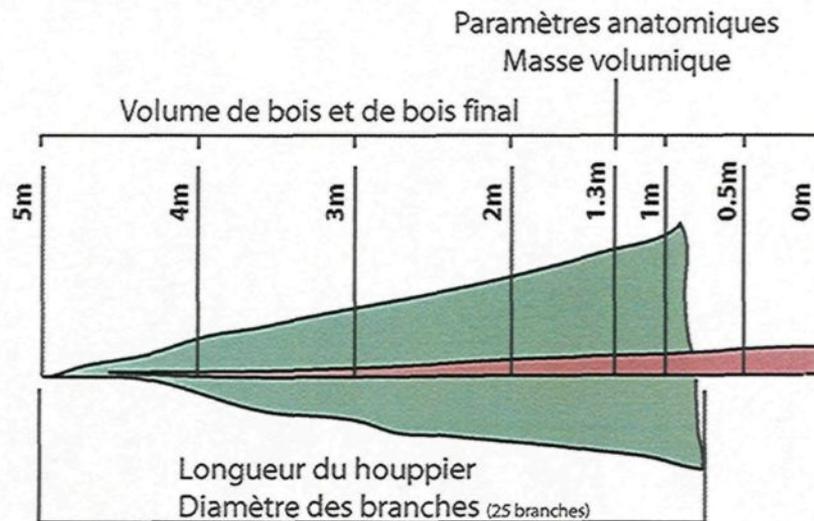


Figure 4. Débitage des individus et analyses effectuées.

Croissance

Volume annuel

Sur chaque arbre sélectionné, une rondelle à 0 m, 0,5 m, 1 m, 1,3 m, 2 m et à chaque mètre jusqu'à la cime a été récoltée, séchée et sablée (Figure 4). La mesure des cernes de croissance s'est effectuée sur quatre rayons pour les rondelles situées de 0 m jusqu'à 2 m, tandis que pour les rondelles situées au-delà de 2 m, elle s'est effectuée sur deux rayons opposés. Les cernes sont mesurés avec les mêmes appareils que ceux ayant servi à la mesure des carottes lors de l'étude sur la variabilité à l'intérieur de chaque station.

L'interdatation s'est réalisée selon la même méthode que celle décrite dans la section précédente. Pour cette partie, le programme COFECHA (Holmes, 1983) a vérifié

la corrélation entre les différents rayons d'une même rondelle, entre les rondelles d'un même arbre et entre les arbres d'une même station.

L'évaluation du volume de bois produit annuellement s'est accomplie grâce au logiciel WinStem™ (version, 2003d). Celui-ci permet le calcul du volume de bois produit, en dm^3 , en fonction du temps. En fait, le volume est la somme des cônes délimités par deux rondelles consécutives (Formules 2 et 3) (User guide of WinStem).

(Formule 2)
$$\text{Volume d'un cône} = (R_a^2 + R_a \times R_b + R_b^2) \times H \times \pi/3$$

(Formule 3)
$$\text{Volume d'un arbre} = \sum (\text{volume des cônes} / 1000)$$

Où : R_a = Rayon de la rondelle la plus basse [mm]

R_b = Rayon de la rondelle la plus haute [mm]

H = Hauteur du cône [m]

Une standardisation a été appliquée sur les données de volume annuel afin de comparer les stations traitées aux stations témoins. La standardisation s'est simplement effectuée en divisant le volume de bois formé chaque année pour un individu, par la moyenne des volumes produits annuellement (Formule 4).

(Formule 4)
$$\text{Indice de volume} = \frac{\text{Volume annuel}}{\text{Moyenne des volumes annuels}}$$

Une première analyse de variance (ANOVA) multifactorielle à mesures répétées par période (avant et après intervention) a été effectuée afin de comparer l'indice de

volume annuel des stations traitées aux stations témoins. Cette analyse, ainsi que toutes celles présentées dans les sections suivantes, a été effectuée à l'aide de la procédure mixte dans le logiciel SAS (PROC MIXED; SAS 2002-2008) et le seuil de signification α est de 0,05. La période avant l'intervention correspond à 20 ans et la période après correspond au nombre d'années entre l'année de récolte et celle de l'intervention. Le traitement (traité ou témoin) et les années sont les facteurs fixes, les blocs le facteur aléatoire, et les arbres le sujet; les années représentent le facteur en mesures répétées. Les valeurs sont transformées, si nécessaire, afin de respecter les conditions d'homogénéité des variances et de normalité. La matrice de variance-covariance a été sélectionnée par le critère AIC (Akaike, 1987). La matrice correspondant le plus aux présentes données est l'autorégressive (Ar(1)) dû à l'autocorrélation entre les valeurs.

Suite à l'ANOVA à mesures répétées, un test de comparaisons multiples par tranche (*slice test*) a été effectué. Celui-ci permet de comparer l'indice de volume produit entre les traités et les témoins, et ce, à chaque année individuellement. Par exemple, l'indice de volume produit par les stations traitées à l'année +4, c'est-à-dire, quatre années à la suite de l'intervention, est comparé avec l'indice de volume produit par les témoins à l'année +4 et ainsi de suite. Alors, si l'ANOVA à mesures répétées démontre une différence significative pour une période, le test de comparaisons multiples par tranche permettra de définir à quelle année cette différence est survenue.

Une seconde analyse statistique est réalisée sur les données des stations traitées seulement. Cette analyse permet de détecter à partir de quelle année les arbres ont une réaction positive au traitement, c'est-à-dire qu'ils ont une augmentation significative de leur volume produit annuellement en comparaison à la moyenne des dix années précédant l'intervention. L'analyse consiste en une analyse de variance (ANOVA) multifactorielle à mesures répétées. Les années (moyenne des 10 ans avant, 1 an après traitement, 2 ans après, etc.) sont le facteur fixe, les blocs sont le facteur aléatoire et les

arbres le sujet; les années constituent le facteur en mesures répétées. Si cette analyse donne un résultat significatif, un test de comparaisons multiples (Tukey-Kramer) est effectué afin de déterminer où se trouve la différence.

Qualité du bois

Volume de bois final

Durant la mesure des cernes de croissance, le logiciel WinDENDROtm (version, 2003a) permet de distinguer les différentes sections du cerne grâce à la différence d'intensité de la lumière, et d'ainsi mesurer la largeur et le pourcentage de bois final dans chacun des cernes.

Les mesures de largeur de bois final ont permis d'évaluer le volume de bois produit, mais uniquement en bois final. La méthode et les analyses statistiques sont les mêmes que celles présentées dans la section du volume annuel. À noter, les échantillons mesurés avec l'appareil Henson sont exclus de cette analyse en raison de l'incapacité de cet appareil à séparer le bois initial du bois final.

Masse volumique du bois

Sur chaque arbre sélectionné, une rondelle extraite à 1,3 m a été utilisée pour l'évaluation de la masse volumique, sauf pour les arbres provenant de CPRS où la rondelle a été prise à la base. Les arbres provenant des CPRS sont en fait la régénération qui a été protégée lors de la coupe. De ce fait, cette régénération est, en majorité, de faibles dimensions (de 1 à 2 m de hauteur). La seule façon d'analyser des cernes

provenant de la période avant la coupe était de prendre la rondelle à la base de l'arbre. C'est également cette rondelle qui a servi aux analyses anatomiques qui seront décrites dans la section suivante.

Afin d'analyser la masse volumique du bois, un densitomètre à rayons X de type QTRS-01X (tree ring scanner) a été utilisé. L'intensité des rayons X qui traversent le bois permet de déterminer la masse volumique de celui-ci (Formule 5).

(Formule 5)
$$\rho = \left(\frac{1}{\mu_m t} \right) \ln \left(\frac{I_0}{I} \right)$$

Où : ρ = masse volumique

μ_m = coefficient d'absorption de masse [constante]

t = épaisseur de l'échantillon [constante]

I_0 = Intensité incidente [mesurée avant de traverser l'échantillon]

I = Intensité transmise [mesurée après avoir traversé l'échantillon]

Avant l'utilisation de cet appareil, deux étapes préliminaires doivent être effectuées. Premièrement, les échantillons doivent être coupés à l'aide d'une scie parallèle afin de respecter les dimensions requises pour l'analyse au densitomètre. L'épaisseur des échantillons doit varier entre 1,6 et 2 mm et demeurer constante.

Deuxièmement, l'extraction de tous composés (extractibles) présents dans le bois doit être effectuée avant l'analyse de la masse volumique. En effet, la quantité d'extractibles dans le bois peut influencer les valeurs. Pour réaliser cela, les échantillons sont placés pendant 24 h dans un montage permettant le contact à un mélange de cyclohexane et d'éthanol (2 :1). Les premières 24 h passées, le mélange chimique est

remplacé par de l'eau pendant 24 h supplémentaires afin d'éliminer la résine et les polysaccharides hydrosolubles (Grabner *et al.*, 2005). Les échantillons sont ensuite retirés du montage et séchés pendant 72 h à l'air libre. Un poids doit être placé sur les échantillons afin d'éviter des déformations du bois lors du séchage.

Une fois les étapes préliminaires accomplies, les échantillons sont analysés. Le densitomètre est muni d'une caméra qui permet à l'opérateur de suivre l'évolution de la mesure et le cas échéant, de déceler les erreurs possibles. La perte d'intensité du rayon X incident est convertie en masse volumique, ce qui permet d'analyser les variations de celle-ci à l'intérieur des cernes et le long de la tige.

La transition entre le bois initial et le bois final a été déterminée selon la méthode du point d'inflexion avec l'utilisation du logiciel Matlab (Koubaa *et al.*, 2002). Dans cette étude, la distinction entre le bois initial et le bois final ne sera effectuée que de façon descriptive, en raison d'un manque important de données (lorsque les cernes sont petits, la distinction entre le bois initial et final n'est pas toujours possible). Par contre, la moyenne du cerne complet sera statistiquement analysée avec la même méthode que celle décrite dans la section du volume annuel.

Paramètres anatomiques

Des coupes minces transversales, regroupant deux années précédant immédiatement l'intervention et les années trois et quatre après, ont été effectuées (Laplante, 2009; Krause *et al.*, 2010). Les échantillons ont été préalablement fixés dans de la paraffine pour être ensuite coupés à l'aide d'un microtome à rotation (microtome

Leitz 1512 et Leica RM2145). Les coupes sont fixées sur des lames avec l'albumine et ensuite colorées à l'aide de la safranine (Deslauriers, 1999).

L'épaisseur de la paroi cellulaire, l'aire du lumen ainsi que le ratio entre les deux ont été recueillis sur trois lignées de cellules le long du cerne de croissance pour chaque année. De plus, le nombre de cellules présent dans le bois initial et final de chaque cerne a été mesuré. Ces mesures ont été effectuées grâce à la prise de photo avec un microscope muni d'une caméra numérique et à l'analyse des images avec le logiciel Wincell (Regent instruments inc.). La discrimination entre le bois initial et le bois final est basée sur le rapport entre la largeur des parois et l'aire du lumen pour chaque cellule selon la formule de Mork (1928 cité dans Denne (1988)).

La standardisation, pour cette section, permet de remettre sur un même dénominateur les mesures des trois lignées de cellules et ainsi permettre de calculer des moyennes issues d'arbres différents (Deslauriers, 1999). La procédure consiste en une standardisation du nombre de cellules produites dans chaque lignée selon la méthode de Vaganov (1990). La méthode complète utilisée pour cette étude est décrite dans Deslauriers (1999).

Une analyse de variance (ANOVA) à mesures répétées à deux facteurs a été effectuée afin de comparer les paramètres anatomiques entre les différentes années. Les facteurs fixes sont le traitement et les années. Les blocs sont aléatoires et les arbres sont le sujet. Les années sont les mesures répétées. Les valeurs sont transformées si nécessaire, afin de respecter les conditions d'homogénéité des variances et de normalité. La matrice de variance-covariance a été sélectionnée par le critère AIC (Akaike, 1987). La matrice correspondant le plus aux présentes données est l'autorégressive (Ar(1)) dû à l'autocorrélation entre les valeurs. Les paramètres anatomiques ont été séparés

préalablement à l'analyse, en fonction du bois initial et final. Si cette analyse donne un résultat significatif, un test de comparaisons multiples par tranche (*slice test*) est effectué afin de déterminer où se trouve la différence.

Une deuxième analyse de variance (ANOVA) à mesures répétées est effectuée sur les stations traitées afin d'observer les différences entre les différentes années. Le facteur fixe est les années (2 ans et 1 an avant l'intervention, 3 ans et 4 ans après l'intervention) et le facteur aléatoire est les blocs. Si le résultat est significatif, un test de comparaisons multiples de Tukey-Kramer est utilisé pour déterminer entre quelles années se trouvent les différences.

Houppier et branches

Houppier

La longueur du houppier de chaque arbre sélectionné a été mesurée sur le terrain une fois l'arbre abattu, afin d'avoir la mesure la plus exacte possible. Il s'agit de mesurer la longueur entre la cime de l'arbre et sa première branche verte à partir de la base de l'arbre. Les valeurs sont ensuite transformées en valeurs relatives afin de rendre possible la comparaison entre les stations traitées et les stations témoins pour chaque intervention (Formule 6).

(Formule 6)

$$L.H.R. = L.H / H.A.$$

Où : **L.H.R.** = Longueur du houppier relative

L.H. = Longueur du houppier [m]

H.A. = Hauteur de l'arbre [m]

Une analyse de variance (ANOVA) à un facteur a été utilisée afin de comparer la longueur relative du houppier des stations traitées aux stations témoins. Le facteur fixe étant le traitement, l'aléatoire le bloc et le sujet, l'arbre.

Diamètre des branches

Afin d'évaluer l'impact des interventions sur la dimension des branches, la longueur du houppier mesuré précédemment a été divisée en cinq sections de même longueur. La section 1 étant celle à la base du houppier et la section 5, celle au sommet (Figure 5). Dans chacune des sections du houppier, les cinq plus grosses branches ont été mesurées, de préférence à l'endroit où se situent les verticilles, lorsque ceux-ci étaient visibles. Les diamètres horizontaux et verticaux de ces branches ont été mesurés et une moyenne de ces deux mesures constitue le diamètre final de la branche.

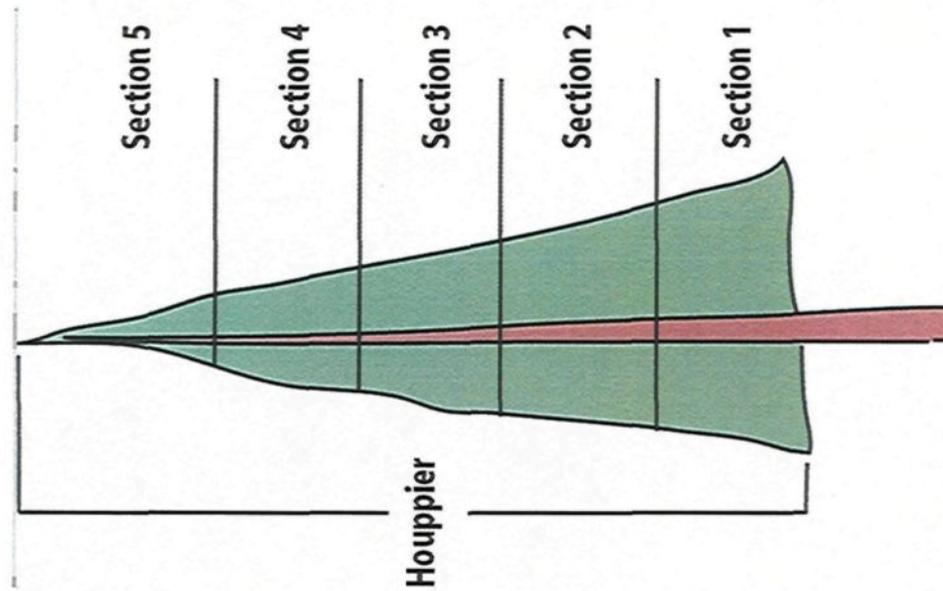


Figure 5. Représentation schématique des différentes sections du houppier.

Les valeurs ont d'abord été comparées entre les stations témoins et traitées en fonction des sections. Une analyse de covariance (ANCOVA) à mesures répétées a été effectuée. La covariable étant le diamètre des arbres à hauteur de poitrine (DHP), celui-ci ayant un impact direct sur le diamètre des branches. Les mesures répétées sont les sections du houppier. Une moyenne globale du diamètre des branches présentes dans toutes les sections réunies a ensuite été calculée, et cette moyenne a été comparée entre les stations traitées et témoins, avec l'analyse de covariance (ANCOVA).

RÉSULTATS

Caractérisation des stations et évaluation de la variabilité intra-station

Caractérisation des stations

L'analyse dendrochronologique permet la comparaison de la croissance radiale, sur une longue période, entre les stations traitées et celles témoins. Avant l'intervention, l'EC et la CPPTM avaient un patron de croissance radiale semblable à leurs témoins (Figure 6), et on constate une diminution de la croissance une vingtaine d'années avant le traitement. Dans le cas des stations de CPRS, la croissance radiale ne présente pas de réduction avant l'intervention, mais la croissance était déjà très faible pour ces arbres.

Il est possible d'observer une augmentation de l'indice de croissance suivant les trois interventions. Dans le cas de l'EC et de la CPPTM, cette augmentation est également observée pour les peuplements témoins (Figure 6). Par contre, après la CPPTM, l'augmentation est plus importante dans les stations traitées; il est également possible d'observer une augmentation de la croissance moyenne du peuplement à la suite de la CPRS (Figure 6).

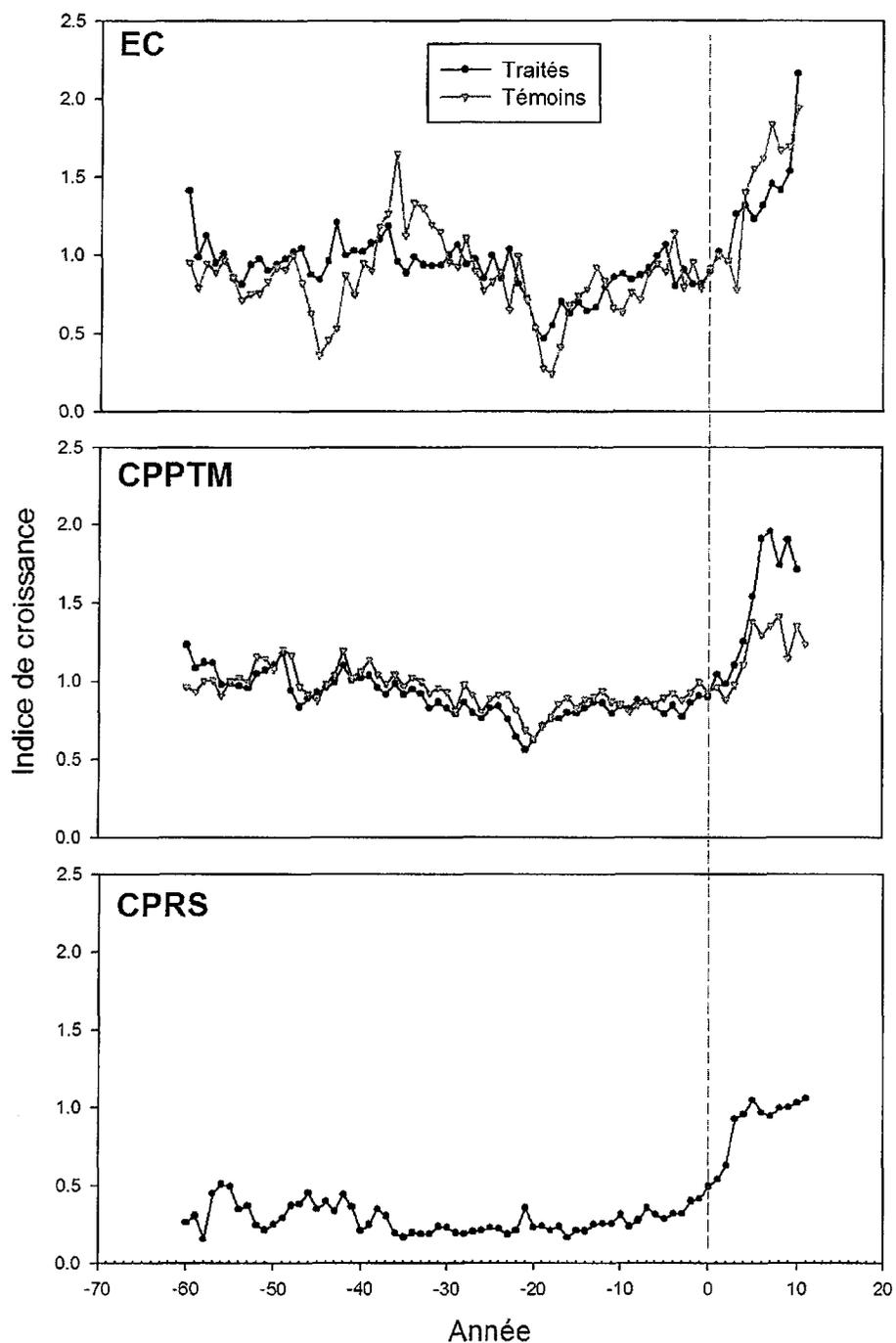


Figure 6. Courbes moyennes de l'indice de croissance radiale (sans unité) à l'échelle du peuplement, par intervention. La ligne pointillée représente l'année de l'intervention. Seule une station témoin est présentée contre cinq traitées pour les EC.

Évaluation de la variabilité intra-station

Chaque arbre réagit différemment aux interventions (Figure 7). 65 % des individus augmentent leur croissance radiale après l'EC, 62 % dans le cas de la CPPTM et 95 % pour la CPRS (classe 3-4-5; Figure 7). De ceux-ci, 76 % des individus doublent leur croissance radiale après la CPRS tandis que seulement 28 % le font après l'EC et 37 % à la suite de la CPPTM (classe 5; Figure 7). En réaction aux trois interventions, certains individus ont une diminution de leur croissance radiale (classe 1; Figure 7). C'est après la CPPTM que l'on retrouve la plus grande proportion d'individus avec cette diminution, soit 19 %, par rapport à 8 % pour l'EC et 5 % pour la CPRS (Figure 7). Dans les stations témoins, il y a un nombre important d'individus avec une forte augmentation de croissance (classe 5), soit 42 % et 24 % pour l'ECTEM et la CPTM respectivement.

Les individus présents dans la classe 5 sont ceux avec la plus faible croissance dans les 20 années précédant l'EC et la CPPTM (Figure 8). Cette distinction est plus difficile à faire dans le cas de la CPRS. En contrepartie, on observe que ceux présentant une diminution de croissance radiale sont ceux ayant la plus forte croissance dans les années précédant l'intervention (Figure 8). Consécutivement à l'EC et à la CPPTM, les arbres de la classe 5 (en vert) ont augmenté leur croissance dès la première année suivant la coupe, contrairement à ceux présents dans les classes 3 et 4, où l'on observe que l'augmentation se produit à partir de la troisième année (Figure 8). Quant à elle, la diminution de croissance (classe 1) semble survenir à la première année suivant les trois interventions (Figure 8).

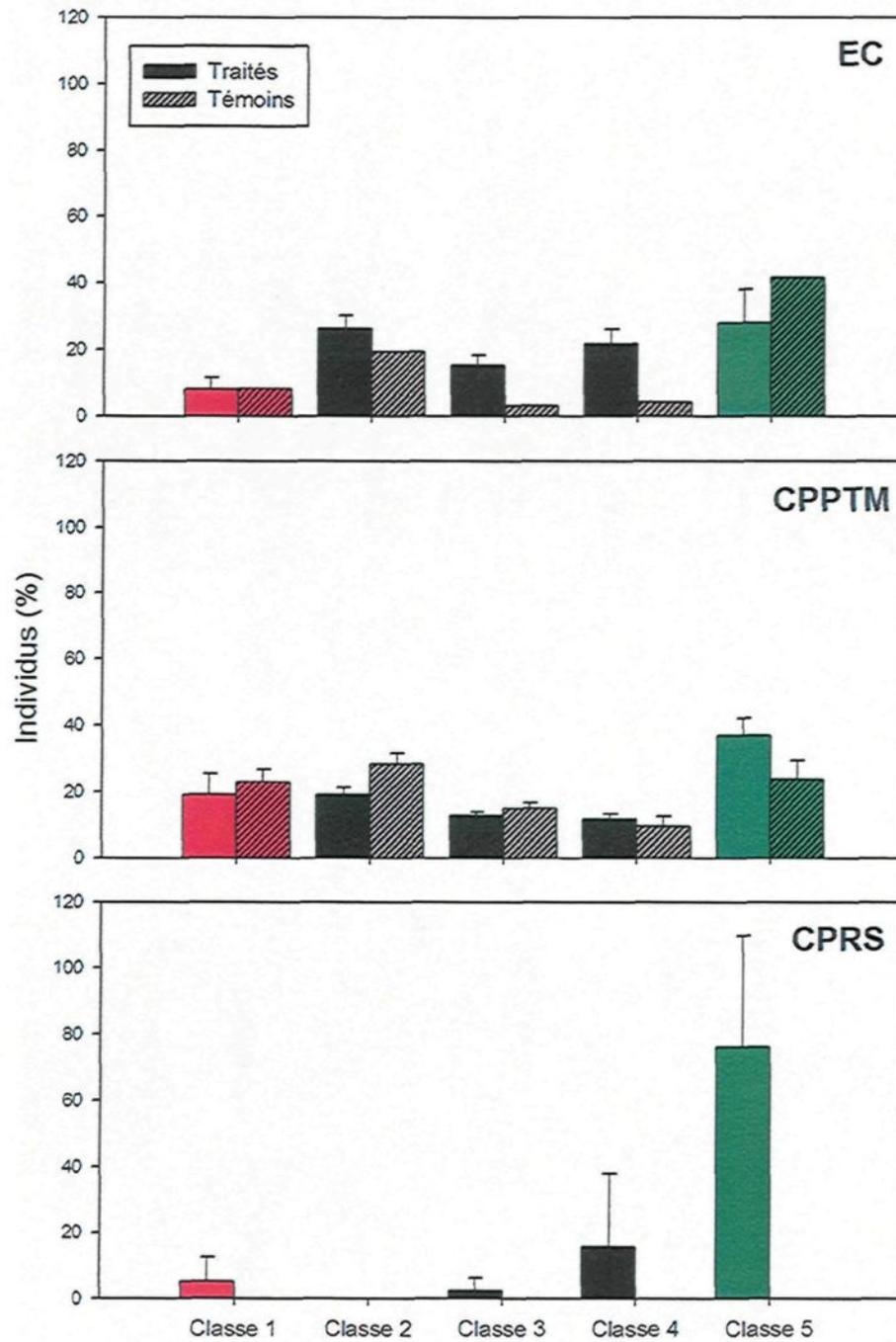


Figure 7. Histogramme représentant la distribution des arbres (%), avec les écarts-types, en fonction des différentes classes d'accroissement, selon chaque type d'intervention.

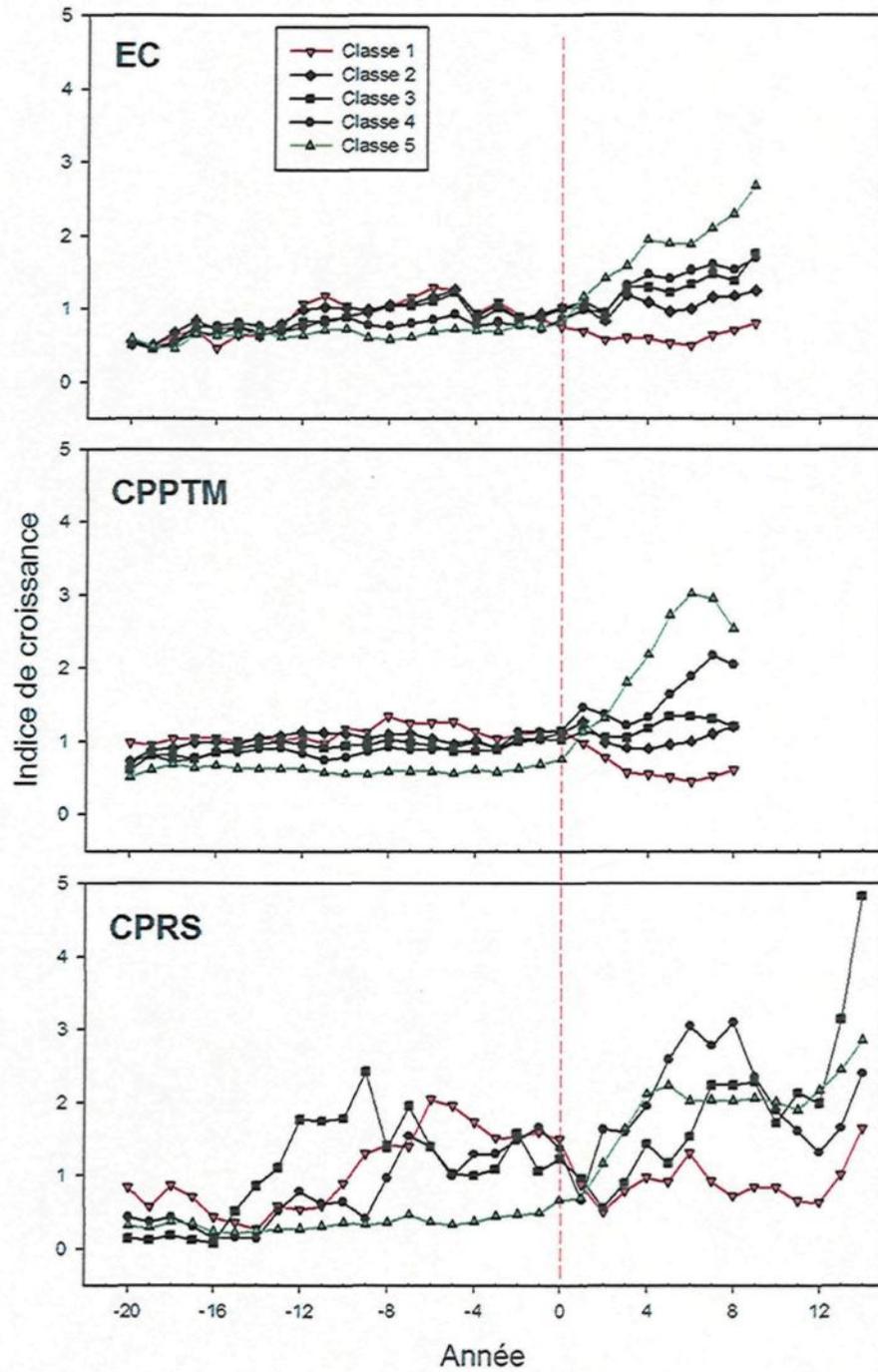


Figure 8. Courbes moyennes de l'indice d'accroissement radial (sans unité) en fonction des différentes classes d'accroissement, par intervention. La ligne pointillée représente l'année de l'intervention.

Analyses détaillées des épinettes noires : croissance et qualité du bois

Dans cette section, cinq individus par station, pour un total de 120 arbres, ont été échantillonnés et la totalité des résultats présentés provient de ces individus.

Volume annuel

Le volume de bois produit avant et après les interventions a été comparé avec celui produit par les stations témoins. Avant l'EC, les stations traitées et témoins avaient une production en volume de bois annuel significativement différente ($p=0,0063$; Tableau 2; Figure 9), les stations traitées ayant un accroissement annuel plus faible. Malgré la différence significative démontrée par l'ANOVA à mesures répétées après l'intervention ($p=0,0011$; Tableau 2), le test de comparaisons multiples par tranche révèle que cette différence se situe seulement dans les trois premières années, à la suite de quoi l'augmentation du volume annuel des stations traitées a été suffisante pour compenser l'écart qu'il y avait avec les stations témoins (Figure 9).

Le volume de bois annuellement produit était semblable avant la CPPTM entre les stations traitées et celles témoins (Tableau 2). Après le traitement sylvicole, il y a une augmentation du volume de bois produit dans les stations traitées et celle-ci est significative ($p=0,0173$; Tableau 2). Toutefois, le test de comparaisons multiples par tranche n'a pas permis de déceler des différences entre années semblables entre les arbres traités et les témoins (Figure 9). Il y a une forte augmentation de volume de bois total à la suite de la CPRS (Tableau 3; Figures 9).

Lorsque comparé avec la moyenne des dix années précédant l'intervention, le volume annuel produit dans les stations traitées augmente seulement après un délai de

quelques années subséquemment aux trois interventions; la différence entre les années étant hautement significative ($p < 0,0001$; Tableau 3). D'après le test de comparaisons multiples de Tukey-Kramer, les données deviennent significatives à la 2^e année à la suite de l'EC et de la CPRS et après la 3^e année pour la CPPTM (Figure 10).

Tableau 2. Résultats des analyses de variance (ANOVA) à mesures répétées par période (avant/après) du volume annuel, du volume en bois final, du pourcentage de volume en bois final et de la masse volumique du bois en fonction des traitements (Tr= traités vs témoins) et des années (An).

Paramètre	Période	Source	EC			CPPTM			CPRS		
			DL*	F ratio	Prob>F	DL*	F ratio	Prob>F	DL*	F ratio	Prob>F
Volume annuel	Avant	Tr	1	11,71	0,0173	1	14,58	0,1796	.	.	.
		An	19	22,98	<0,0001	19	2,64	<0,0001	19	2,90	0,0007
		Tr*An	19	2,37	0,0063	19	0,21	0,9998	.	.	.
	Après	Tr	1	6,28	0,2124	1	7,25	0,5473	.	.	.
		An	9	2,49	<0,0001	8	0,43	<0,0001	18	57,06	<0,0001
		Tr*An	9	4,49	0,0011	8	2,88	0,0173	.	.	.
Volume Bois Final	Avant	Tr	1	9,89	0,0303	1	10,77	0,2228	.	.	.
		An	19	15,07	<0,0001	19	2,08	<0,0001	19	0,84	0,6483
		Tr*An	19	1,75	0,0545	19	0,49	0,9580	.	.	.
	Après	Tr	1	5,65	0,4378	1	4,89	0,3877	.	.	.
		An	9	0,80	0,0002	8	0,94	0,0007	18	42,54	<0,0001
		Tr*An	9	8,09	<0,0001	8	0,95	0,4907	.	.	.
Volume Bois Final (%)	Avant	Tr	1	3,86	0,1441	1	1,66	0,2666	.	.	.
		An	19	2,58	0,0031	19	1,22	0,2680	19	0,65	0,8548
		Tr*An	19	0,59	0,8971	19	0,96	0,5148	.	.	.
	Après	Tr	1	2,00	0,2526	1	1,92	0,2380	.	.	.
		An	9	2,13	0,0619	8	1,34	0,2641	18	2,43	0,0054
		Tr*An	9	0,62	0,7729	8	1,08	0,4071	.	.	.
Masse volumique	Avant	Tr	1	2,58	0,2745	1	5,08	0,4958	.	.	.
		An	19	1,78	0,0031	19	0,27	0,0516	19	7,14	<0,0001
		Tr*An	19	0,63	0,8685	19	1,25	0,2328	.	.	.
	Après	Tr	1	1,72	0,6381	1	0,97	0,0627	.	.	.
		An	9	0,56	0,0005	8	6,56	0,4779	18	16,19	<0,0001
		Tr*An	9	1,26	0,3081	8	2,23	0,0546	.	.	.

*DL=degré de liberté au numérateur

Tableau 3. Résultats des analyses de variance (ANOVA) à mesures répétées du volume annuel, du volume en bois final, du pourcentage de volume en bois final et de la masse volumique du bois des stations traitées en fonction des années (An).

Paramètre	Source	EC			CPPTM			CPRS		
		DL*	F ratio	Prob>F	DL*	F ratio	Prob>F	DL*	F ratio	Prob>F
Volume annuel	An	10	15,19	<0,0001	9	8,64	<0,0001	19	59,27	<0,0001
Volume bois Final	An	10	12,75	<0,0001	9	7,09	<0,0001	19	47,81	<0,0001
Volume bois final (%)	An	10	1,68	0,1205	9	1,35	0,2517	19	3,83	<0,0001
Masse volumique	An	10	6,04	<0,0001	9	2,14	0,0539	19	23,25	<0,0001

*DL=degré de liberté au numérateur

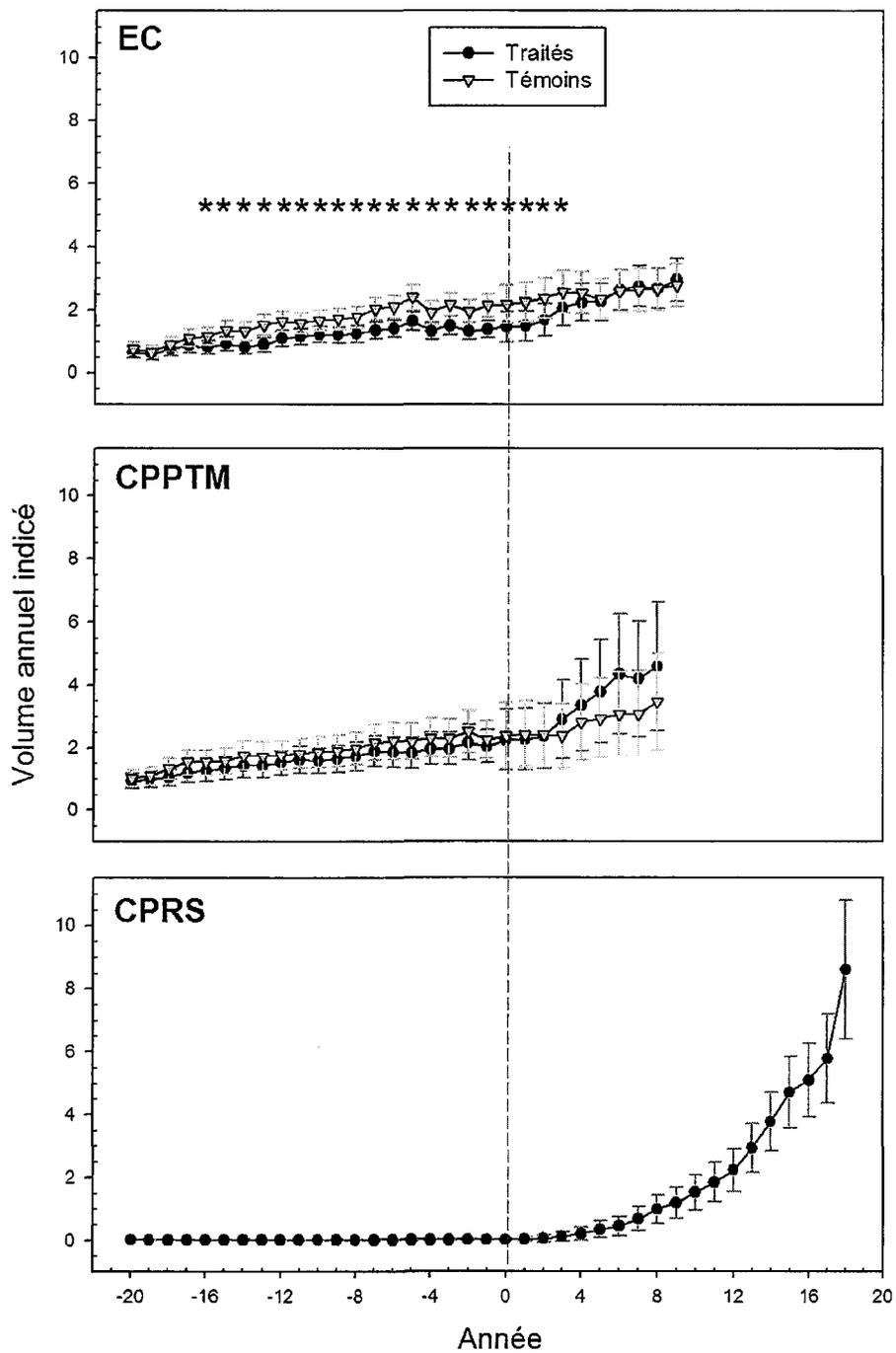


Figure 9. Courbes moyennes d'accroissement annuel en volume indicé (sans unité) avec les intervalles de confiance, par intervention, comparées avec les stations témoins. La ligne pointillée représente l'année de l'intervention. Les astérisques (*) représentent les résultats significatifs du test de comparaisons multiples par tranche.

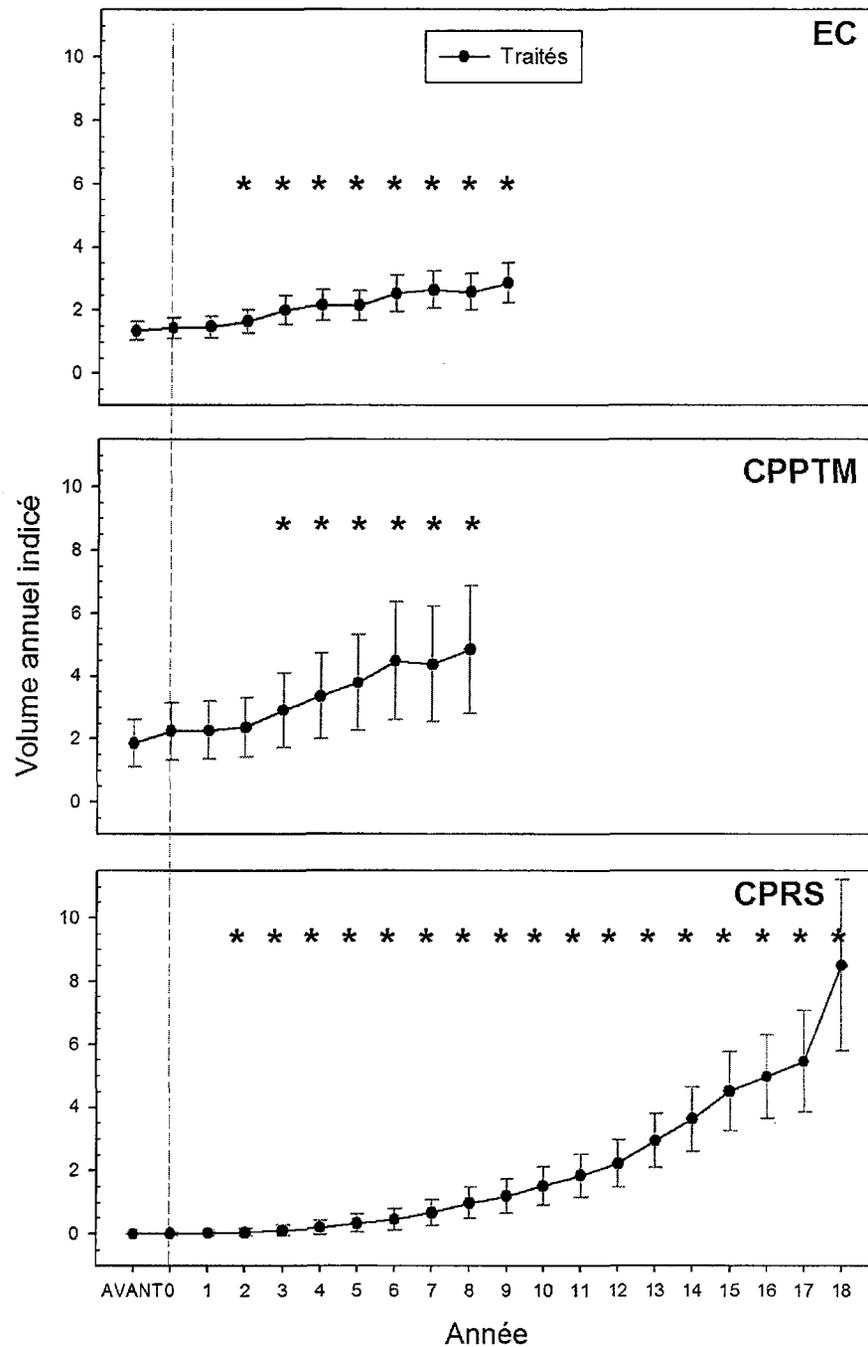


Figure 10. Courbes moyennes d'accroissement en volume annuel indicé (sans unité) avec les intervalles de confiance, des stations traitées. Comparaison de toutes les années suivant l'intervention avec la moyenne des dix années (AVANT) précédant celle-ci. La ligne pointillée représente l'année de l'intervention. Les astérisques (*) représentent les résultats significatifs du test de comparaisons multiples de Tukey-Kramer.

Volume de bois final

Le patron observé, pour le volume de bois final produit annuellement, est semblable à celui du volume total. Une différence significative avec les stations témoins est remarquée suivant l'EC ($p < 0,0001$; Tableau 2), mais pour les années 0 à 2 ans seulement, après quoi, le volume en bois final augmente compensant ainsi la différence qu'il y avait avec les témoins (Figure 11). L'interaction entre le traitement et les années n'est pas significative après la CPPTM (Tableau 2), il y a des différences significatives entre les stations traitées et celles témoins, autant avant qu'après l'intervention (Tableau 2).

Lorsque comparée avec la moyenne des dix années précédant l'intervention, l'augmentation en volume de bois final annuel dans les stations traitées présente également un délai pour les trois interventions, la différence entre les années étant significative ($p < 0,0001$; Tableau 3). Le test de comparaisons multiples de Tukey-Kramer démontre que l'augmentation survient à partir de la 2^e année après l'EC et la CPPTM et à partir de la 3^e année dans le cas de la CPRS (Figure 12).

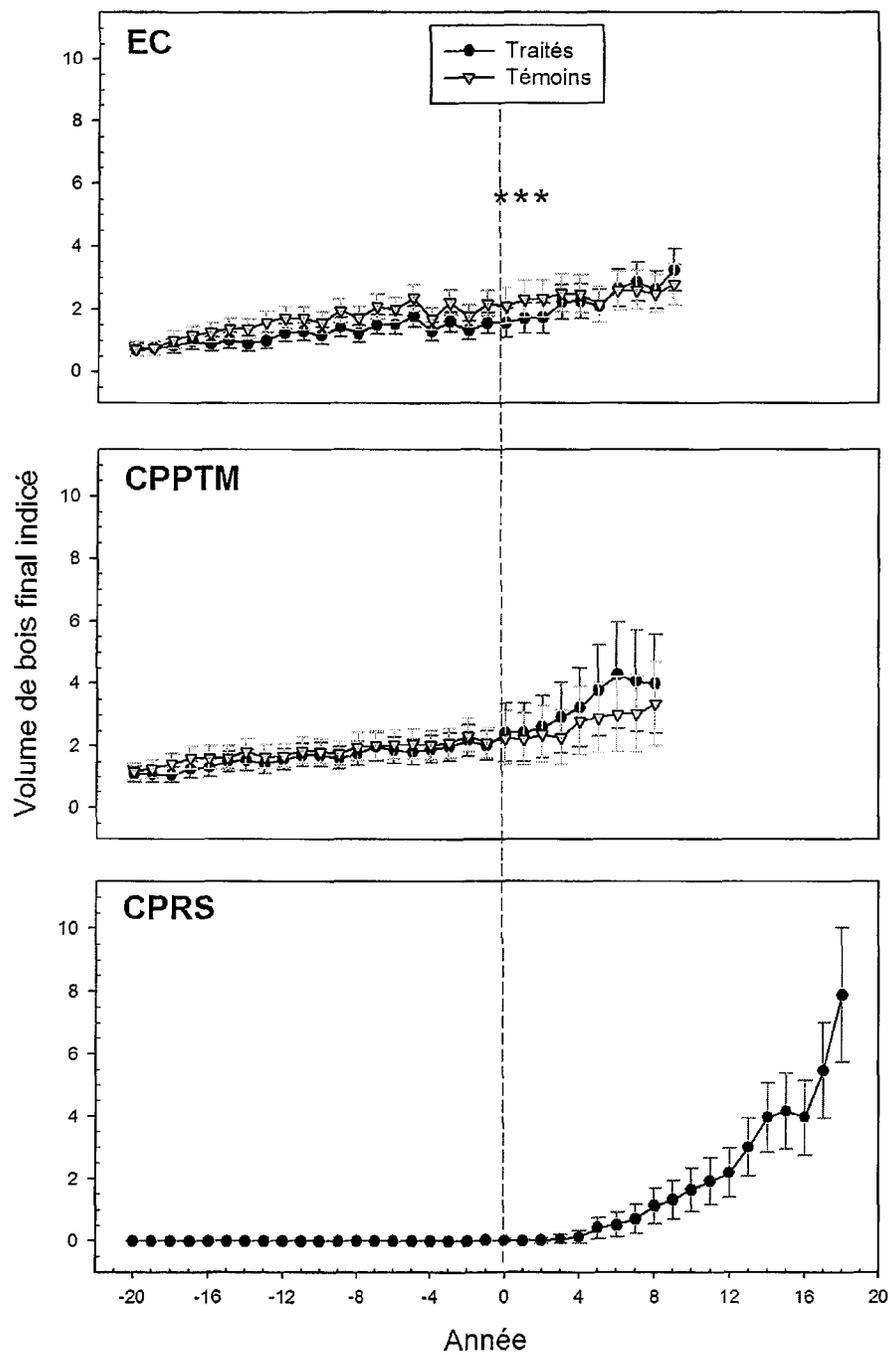


Figure 11. Courbes moyennes d'accroissement annuel en volume de bois final indicé (sans unité) avec les intervalles de confiance, par intervention, comparées avec les stations témoins. La ligne pointillée représente l'année de l'intervention. Les astérisques (*) représentent les résultats significatifs du test de comparaisons multiples par tranche.

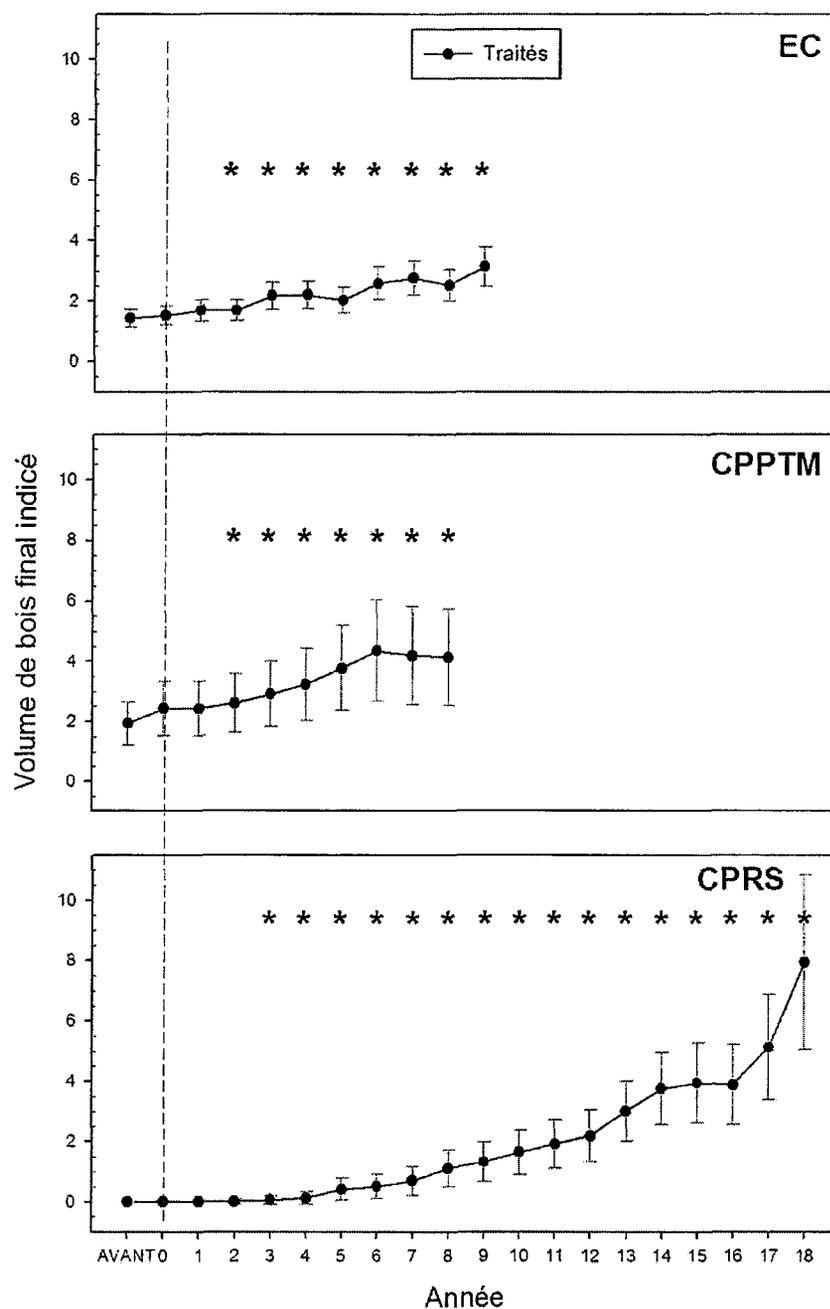


Figure 12. Courbes moyennes d'accroissement en volume de bois final annuel indicé (sans unité) avec les intervalles de confiance, des stations traitées. Comparaison de toutes les années suivant l'intervention avec la moyenne des dix années (AVANT) précédant celle-ci. La ligne pointillée représente l'année de l'intervention. Les astérisques (*) représentent les résultats significatifs du test de comparaisons multiples de Tukey-Kramer.

La moyenne du pourcentage de bois final avant et après l'EC est semblable, soit respectivement 8,4 % et 8,0 % (Figure 13). Effectivement, il n'y a pas de différence significative avec les témoins (Tableau 2; Figure 13), ni de différence avec la moyenne des dix années précédentes (Tableau 3; Figure 14). Même constatation pour les CPPTM, la moyenne de ce pourcentage passe de 13,1 % à 12,9 % et il n'y a aucune différence significative (Tableau 2). Cependant, c'est à la dernière année mesurée qu'est observé le plus faible pourcentage, soit de 11,0 %, donc près de 2 % de moins que la moyenne mesurée avant l'intervention (Figure 14).

Considérant la faible dimension des arbres dans les peuplements de CPRS, le volume annuel total et de bois final avant la coupe était très faible, soit près de 0 (Figures 9 et 11). De cette manière, en augmentant le volume de bois produit (Figure 9), on constate une augmentation du pourcentage de volume de bois final ($p < 0,0001$; Tableau 3; Figures 13 et 14). Cette augmentation débute à la 3^e année (Figure 14), ce qui correspond à l'année où l'augmentation significative dans le volume de bois final est observée (Figure 12). À la suite de la CPRS, la moyenne passe de 0,4 % à 7,95 % (Figure 13).

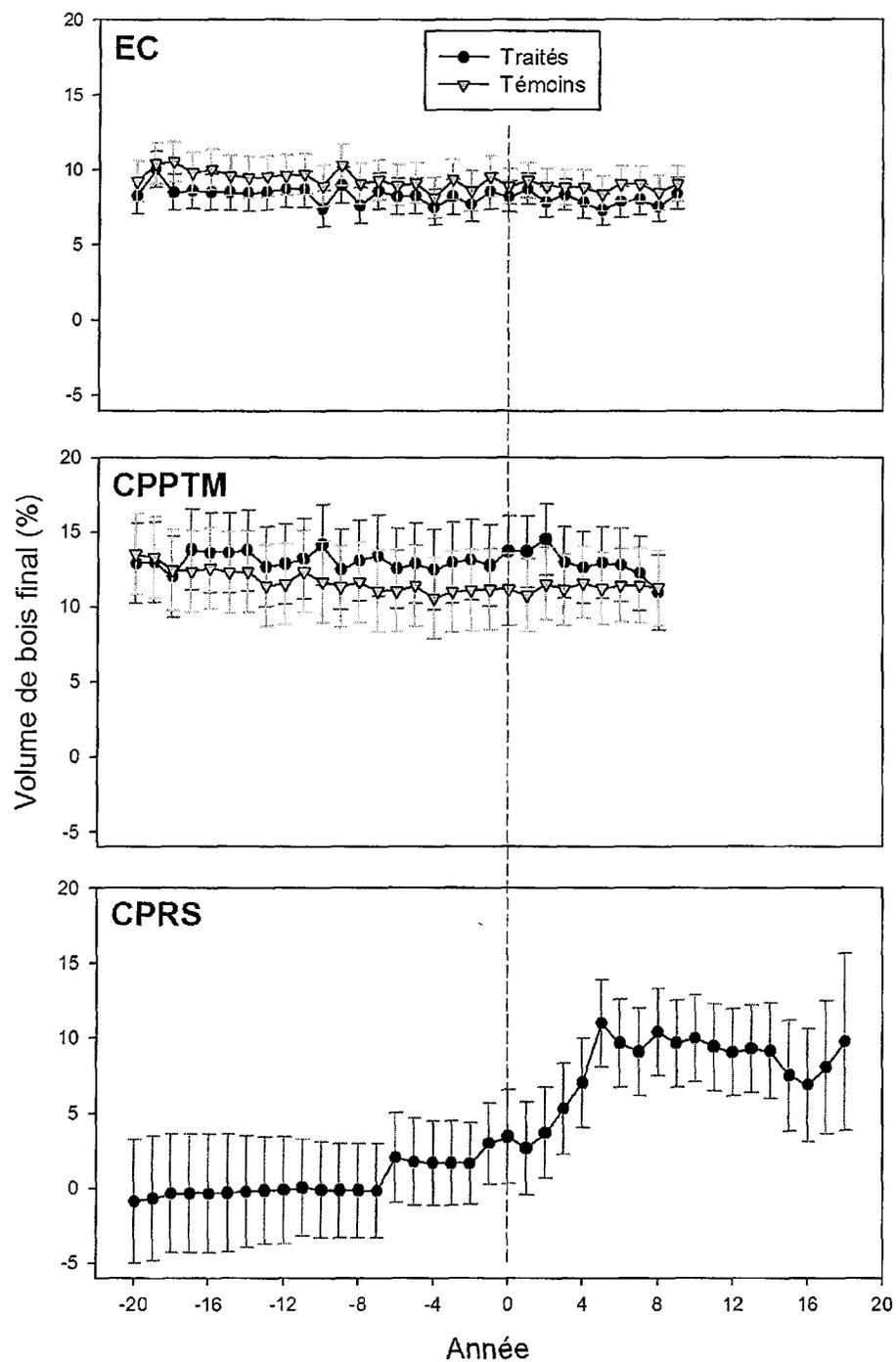


Figure 13. Courbes moyennes d'accroissement du volume en bois final annuel (%), avec les intervalles de confiance, par intervention, comparées avec les stations témoins. La ligne pointillée représente l'année de l'intervention.

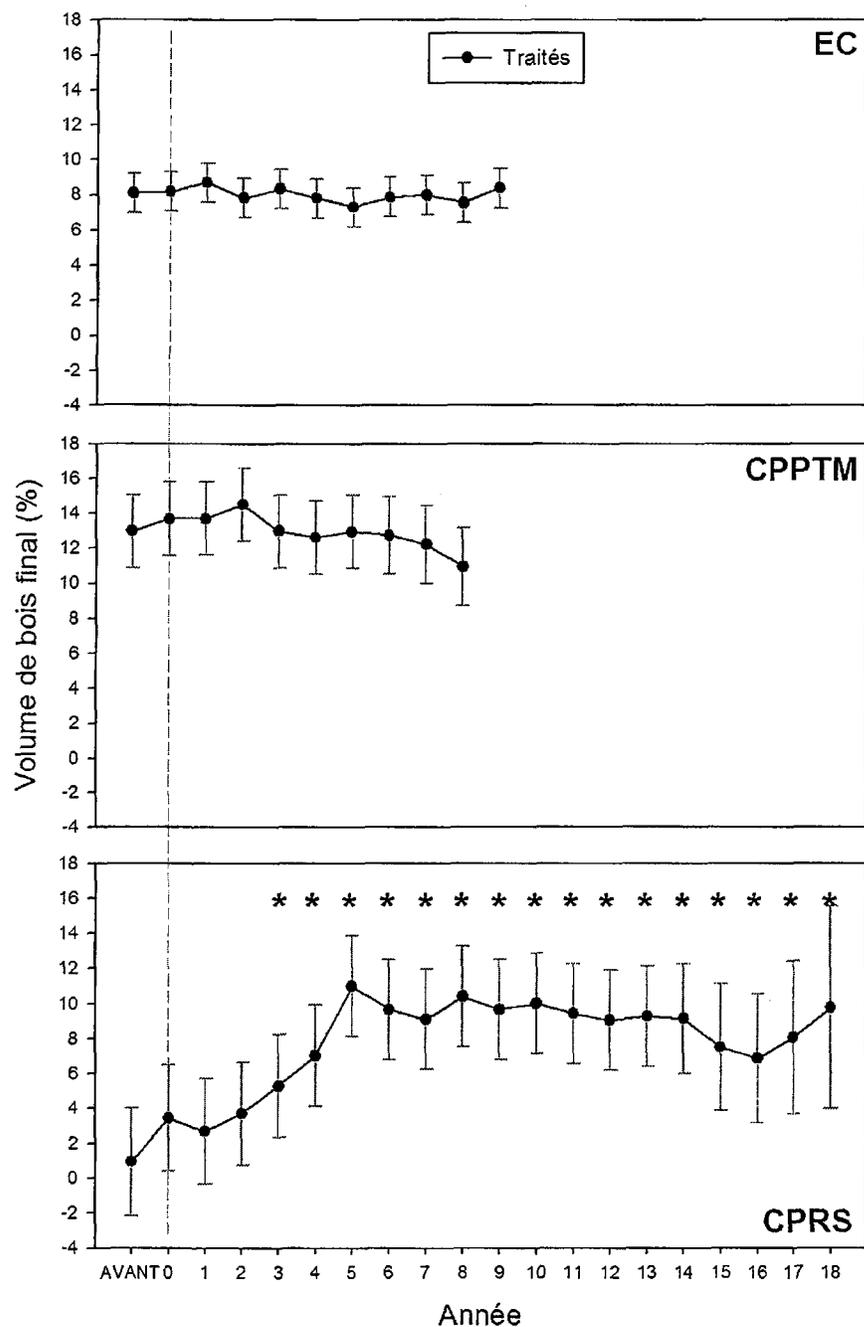


Figure 14. Courbes moyennes du volume en bois final annuel (%) avec les intervalles de confiance, des stations traitées. Comparaison de toutes les années suivant l'intervention avec la moyenne des dix années (AVANT) précédant celle-ci. La ligne pointillée représente l'année de l'intervention. Les astérisques (*) représentent les résultats significatifs du test de comparaisons multiples de Tukey-Kramer.

Masse volumique du bois

La masse volumique du bois a été mesurée à 1,3 m pour l'EC et les CPPTM et à 0 m pour les CPRS. L'analyse de la variation de la masse volumique en fonction de l'âge cambial s'est effectuée uniquement avec les arbres provenant des stations témoins.

Une forte diminution de la masse volumique moyenne se produit dans les premières années de l'épinette noire (Figure 15). Vers la 20^e année cambiale, la masse volumique augmente légèrement, pour enfin se stabiliser, malgré des variations interannuelles importantes (Figure 15). La période de faible masse volumique, de 0 à 20 ans, est approximativement considérée comme la période de bois juvénile.

La moyenne de la masse volumique après l'EC diminue de 459 kg/m³ à 442 kg/m³ pour les stations traitées et de 451 kg/m³ à 436 kg/m³ pour les témoins (Figure 16), et aucune différence significative n'est observée (Tableau 2), les deux courbes ayant le même patron. Par contre, il y a une différence significative pour les mesures des stations traitées à la deuxième et à partir de la quatrième année après l'intervention, lorsqu'elles sont comparées avec la moyenne des dix années précédant la coupe ($p < 0,0001$; Tableau 3, Figure 17).

À la suite de la CPPTM, il y a une diminution non significative de la masse volumique, autant en la comparant aux témoins (Tableau 2; Figure 16) qu'à la moyenne des dix années précédant la coupe (Tableau 3; Figure 17) et ce, malgré une diminution de près de 35 kg/m³ à son plus bas, à la 3^e année (Figure 17).

La moyenne de la masse volumique est près de 649 kg/m^3 avant la CPRS et diminue significativement après celle-ci ($p < 0,0001$; Tableau 3; Figures 16 et 17). Cette diminution commence dès l'année de l'intervention et atteint son minimum à la 16^e année avec une masse volumique de 399 kg/m^3 (Figure 17).

Le bois final ayant une masse volumique supérieure au bois initial, il existe une variabilité intra-cerne (Figure 18). À la suite de l'EC, il n'y a aucun changement, tant pour le bois initial que final. Les résultats sont semblables après la CPPTM. Dans le cas de la CPRS, il y a une diminution de la masse volumique pour les deux types de bois et le taux de diminution est plus élevé pour le bois initial (Figure 18).

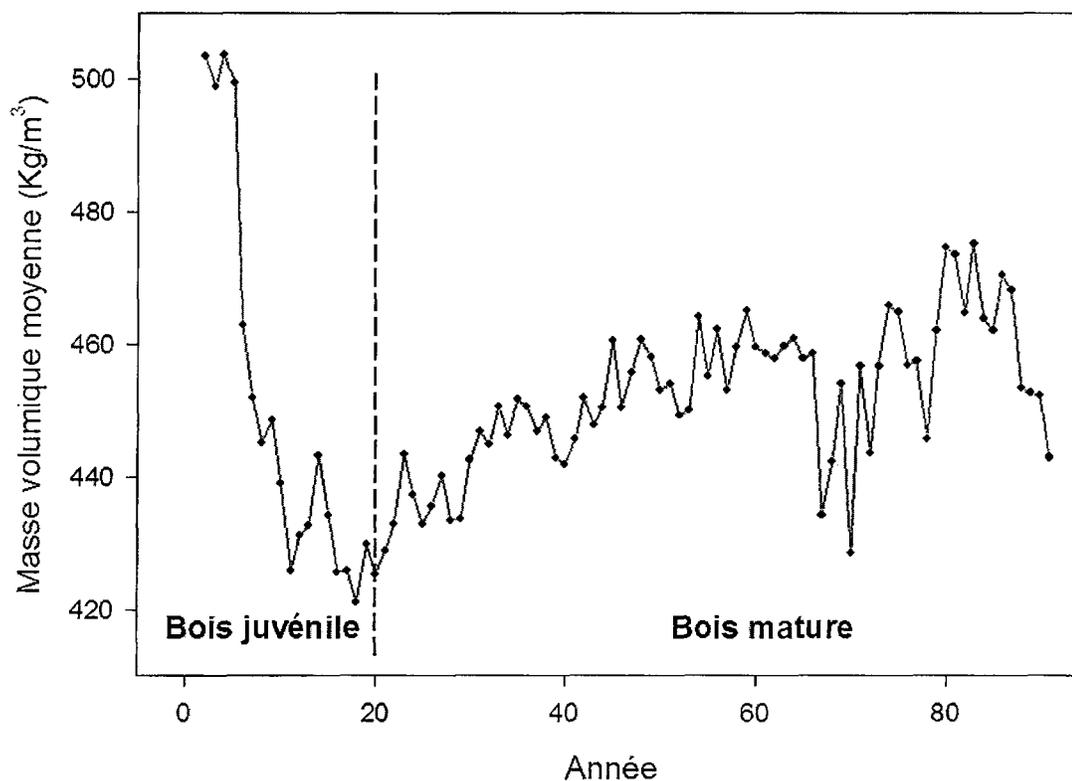


Figure 15. Variation radiale moyenne de la masse volumique (Kg/m^3) de l'épinette noire (arbres témoins) en fonction de l'âge cambial. La ligne pointillée représente la transition approximative entre le bois juvénile et le bois mature.

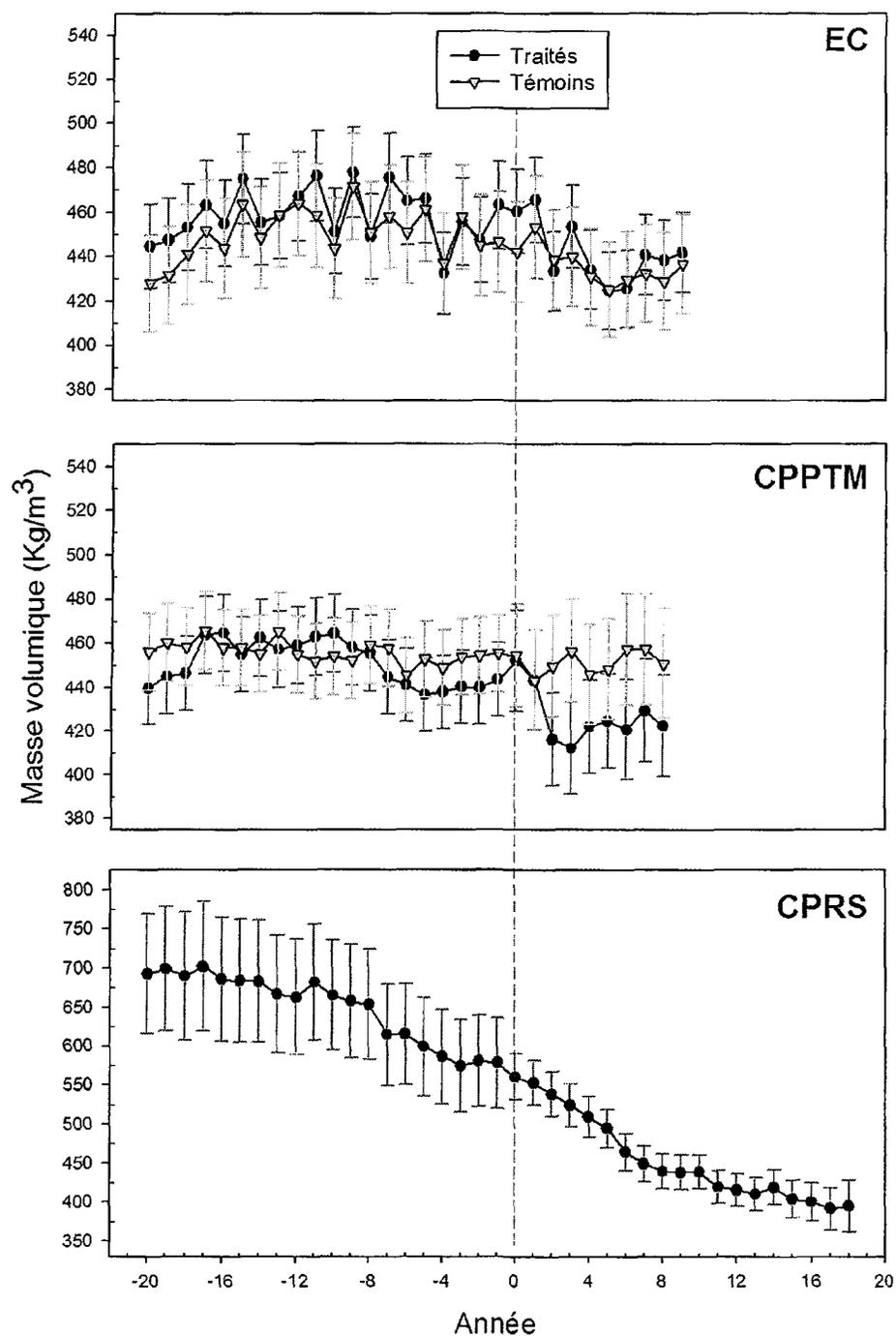


Figure 16. Courbes moyennes de la masse volumique annuelle (Kg/m³) avec les intervalles de confiance, par intervention, comparées avec les stations témoins. La ligne pointillée représente l'année de l'intervention. Les astérisques (*) représentent les résultats significatifs du test de comparaisons multiples par tranche.

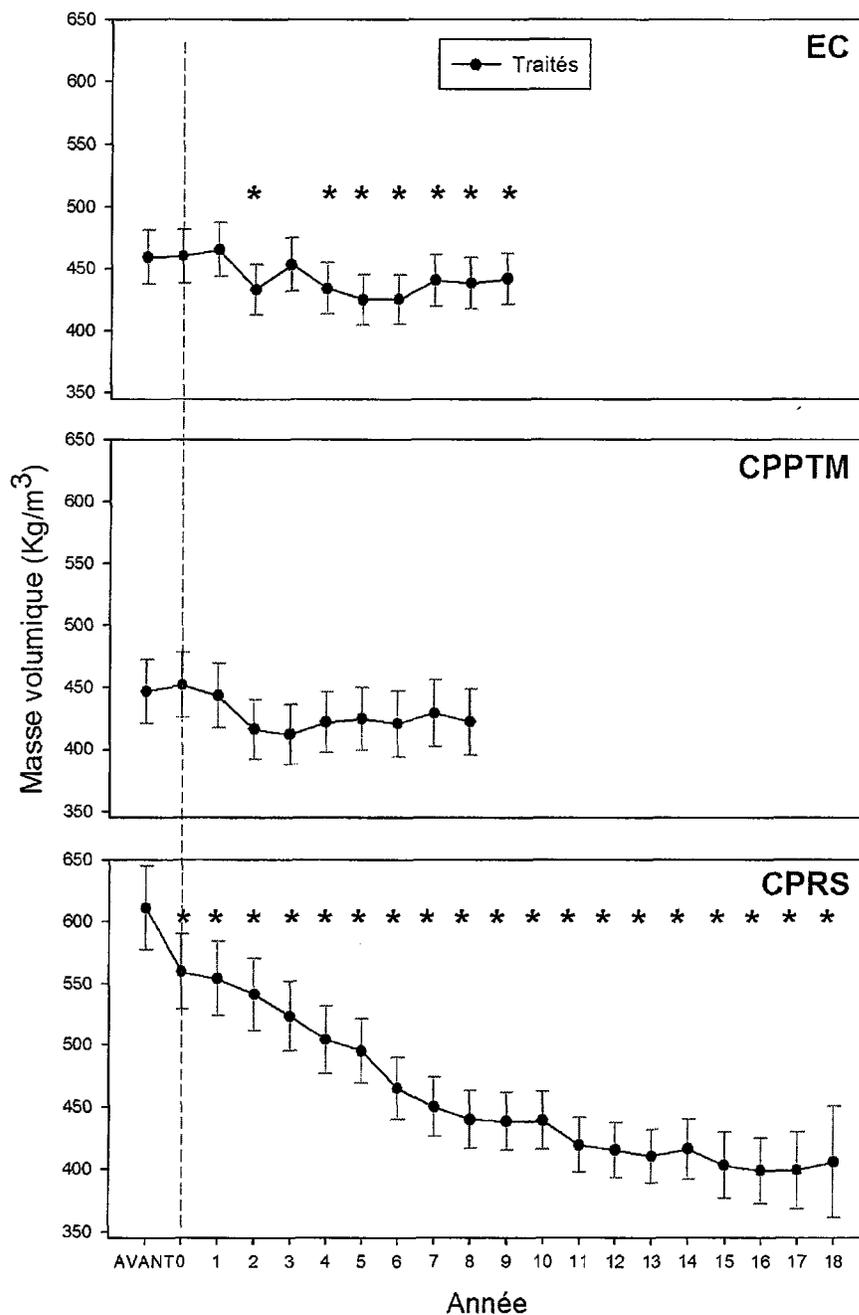


Figure 17. Courbes moyennes de la masse volumique annuelle (Kg/m³) avec les intervalles de confiance, des stations traitées. Comparaison de toutes les années suivant l'intervention avec la moyenne des dix années (AVANT) précédant celle-ci. La ligne pointillée représente l'année de l'intervention. Les astérisques (*) représentent les résultats significatifs du test de comparaisons multiples de Tukey-Kramer.

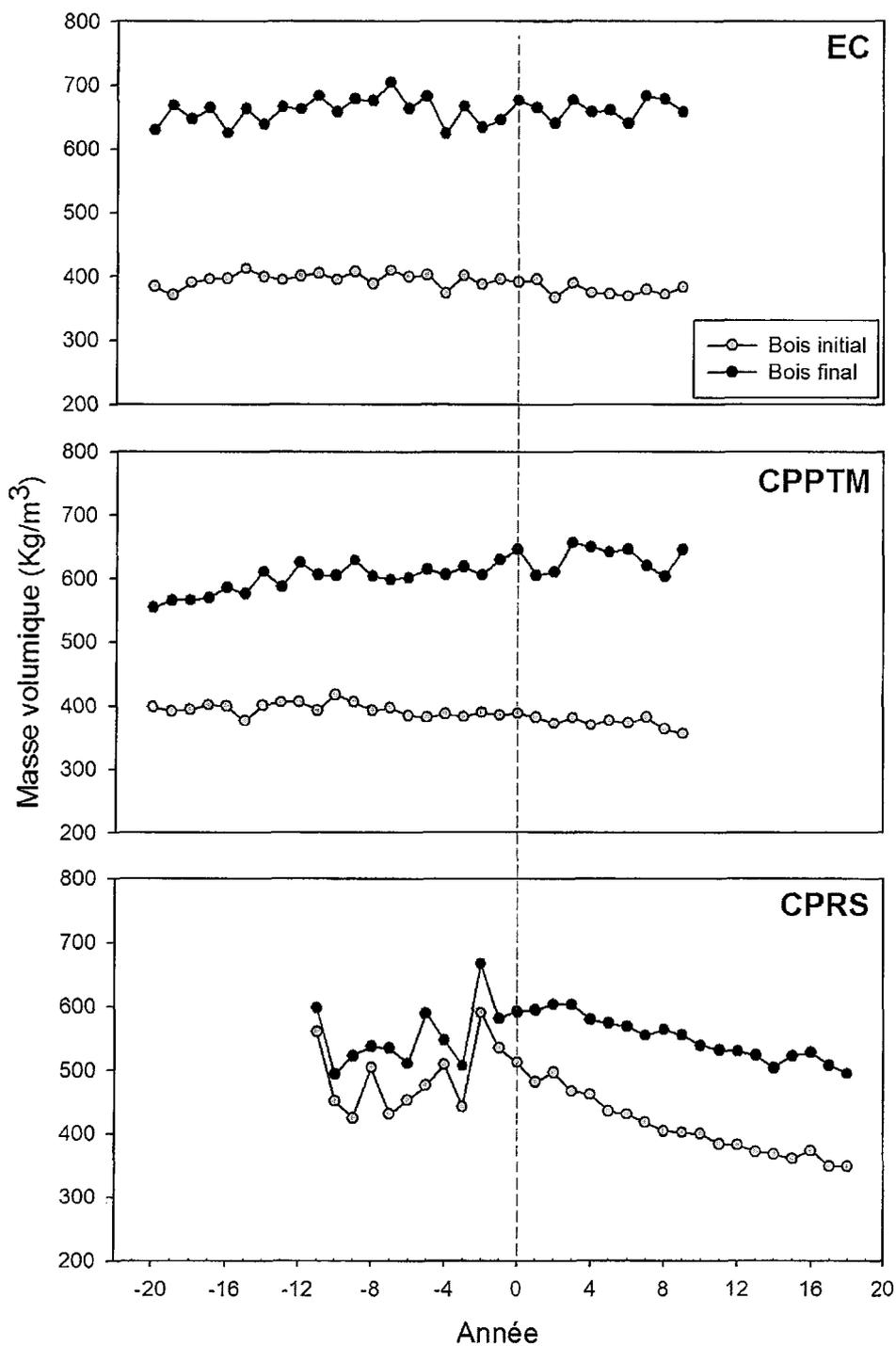


Figure 18. Courbes moyennes de la masse volumique annuelle (Kg/m³) avec les intervalles de confiance, des stations traitées. Comparaison entre la densité du bois initial et du bois final. La ligne pointillée représente l'année de l'intervention.

Paramètres anatomiques

L'analyse des paramètres anatomiques a été effectuée à 1.3 m. L'ensemble des paramètres anatomiques est resté inchangé à la suite de l'EC, autant pour le bois initial que pour le bois final (Tableau 4; Figures 19, 20 et 21). Après la CPPTM, seule l'épaisseur des parois cellulaires des cellules du bois initial diminue significativement en comparaison aux stations témoins ($p=0,0062$; Tableau 4). La moyenne des deux années précédant la coupe est de $2,4 \mu\text{m}$ pour atteindre une moyenne de $2,1 \mu\text{m}$ à la suite de la coupe, tandis que le témoin ne varie que de $2,4 \mu\text{m}$ à $2,5 \mu\text{m}$ (Figure 20).

L'aire du lumen reste inchangée à la suite de l'EC et de la CPPTM, autant pour le bois initial que final (Tableau 4; Figure 19). Suivant la CPRS, il y a augmentation significative de l'aire du lumen pour le bois initial ($p=0,0003$, Tableau 4) ainsi que pour le bois final ($p=0,0030$, Tableau 4). L'aire du lumen des deux années précédant l'intervention est en moyenne de $188,0 \mu\text{m}^2$ pour le bois initial et passe à une moyenne de $263,1 \mu\text{m}^2$ après la coupe; la moyenne pour le bois final, quant à elle, passe de $56,4 \mu\text{m}^2$ à $87,0 \mu\text{m}^2$ (Figure 19). De plus, comme l'épaisseur des parois cellulaires n'est pas modifiée subséquemment à la CPRS pour les deux types de bois (Tableau 4; Figure 20), le ratio entre l'épaisseur de la paroi et l'aire du lumen, pour le bois initial, est modifié significativement ($p=0,0141$; Tableau 4). Enfin, le nombre de cellules de bois initial formé à la suite de la CPRS augmente significativement, passant d'une moyenne de 9,88 cellules à 49,17 ($p<0,0001$; Tableau 5; Figure 21). Le nombre de cellules de bois final augmente légèrement, mais l'augmentation n'est pas significative ($p=0,1242$; Tableau 5; Figure 21). Ceci signifie qu'avant la CPRS, le nombre de cellules produites dans le bois initial versus le bois final était pratiquement de 1 :1, tandis qu'après celle-ci le ratio passe à près de 4 :1.

Tableau 4. Résultats des analyses de variance (ANOVA) à mesures répétées de l'aire du lumen (μm^2), de l'épaisseur des parois cellulaires (μm), du ratio entre l'épaisseur de la paroi et l'aire du lumen des cellules et du nombre de cellules par cerne et par type de bois (bois initial [Bi] et bois final [Bf]) en fonction des traitements (Tr= traités vs témoins) et des années (An).

Paramètre	Type de bois	Source	DL*	EC		CPPTM		CPRS	
				F ratio	Prob>F	F ratio	Prob>F	F ratio	Prob>F
Aire du lumen	Bi	Tr	1	0,55	0,5115	7,03	0,0569	.	.
		An	3	0,51	0,6883	1,31	0,3155	13,71	0,0003
		Tr*An	3	0,82	0,5131	2,31	0,1278	.	.
	Bf	Tr	1	0,14	0,7333	0,04	0,8582	.	.
		An	3	0,45	0,7242	0,54	0,6668	8,29	0,0030
		Tr*An	3	1,40	0,3064	0,50	0,6861	.	.
Épaisseur des parois	Bi	Tr	1	3,96	0,1407	4,11	0,1125	.	.
		An	3	1,45	0,2924	4,28	0,0286	2,58	0,1025
		Tr*An	3	1,66	0,2438	6,80	0,0062	.	.
	Bf	Tr	1	1,04	0,3821	0,10	0,7730	.	.
		An	3	0,96	0,4514	0,73	0,5520	0,65	0,5987
		Tr*An	3	1,24	0,3512	0,52	0,6746	.	.
Ratio paroi/lumen	Bi	Tr	1	0,03	0,8715	0,01	0,9462	.	.
		An	3	1,05	0,4162	1,92	0,1802	5,38	0,0141
		Tr*An	3	0,94	0,4604	1,79	0,2020	.	.
	Bf	Tr	1	0,06	0,8252	0,49	0,5233	.	.
		An	3	1,74	0,2280	0,55	0,6589	3,36	0,0549
		Tr*An	3	1,70	0,2356	0,20	0,8953	.	.
Nombre de cellules	Bi	Tr	1	0,19	0,6913	0,15	0,7211	.	.
		An	3	3,90	0,0489	0,33	0,8045	20,28	<0,0001
		Tr*An	3	1,63	0,2495	1,68	0,2236	.	.
	Bf	Tr	1	0,12	0,7493	0,00	0,9664	.	.
		An	3	3,06	0,0843	0,81	0,5136	2,35	0,1242
		Tr*An	3	2,80	0,1006	1,61	0,2388	.	.

*DL=degré de liberté au numérateur

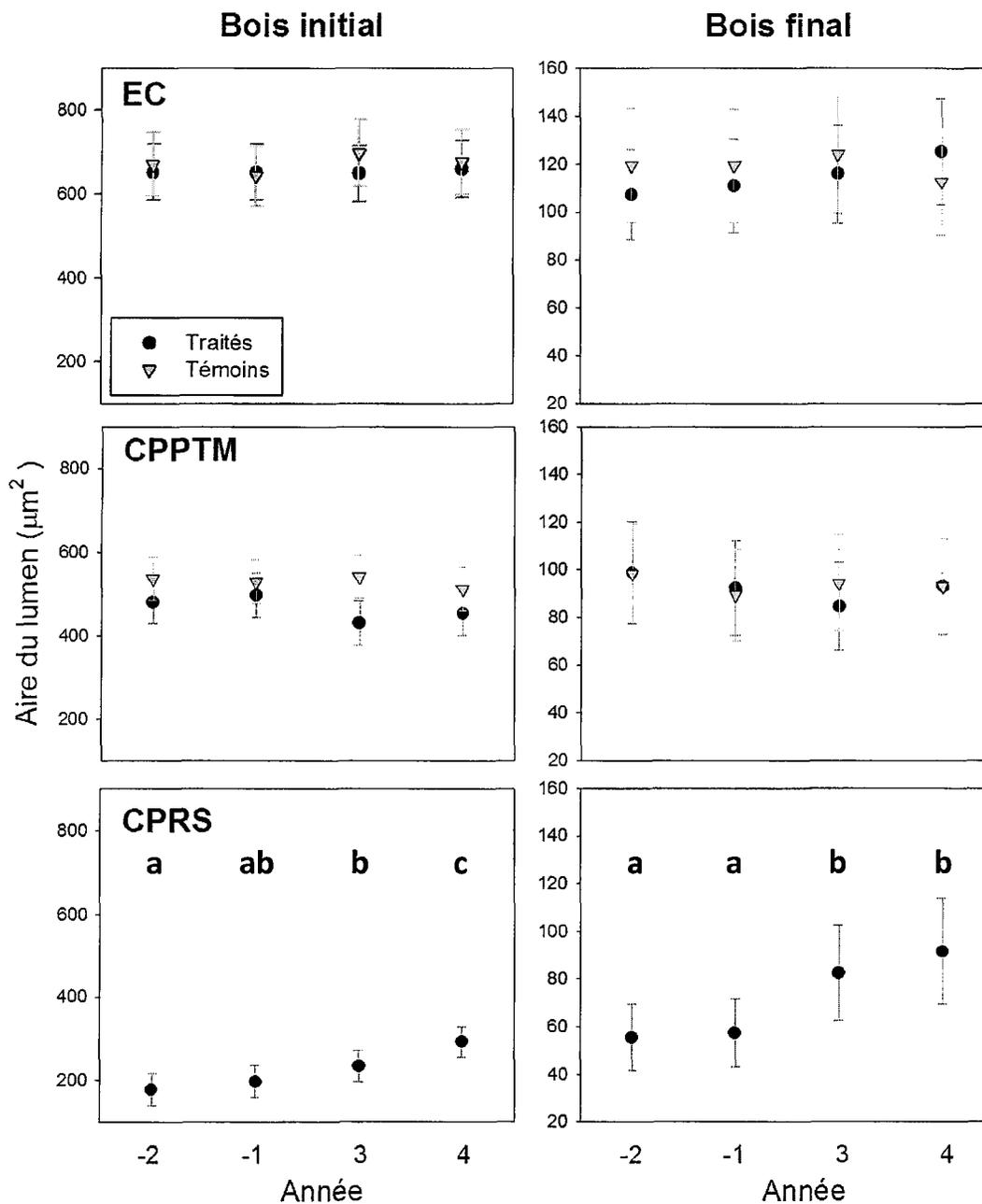


Figure 19. Valeurs moyennes et intervalles de confiance de l'aire du lumen (μm^2) par cerne selon le bois initial et le bois final en comparaison avec les stations témoins. Les lettres correspondent au test de comparaisons multiples de Tukey-Kramer effectué sur les stations traitées. Les lettres différentes représentent les valeurs significativement différentes.

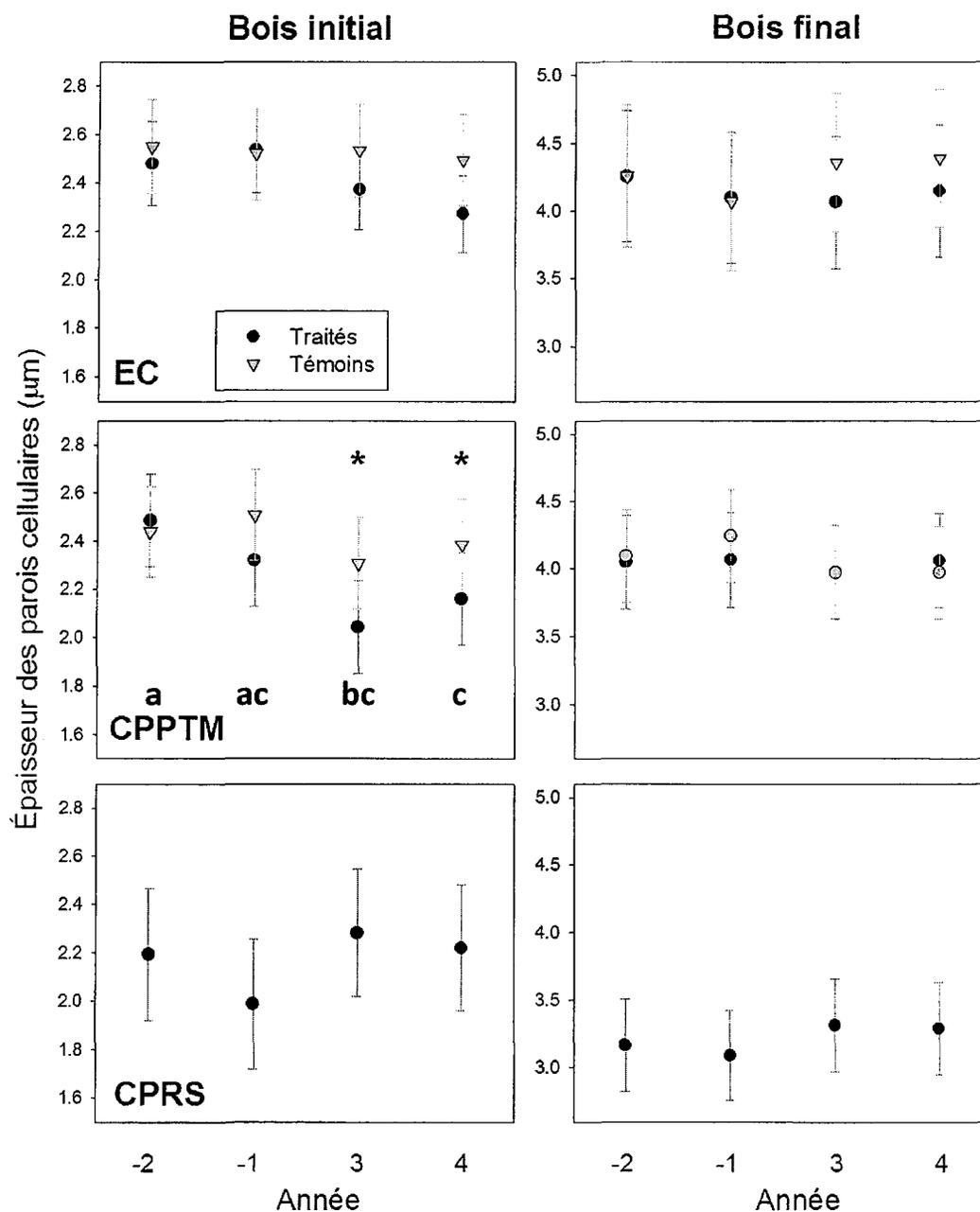


Figure 20. Valeurs moyennes et intervalles de confiance de l'épaisseur des parois cellulaires (μm) par cerne selon le bois initial et le bois final en comparaison avec les stations témoins. Les astérisques (*) représentent les résultats significatifs du test de comparaisons multiples par tranche et les lettres correspondent à celui de Tukey-Kramer effectué sur les stations traitées. Les lettres différentes représentent les valeurs significativement différentes.

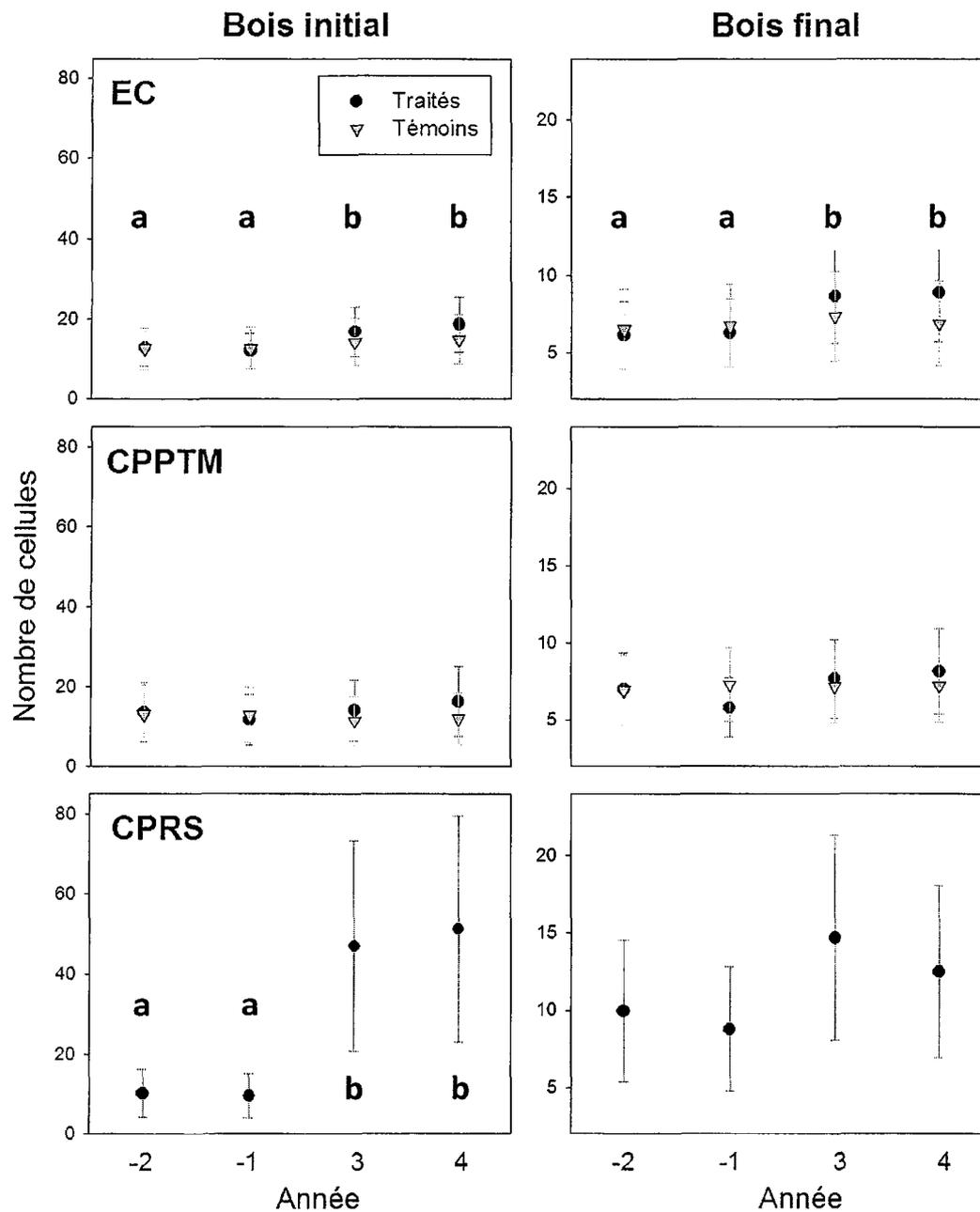


Figure 21. Valeurs moyennes et intervalles de confiance du nombre de cellules par cerne selon le bois initial et le bois final en comparaison avec les stations témoins. Les lettres correspondent au test de comparaisons multiples de Tukey-Kramer effectué sur les stations traitées. Les lettres différentes représentent les valeurs significativement différentes.

Tableau 5. Résultats des analyses de variance (ANOVA) à mesures répétées de l'aire du lumen (μm^2), de l'épaisseur des parois cellulaires (μm), du ratio entre l'épaisseur de la paroi et l'aire du lumen et le nombre de cellules des stations traitées en fonction du type de bois (bois initial [Bi] et bois final [Bf]) et des années (An).

Paramètre	Type de bois	Source	DL*	EC		CPPTM		CPRS	
				F ratio	Prob>F	F ratio	Prob>F	F ratio	Prob>F
Aire du lumen	Bi	An	3	0,06	0,9787	2,33	0,1262	13,71	0,0003
	Bf	An	3	1,06	0,4028	1,35	0,3036	8,29	0,0030
Épaisseur des parois	Bi	An	3	3,15	0,0648	5,21	0,0155	2,58	0,1025
	Bf	An	3	1,01	0,4224	0,13	0,9396	0,65	0,5987
Ratio paroi/lumen	Bi	An	3	0,86	0,4863	1,66	0,2289	5,39	0,0141
	Bf	An	3	2,01	0,1666	0,34	0,7993	3,36	0,0549
Nombre de cellules	Bi	An	3	5,83	0,0108	1,20	0,3525	20,28	<0,0001
	Bf	An	3	5,00	0,0178	1,81	0,1983	2,35	0,1242

*DL=degré de liberté au numérateur

Houppier et branches

La moyenne du diamètre des branches sur toute la hauteur du houppier n'est pas significativement différente entre les stations d'EC et leur témoin (EC=13,9 mm Témoin=13,1 mm; Figure 22; Tableau 6). Une fois divisé en section, on remarque que c'est dans la 2^e section qu'on retrouve le plus grand diamètre pour les EC, soit de 16,2 mm (Figure 22). Cependant, la plus grande différence d'avec le témoin s'observe à la 4^e section où 1,9 mm les séparent (Figure 22). Il n'y a, par contre, aucune différence significative mesurée pour le diamètre des branches par section entre les EC et les témoins (Tableau 6).

En réaction à la CPPTM, le diamètre moyen des branches est significativement plus élevé sur l'ensemble du houppier comparativement aux témoins (CPPTM=11,6 mm; Témoin=10,3 mm; Figure 22; Tableau 6). Lorsqu'analysée par section, on observe que l'interaction entre le traitement et les sections n'est pas significative, mais que le traitement, quant à lui, l'est ($p=0,0285$; Tableau 6). Ceci signifie que le diamètre des branches est plus élevé dans toutes les sections du houppier (Figure 22). Les sections 2 et 3 démontrent les plus grands écarts d'avec les témoins (Figure 22). Comme observé dans les sites d'EC, c'est à la 2^e section qu'on retrouve les branches de plus fort diamètre, soit de 13,6 mm (Figure 22).

La moyenne du diamètre des branches des arbres présents dans les stations de CPRS est de 9,5 mm (Figure 22), soit moins de 4,4 mm seulement des arbres dans les stations d'EC et de 2,1 mm de ceux des CPPTM, bien que le DHP des arbres soit nettement plus petit (Tableau 1). La 2^e section est également celle où on retrouve les branches de plus grands diamètres, soit de 11,6 mm (Figure 22).

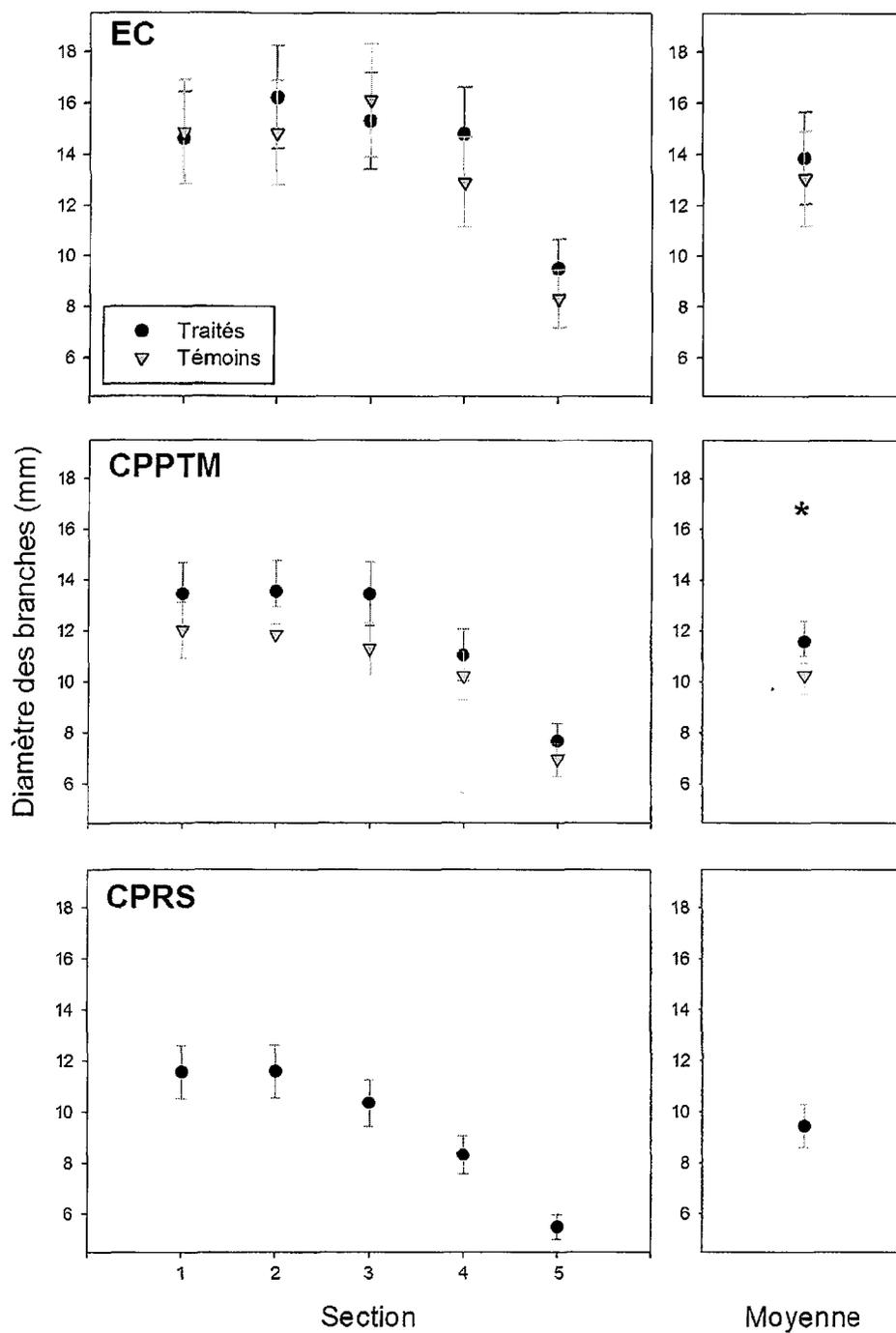


Figure 22. Diamètre moyen des branches (mm) par section du houppier et diamètre moyen des branches (mm) sur toute la longueur du houppier en comparaison avec les stations témoins, avec les intervalles de confiance. Les astérisques (*) représentent les résultats significatifs du test de comparaisons multiples par tranche.

La longueur relative du houppier n'est pas significativement différente de celle des témoins en ce qui concerne l'EC et la CPPTM (Tableau 6). Les arbres des stations d'EC ont en moyenne 59 % de leur tige qui présente des branches vivantes comparativement à 46 % pour les témoins (Figure 23). Le houppier représente 68 % de la tige à la suite de la CPPTM par rapport à 59 % pour les témoins (Figure 23). La plus importante longueur relative du houppier, soit 91 %, est observée chez les arbres présents dans les stations de CPRS (Figure 23).

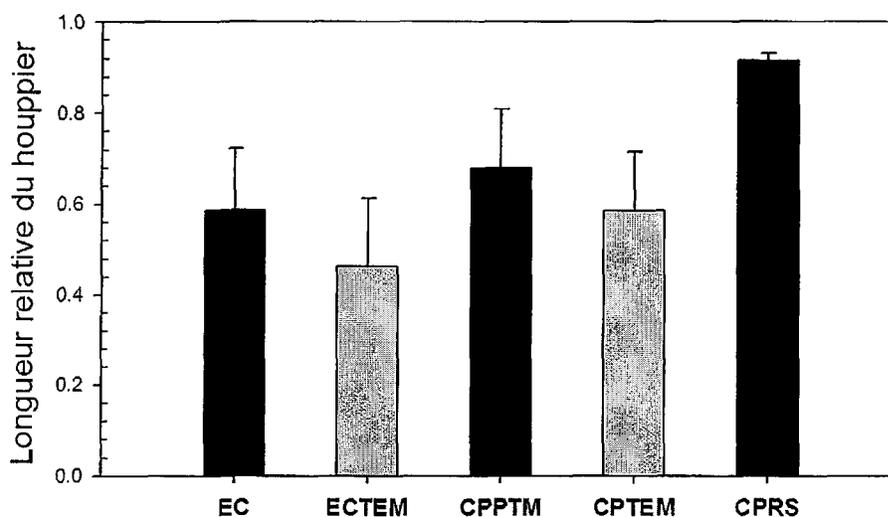


Figure 23. Longueur relative du houppier (%), avec les intervalles de confiance, en comparaison avec les stations témoins (ECTEM et CPTEM) par type d'intervention.

Tableau 6. Résultats de l'analyse de covariance (ANCOVA) à mesures répétées du diamètre des branches (mm) par section (DBS), de l'analyse de covariance (ANCOVA) du diamètre (mm) moyen des branches (DMB) et de l'analyse de variance (ANOVA) à un facteur de la longueur relative (%) du houppier (LRH) en fonction des traitements (Tr= traités vs témoins).

Paramètre	Source	DL*	EC		CPPTM		CPRS	
			F ratio	Prob>F	F ratio	Prob>F	F ratio	Prob>F
DBS	DHP	1	80,82	<0,0001	74,73	<0,0001	.	.
	Section	4	44,88	<0,0001	50,11	<0,0001	.	.
	Tr	1	1,80	0,2723	11,23	0,0285	.	.
	Tr*Section	4	1,95	0,1661	0,66	0,6317	.	.
DMB	DHP	1	89,56	<0,0001	78,66	<0,0001	.	.
	Tr	1	2,07	0,2459	13,40	0,0216	.	.
LRH	Tr	1	3,84	0,1448	2,78	0,1709	.	.

*DL=degré de liberté au numérateur

DISCUSSION

La discussion sera divisée en deux sections, la première portant sur l'EC et la CPPTM et la deuxième sur la CPRS. Les arbres ayant subi une CPRS passent d'une croissance opprimée à une croissance caractérisée par la phase juvénile. C'est pourquoi ils seront traités différemment des deux autres interventions, dans lesquelles seul le bois mature a été analysé. De surcroît, puisqu'aucune station témoin n'a été échantillonnée pour les CPRS, la discussion porte uniquement sur la comparaison avant et après l'intervention.

Effets de l'EC et de la CPPTM sur la croissance et la qualité du bois de l'épinette noire

Croissance

Variabilité intra-station dans la croissance radiale

Une augmentation de la croissance du peuplement a été observée en réaction aux interventions, cette dernière étant plus importante à la suite de la CPPTM qu'après l'EC (Figure 6). Dans le cas d'une CPPTM, l'ouverture du peuplement est supérieure, cela permet d'augmenter la disponibilité de l'eau, des nutriments et de la lumière (Groot et Saucier, 2008), favorisant ainsi la croissance des arbres résiduels.

Par contre, il y a une grande variabilité entre les arbres; plus de 30 % n'ont aucune augmentation de croissance (Figure 7). Vincent *et al.* (2009) et Laplante (2009)

ont observé la même variabilité dans des peuplements d'épinettes noires traités par l'EC et, selon Vincent *et al.* (2009), cette variation s'explique, en partie, par le diamètre des arbres et des compétiteurs, avant et après le traitement.

L'observation d'une proportion plus élevée d'individus avec une diminution de leur croissance radiale à la suite d'une CPPTM appuie le constat de Bégin (2002). En effet, plus le volume à récolter est élevé, plus la proportion des tiges blessées par la machinerie est élevée; les écorchures constituant les blessures les plus fréquentes. La diminution de la croissance observée dès la première année suivant l'intervention appuie cette hypothèse (Figure 8). Également, lorsque la canopée d'un peuplement s'ouvre après une intervention, les dommages causés par la neige et le vent sont plus fréquents (Cameron, 2002). Comme la CPPTM ouvre davantage la canopée, les risques de dommages sont plus élevés. Ces hypothèses n'ont toutefois pas été vérifiées.

D'un autre côté, il y a des arbres doublant leur croissance radiale (classe 5) en réponse aux interventions et ce sont ceux ayant une croissance opprimée dans les années qui la précédaient (Figure 8). Effectivement, selon Larson (1969), les arbres opprimés devraient avoir une meilleure réponse à une éclaircie, comparativement aux arbres dominants, car ces derniers ont déjà les ressources nécessaires à leur croissance. Nos résultats démontrent qu'il semble être préférable de récolter les dominants et de conserver les co-dominants et les opprimés, car ce sont eux qui profitent le plus d'une ouverture de la canopée. Par contre, ces arbres sont vulnérables aux dommages causés par la neige (Cameron, 2002) et le vent. Conserver des dominants dans le peuplement pourrait réduire ce risque et de ce fait, réduire la proportion d'arbres avec une baisse de croissance après les interventions. De plus, l'arrêt de l'oscillation du vent avec le contact des cimes de plus gros arbres (Blackburn *et al.*, 1988) pourrait aider à réduire la forte

mortalité par chablis observée par Riopel *et al.* (2010) dans des peuplements traités par la CPPTM.

Volume annuel

Le volume de bois indicé produit annuellement augmente subséquemment aux interventions, plus fortement encore à la suite de la CPPTM, et se poursuit au moins sur une période de 9 ans (Figure 9).

Une augmentation de croissance, en réaction à des interventions de différentes intensités, a été observée pour l'épinette noire (Vincent *et al.*, 2009) et pour d'autres espèces comme le pin gris (Barbour *et al.*, 1994; Tong et Zhang, 2005) et l'épinette de Norvège (Makinen *et al.*, 2002a). Par contre, ces études portent uniquement sur l'augmentation de la largeur des cernes à une hauteur précise dans l'arbre, ce qui limite l'interprétation sur la productivité du peuplement. Les résultats de la présente étude démontrent que le volume de bois produit est supérieur dans les peuplements résiduels (65 % et 84 % d'augmentation à la suite de l'EC et de la CPPTM respectivement). Par contre, les résultats peuvent seulement être imputés aux arbres ayant une augmentation de croissance en réaction aux coupes (65.3 % des arbres après l'EC, 61.7 % dans le cas de la CPPTM). De plus, l'augmentation de volume pourrait être reliée aux conditions environnementales (le climat régional par exemple) car le volume augmente également dans les stations témoins (CPTEM).

L'augmentation du volume de bois ne se produit pas immédiatement après l'intervention (délai de 2 ou 3 ans; Figure 10). Un délai équivalent avant l'augmentation de la croissance a déjà été rapporté dans la littérature pour l'épinette noire après une EC

(Laplante, 2009; Vincent *et al.*, 2009) et une CPPTM (Miron *et al.*, 2008). Ce dernier l'ayant constaté également pour le sapin baumier et l'épinette blanche (*Picea glauca* (Moench) Voss.). Ce délai serait expliqué par une augmentation de la croissance du système racinaire avant celle de la tige (Urban *et al.*, 1994; Kneeshaw *et al.*, 2002; Vincent *et al.*, 2009).

Deux hypothèses peuvent expliquer ce phénomène. La première est qu'en réponse à l'ouverture du peuplement, les arbres résiduels sont soumis à davantage de perturbations (vent, neige) (Cameron, 2002) et qu'en réaction à ces perturbations, les arbres doivent développer un système racinaire plus important afin de mieux s'ancrer dans le sol. En effet, les arbres ont tendance à devenir moins stables en augmentant leur taille, d'où l'importance de développer d'abord leur système racinaire (Cameron, 2002). Cette hypothèse est supportée par Nicoll et Dunn (2000) qui ont démontré, pour l'épinette de Sitka (*Picea sitchensis* (Bong.) Carrière) soumis à une ouverture de la canopée, qu'il y a allocation des ressources au système racinaire plutôt qu'à la tige.

La deuxième hypothèse suppose que l'ouverture du peuplement augmente la quantité de rayonnement solaire qui atteint les tiges résiduelles, ce qui augmente les pertes d'eau par évaporation (Pothier et Margolis, 1990; 1991). L'augmentation du rayonnement solaire favorise également la production de nouveau feuillage, ce qui contribue aussi à la perte d'eau par évaporation (Kneeshaw *et al.*, 2002). Afin de contrer ce phénomène, les arbres doivent développer davantage leur système racinaire, puisque c'est lui qui contribue le plus au maintien d'un potentiel hydrique capable de supporter l'augmentation de la masse foliaire (Running, 1980; Sperry *et al.*, 1998).

Ces deux phénomènes, agissant probablement de façon conjointe, pourraient expliquer le délai dans l'augmentation du volume produit par tige après une coupe partielle.

Qualité du bois

Proportion de bois final

Fait intéressant, le volume de bois final produit annuellement suit le même patron que le volume annuel, mais l'augmentation est moins importante (Figure 11). Le pourcentage de celui-ci, après les interventions, ne diminue cependant pas significativement (Figure 13). Tassissa et Burkhart (1998) et Morling (2002) sont arrivés aux mêmes conclusions pour le pin à encens (*Pinus taeda* L.) et le pin sylvestre (*Pinus sylvestris* L.) respectivement, à la suite d'une éclaircie. Par contre, pour l'épinette noire, ce dernier résultat n'est pas en accord avec la littérature. En fait, pour cette espèce, une augmentation de croissance se traduit par une augmentation de la largeur du bois initial au détriment du bois final (Zhang, 1998; Wang *et al.*, 2002). La disparité des résultats obtenus avec ceux de la littérature pourrait s'expliquer par des contextes d'études différents de celui des coupes partielles (p.ex. plantation). De plus, selon Cao *et al.* (2008), seules les interventions de forte intensité peuvent affecter la proportion de bois final. La CPPTM étant une intervention de plus forte intensité que l'EC, il est possible que ses effets soient plus marqués à long terme. Il est de ce fait intéressant de constater que les valeurs les plus basses sont mesurées dans les deux dernières années (7 et 8 ans après la coupe), soit celles correspondant aux valeurs les plus élevées de volume annuel produit.

Masse volumique du bois

Le patron de variation radiale moyenne de la masse volumique du bois de l'épinette noire, observé en fonction de l'âge cambial, correspond à ce qu'on retrouve dans la littérature (Figure 15). Dans les premières années, la masse volumique diminue de façon importante pour ensuite remonter légèrement et enfin, se stabiliser. Alteyrac *et al.* (2006) observe le même patron pour l'épinette noire et Jozsa et Middleton (1997) l'observe également sur plusieurs autres espèces comme l'épinette blanche (*Picea glauca* (Moench) Voss.) et le sapin subalpin (*Abies lasiocarpa* (Hook.) Nutt.). Cette variation est due, entre autres, au bois juvénile, celui-ci ayant une masse volumique significativement inférieure au bois mature (Koubaa *et al.*, 2005). Yang et Hazenberg (1994) ont déterminé que la transition entre le bois juvénile et le bois mature se fait entre les cernes 11 et 21 pour l'épinette noire, ce qui correspond à ce qui est observé dans la présente étude (Figure 15).

Comme la proportion de bois final est un facteur important pour définir la masse volumique moyenne d'un cerne (Antal et Micko, 1994; Ivkovich *et al.*, 2002), il n'est pas surprenant qu'aucun résultat significatif n'ait été observé dans la masse volumique moyenne annuelle à la suite de l'EC et de la CPPTM (Figure 16 et 17). Zobel et van Buijtenen (1989) et Megraw (1985, 1986) ont conclu également que les éclaircies ont peu d'effets sur la masse volumique du bois de différentes espèces (p. ex. *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) et *Pinus taeda* L.). En fait, en Amérique du Nord, l'effet de l'EC sur la masse volumique du bois serait de faible importance en pratique (Megraw, 1985, 1986). De plus, pour l'épinette noire, plusieurs auteurs n'ont observé aucune relation entre la largeur des cernes de croissance et la masse volumique du bois (Risi, 1960; Hall, 1984) et entre la densité du peuplement et la masse volumique du bois (Alteyrac *et al.*, 2005). Par contre, il y a toujours des résultats contradictoires dans la littérature ce qui

laisse croire que la relation entre la masse volumique du bois et la croissance des arbres n'est pas bien définie (Boyle *et al.*, 1988; Zhang et Morgenstern, 1995). En fait, la densité du peuplement devrait être inférieure à 1300 tiges/ha pour diminuer la masse volumique de l'épinette noire (Zhang et Chauret, 2001). À la suite de l'EC, la densité du peuplement est inférieure à ce taux, en contrepartie, la surface terrière est encore très élevée, ce qui pourrait expliquer que la masse volumique du bois ne soit pas affectée (Tableau 1). Par contre, après la CPPTM, bien que le nombre de tiges par hectare soit plus élevé, la surface terrière est très basse et pourrait expliquer, en partie, la diminution, bien que non significative, de la masse volumique du bois en réaction à l'intervention (Tableau 1). L'impact de la densité du peuplement sur la masse volumique du bois a été mis en évidence, mais nécessite des recherches complémentaires afin d'en avoir une meilleure compréhension (Alteyrac, 2005). En effet, d'autres paramètres comme l'âge et la hauteur des arbres peuvent influencer la densité du peuplement et non seulement le nombre de tiges par hectare.

Également, il est intéressant de constater que cette diminution ne s'effectue pas en même temps que celle observée dans la proportion de bois final (Figure 13 et 16). En effet, la masse volumique diminue dans les premières années tandis que le bois final ne diminue qu'à la 7^e et 8^e année après la CPPTM. Makinen *et al.* (2002a) sont arrivés aux mêmes conclusions, c'est-à-dire que la masse volumique du bois n'était pas entièrement reliée à la proportion de bois final. Ceci laisse supposer que la relation entre ces deux paramètres n'est pas aussi claire qu'on le croyait et que d'autres facteurs doivent influencer la masse volumique du bois.

Les paramètres anatomiques, comme la largeur des parois cellulaires, pourraient davantage affecter la masse volumique du bois. En effet, aucun changement n'a été observé dans les paramètres cellulaires à la suite de l'EC, mais une diminution de la largeur des parois cellulaires dans le bois initial a été observée après la CPPTM

(Figure 20). Ces résultats sont en accord avec de récentes études qui ont observé que l'EC n'influçait pas les paramètres anatomiques (Laplante, 2009) tandis que des interventions de fortes intensités diminuaient l'épaisseur de la paroi cellulaire sans changement dans l'aire du lumen (Makinen *et al.*, 2002b; Jaakkola *et al.*, 2005b). Ce dernier résultat est important, car ces changements peuvent entraîner une diminution de la masse volumique du bois. En effet, la proportion de parois cellulaires par cellule est corrélée positivement à la masse volumique du bois (Nicholls, 1984; Alteyrac, 2005). De plus, comme le bois initial est en plus grande proportion dans le cerne de croissance, un changement dans ce type de cellule peut davantage influencer la masse volumique moyenne du cerne. Effectivement, dans les sites de CPPTM, les résultats des paramètres anatomiques se reflètent dans la masse volumique du bois initial et dans la masse volumique moyenne du cerne de croissance (Figure 16 et 18).

Selon les résultats obtenus, l'épaisseur de la paroi cellulaire est, probablement, un paramètre plus adéquat pour expliquer les variations dans la masse volumique du bois que la proportion de bois final, et ce, pour l'épinette noire. Des recherches complémentaires, mettant en relation ces deux attributs, pourraient confirmer cette hypothèse.

Il n'existe toujours pas d'étude, à ce jour, expliquant les causes physiologiques impliquées dans la diminution des parois cellulaires avec une augmentation de la largeur des cernes de croissance. Il y a cependant une hypothèse pouvant expliquer ce phénomène. La paroi des cellules est constituée des composés produits par la photosynthèse. Lorsque la largeur des cernes augmente, il y a davantage de cellules produites. Il y a donc division des ressources sur un nombre plus élevé de cellules, ce qui pourrait causer la diminution de la largeur des parois. Par contre, en réaction à une coupe partielle, le taux de photosynthèse est supposé augmenter, ce qui devrait produire davantage de composés attribuables aux parois cellulaires. Par contre, lorsque la

croissance est fortement augmentée, comme c'est le cas après la CPPTM, les produits de la photosynthèse ne deviennent probablement plus suffisants. Comme mentionné précédemment, la formation accrue des racines à la suite d'une intervention nécessite un apport supplémentaire de photoassimilats, ce qui pourrait contribuer à la diminution de la paroi cellulaire. Une meilleure compréhension des mécanismes responsables de la production de cellules et de la distribution des photoassimilats pourrait permettre d'expliquer la diminution de l'épaisseur des parois à la suite d'une augmentation de croissance.

Branches et houppier

Le patron de diamètre des branches en fonction de la hauteur dans le houppier est semblable dans les EC et les CPPTM (Figure 22); le diamètre des branches provenant des trois premières sections étant semblable pour ensuite diminuer jusqu'au sommet. Toutefois, contrairement à l'EC, les branches des CPPTM sont de plus grands diamètres que ceux des témoins, et ce, sur toute la hauteur du houppier (Figure 22).

Les résultats sont conséquents avec ceux de Brix (1981), qui a observé, pour le sapin de Douglas (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.)), que l'EC n'influence pas le diamètre des branches. Cependant, le résultat de la présente étude peut être expliqué par le fait que les arbres analysés avaient une croissance inférieure dans les années précédant l'intervention, et c'est seulement dans les dernières années que le volume de bois produit a augmenté pour atteindre celui des arbres témoins (Figure 9). Il est possible de croire que si le taux d'augmentation en volume annuel se perpétuait, le diamètre des branches surpasserait probablement celui des témoins.

De plus, selon Makinen et Hein (2006), l'augmentation du diamètre des branches serait reliée à une diminution de la densité du peuplement. En effet, la CPPTM diminue davantage la densité du peuplement que l'EC, il n'est donc pas surprenant que le diamètre des branches soit augmenté. De plus, après une CPPTM, il ne reste que des arbres anciennement opprimés qui sont soudainement exposés à la lumière. Dans le cas d'une EC, les arbres résiduels sont les dominants et les co-dominants du peuplement avant la coupe, arbres qui recevaient déjà beaucoup de lumière. Pour ceux-ci, on devrait s'attendre à voir uniquement une réaction dans le bas de la cime même si les résultats n'ont démontré aucune différence significative en comparaison aux témoins.

Un délai dans la récession du houppier avec l'augmentation de l'espace entre chaque arbre (Pape 1999) aurait pu permettre d'expliquer le diamètre plus élevé des branches à la suite de la CPPTM. En effet, plus les branches meurent tôt, plus les nœuds sont petits (Niemisto, 1995; Makinen et Colin, 1999). Dans cette étude, la longueur du houppier ne peut pas expliquer le diamètre plus important des branches, celle-ci n'étant pas significativement différente de celle des témoins. Dans le cas présent, le taux de croissance des tiges serait plus adéquat pour expliquer les résultats, celui-ci étant relié au diamètre des branches (Pape, 1999).

Cependant, selon Lui *et al.* (2007b), de nombreuses années suivant différentes densités initiales de plantation, le diamètre des branches de l'épinette noire n'est pas suffisant pour avoir un impact sur sa classification selon les normes NLGA (2008) (Tableau 7). Nos résultats démontrent également que, malgré les valeurs supérieures des branches des stations de CPPTM comparativement aux témoins, cette intervention ne devrait pas avoir un effet négatif sur la classification. En observant la moyenne des trois premières sections, lesquelles sont les plus importantes au niveau du bois de construction, on remarque que, selon la norme NLGA (2008), le seul produit non

réalisable est la structure choisie pour une pièce de 2X3 (Tableau 7). En fait, l'épinette noire n'est pas une espèce reconnue pour être déclassée en raison du diamètre trop important de ses branches; moins de 10 % serait déclassé à cause de leurs nœuds (Zhang *et al.*, 2002; Benjamin *et al.*, 2007) et les interventions ne semblent pas modifier ce fait.

Tableau 7. Classification selon la *Nation Lumber Grade Authority* (NLGA 2008).

Produits	Classement	Nœud maximal (mm)	
		Marge	Centre
2 X 3	SS	12.7	12.7
	No.1	19.1	19.1
	No.2	22.2	22.2
2 X 4	SS.	19	22.2
	No.1	25.4	38.1
	No.2	31.8	50.8
2 X 6	SS	28.6	47.6
	No.1	38.1	57.2
	No.2	47.6	73.0

Effets de la CPRS sur la croissance et la qualité du bois de l'épinette noire

À la suite de la CPRS, les arbres passent de la phase opprimée à la phase juvénile. Comparativement au bois mature, le bois juvénile est caractérisé par des cernes plus larges, une masse volumique plus basse, une proportion de bois final moindre, des parois cellulaires moins épaisses ainsi qu'un lumen plus large, ce qui en fait un bois moins résistant (Panshin et Zeeuw, 1980). Nos résultats démontrent bien chacune de ces caractéristiques après la CPRS (Figure 13, 16, 19, 20). À noter que les résultats obtenus avant la coupe ne respectent pas les critères de juvénilité, car il s'agit d'une croissance opprimée.

Croissance

Variabilité de la croissance intra-station et volume annuel

La majorité des arbres réagissent fortement après la CPRS et cette augmentation de croissance se reflète sur le peuplement en entier (Figure 6 et 7). La croissance moyenne du peuplement est, cependant, inférieure à celle mesurée dans les EC et CPPTM. En effet, Bégin (2002) a observé que l'augmentation annuelle moyenne du peuplement sera inférieure, 10 ans après coupe, à celle d'une CPPTM, car la haute régénération protégée fournit une avance notable contrairement à la CPRS. Pothier *et al.* (1995) avaient pourtant démontré le contraire dans une aire d'études installée dans des peuplements d'épinettes noires de la rivière Bell au Québec; la haute régénération protégée dans la CPPTM ne se serait pas développée aussi rapidement que celle issue d'une CPRS. Ceci laisse supposer une grande variabilité dans les réponses des peuplements, selon les stations, ainsi que des arbres individuels aux différentes interventions. Il est ainsi d'une grande importance de comprendre les facteurs qui régissent cette variabilité, afin de garantir une certaine uniformité ainsi qu'un effet positif des interventions.

La plus forte augmentation en volume annuel se produit à la suite de la CPRS due à la forte augmentation en hauteur des tiges résiduelles (Figure 9). De plus, les analyses cellulaires confirment cette hausse au niveau du diamètre des tiges (Figure 21). Cette intervention protège la régénération présente naturellement et récolte toutes les tiges matures du peuplement. De ce fait, l'ouverture complète de la canopée est instantanée et la régénération, qui passe en phase juvénile, en profite largement. De plus, le bois juvénile est caractérisé par des cernes plus larges que dans le bois mature (Panshin et Zeeuw, 1980) et l'intervention a accentué cette caractéristique.

Qualité du bois

Proportion de bois final et masse volumique du bois

Les analyses cellulaires démontrent que l'augmentation de croissance se fait davantage au niveau du bois initial, avec une augmentation du nombre de cellules produites de plus de 350 % comparativement au bois final (Figure 21). Selon Zhang (1998) et Wang *et al.* (2002), le pourcentage de bois final de l'épinette noire diminue avec l'augmentation de la largeur des cernes. De plus, les résultats sont en accord avec l'hypothèse de juvénilité, celui-ci étant caractérisé par une proportion de bois final moindre (Panshin et Zeeuw, 1980; Mansfield *et al.*, 2009).

Le patron de masse volumique des stations de CPRS est caractérisé par une masse volumique très élevée ($\sim 700 \text{ kg/m}^3$) vingt ans avant l'intervention, pour ensuite avoir une diminution de la masse volumique moyenne des cernes de croissance ($\sim 400 \text{ kg/m}^3$). La phase juvénile, dans l'étude de Zhang et Morgenstern (1995) et d'Alteyrac *et al.* (2006), a une masse volumique moyenne semblable, celle-ci étant plus faible que celle du bois mature. En effet, le bois juvénile a une conductivité spécifique inférieure, due à ses trachéides plus courtes (Pothier *et al.*, 1989). De ce fait, l'aire du lumen des trachéides doit être plus importante afin de compenser cette perte de conductivité causée par la longueur réduite des trachéides (Schneider *et al.*, 2008). Ainsi, en raison du diamètre plus grand des fibres, la densité du bois juvénile est plus basse (Schneider *et al.*, 2008). Ceci peut entraîner des problèmes sérieux de qualité, surtout dans le bois de construction (Koubaa *et al.*, 2005).

Afin d'évaluer la période de juvénilité, seules les années à la suite de la CPRS peuvent être prises en compte. Avant l'intervention, les arbres résiduels sont sous

couvert et ont, pour la plupart, une croissance opprimée, voire même suspendue, pour certains. C'est seulement après la coupe qu'ils peuvent profiter de l'ouverture pour croître. Le patron naturel ne débute que lorsque la croissance débute et c'est à la suite de l'intervention. Bien que la transition soit généralement entre le 11^e et le 20^e cerne pour l'épinette noire (Yang et Hazenberg, 1994), la diminution constante de la masse volumique observée à la suite de la CPRS, laisse présager une prolongation de la phase juvénile; dans la présente étude, 18 ans après la coupe, la masse volumique est toujours en diminution.

De plus, il est intéressant de constater qu'il y a distinction, suivant la coupe, entre la masse volumique du bois initial et final; la masse volumique diminue de façon plus importante dans le bois initial (Figure 18). En effet, les analyses cellulaires ont déterminé que le ratio entre l'aire du lumen et l'épaisseur des parois cellulaires se modifie à la suite de la CPRS, de façon plus importante, dans le bois initial. En fait, plusieurs chercheurs prétendent que la masse volumique du bois initial est mieux corrélée aux propriétés des fibres (proportion de paroi cellulaire, diamètre des fibres et du lumen) que le bois final (de Kort *et al.*, 1991) et ceci pourrait expliquer la diminution plus prononcée de la masse volumique dans le bois initial.

Branches et houppier

Le diamètre des branches dans les stations de CPRS est inférieur à celui des EC et des CPPTM (Figure 22), mais les valeurs sont très près de celles des témoins CPPTM, et ce, malgré le plus jeune âge et la plus petite dimension des arbres. En fait, la croissance de la tige est fortement augmentée en réaction à la CPRS. Comme le diamètre des branches dépend du taux de croissance des tiges (Pape, 1999), il n'est pas surprenant que la croissance des branches soit aussi influencée par l'intervention. Évidemment, il

est possible que la croissance des branches soit supérieure dans les premières années, comme c'est le cas pour le bois juvénile de la tige, et que cet écart puisse diminuer avec le temps. De plus, comme mentionné précédemment, Lui *et al.* (2007b) ont observé que le diamètre des branches de l'épinette noire n'est pas suffisant pour avoir un impact sur sa classification selon les normes NLGA (2008), même avec différentes densités initiales de plantation. Il n'y a donc aucune raison de croire que la CPRS nuit davantage à la classification des tiges en comparaison à des peuplements naturels ou issus de plantation.

Dans l'étude en cours, on retrouve des branches vivantes sur pratiquement toute la longueur de la tige des arbres (Figure 23). Un houppier recouvrant pratiquement la totalité de la tige peut influencer le diamètre des branches, mais peut également affecter la production de bois juvénile. En fait, selon Koubaa *et al.* (2005), à la suite d'une intervention sylvicole, c'est le ralentissement dans la récession du houppier qui pourrait prolonger la période de bois juvénile. En effet, biologiquement, le bois juvénile est constitué de xylème produit sous l'influence du méristème apical, attribuable à une accumulation en hormones, surtout en auxines (Zobel et Sprague, 1998) et serait lié à la longueur du houppier. La proportion de bois juvénile diminue lorsque le cambium arrête de produire du bois juvénile et commence à produire du bois mature lorsque la longueur du houppier diminue (Alteyrac *et al.*, 2006). Il est alors possible de croire, en fonction des résultats obtenus du volume annuel, de la proportion de bois final, de la masse volumique du bois, des paramètres anatomiques et de la longueur du houppier, que la période de bois juvénile pourrait être prolongée après la CPRS comparativement à un peuplement issu d'une perturbation naturelle ou encore, à la suite d'une intervention de plus faible intensité (CPPTM). De même qu'il est possible que cette intervention accentue les caractéristiques de ce type de bois. Une proportion élevée de bois juvénile peut entraîner une diminution de la qualité du bois. En effet, selon plusieurs études, le bois juvénile serait de qualité inférieure en raison des différences marquées dans sa

résistance (module de rupture), sa stabilité et sa rigidité (module d'élasticité) (Clark *et al.*, 2006; Jordan *et al.*, 2006).

Limite de l'étude et perspectives d'avenir

Enfin, les résultats démontrent qu'il y a augmentation de la croissance moyenne du peuplement à la suite de l'EC et la CPPTM. Par contre, en raison d'une hausse de croissance semblable dans les stations témoins, celle-ci ne peut être complètement imputable aux interventions sylvicoles. L'EC n'affecte pas les paramètres de qualité mesurés dans cette étude. Par contre, on observe que la CPPTM nuit davantage à ces paramètres en favorisant une plus forte augmentation du volume de bois produit annuellement. Par contre, cette étude ne démontre pas les effets de ces changements sur les propriétés mécaniques du bois. Il est possible qu'il n'y ait aucun impact sur ceux-ci. L'étude des propriétés mécaniques du bois est donc importante afin de conclure sur le véritable effet des interventions sur la qualité du bois. De plus, les résultats obtenus ne sont qu'une représentation des tiges ayant une augmentation de croissance à la suite des coupes. De ce fait, il y a un pourcentage plus ou moins important d'arbre n'ayant aucun impact sur leur qualité. Un suivi à long terme de ces peuplements est important afin de s'assurer de la bonne production en volume de bois et de la qualité du bois produit. Après intervention, la qualité doit tendre vers ou même excéder les normes de l'industrie de la transformation du bois. Dans le contexte actuel et futur de convergence vers les produits du bois à haute valeur ajoutée, l'assurance d'un produit final de qualité dépendra de l'état des arbres marchands qui est étroitement lié aux interventions sylvicoles.

La CPRS influence positivement la croissance des tiges grâce à l'ouverture complète du couvert. Cependant, cette ouverture semble prolonger la période de

juvénilité. Le bois juvénile peut causer des problèmes dans le processus de séchage, en plus de diminuer la résistance du bois et le rendement dans la production de la pâte (Alteyrac *et al.*, 2006). Du fait que les arbres sont toujours de faibles dimensions dans l'étude actuelle, il est difficile de prédire la qualité du bois à la fin de la rotation. En augmentant en diamètre et en hauteur, les arbres vont tranquillement refermer la canopée et il y aura début de compétition entre eux. Conséquemment, l'impact de la CPRS s'amenuisera dans le temps, et il est possible qu'au moment de la coupe finale, la qualité du bois ne soit pas diminuée. Afin de contrer la production de bois juvénile, un élagage des branches les plus basses pourrait s'effectuer et ainsi diminuer la longueur relative du houppier. Ceci affecterait la production de bois juvénile de même que le diamètre des nœuds. Toutefois, une proportion importante de branches doit être conservée pour s'assurer d'une bonne croissance. En effet, la longueur du houppier est un déterminant important dans le succès des arbres à la suite d'une intervention, il est important de s'assurer d'un bon pourcentage de cime afin de permettre aux tiges, surtout aux plus petites tiges, de réagir au traitement (Bégin, 2002). Selon Bégin (2002), le pourcentage devrait être supérieur à 40 % pour l'épinette noire. Le suivi à long terme de ces peuplements, tout comme ceux traités par l'EC et la CPPTM, sera important.

La présente étude n'est qu'un survol de certains critères de croissance et de qualité du bois. Il sera important d'évaluer davantage d'attributs afin de déterminer l'effet réel des interventions. Voici quelques perspectives d'avenir :

- 1) Afin d'expliquer la variabilité intra-station dans la croissance en réaction aux interventions, il serait important d'échantillonner un nombre égal de stations témoins et traitées. De plus, l'analyse des facteurs influençant cette variabilité, entre autres la densité du peuplement avant et après l'intervention, permettrait de favoriser un effet positif de la croissance à la suite de différentes interventions.

- 2) Après les traitements sylvicoles, la croissance devrait être largement expliquée par les changements dans la structure du houppier, incluant la surface foliaire totale (Vose, 1988; Gough *et al.*, 2004), et la longueur du houppier (Gillespie *et al.*, 1994). En effet, la structure du houppier influence l'acquisition des ressources, c'est-à-dire la photosynthèse ainsi que l'utilisation de l'eau (Kuuluvainen, 1991; Grote et Pretzsch, 2002). Brix (1981) et Makinen et Hein (2006) ont remarqué que les grands espacements entre les arbres augmentaient significativement la longévité des branches. En réponse à une intervention sylvicole visant à diminuer la densité du peuplement, il y a davantage de lumière qui peut atteindre les parties les plus basses du houppier, favorisant ainsi la longévité des branches. En effet, la différence dans les dimensions du houppier est le résultat d'un délai dans la récession de celui-ci avec l'augmentation de l'espace entre chaque arbre (Pape, 1999). La longueur du houppier est une variable prédictive importante pour la productivité des peuplements, mais également pour la qualité du bois. D'abord parce que plus les branches meurent tôt, plus les nœuds sont petits (Niemisto, 1995; Makinen et Colin, 1999) et ensuite parce que le délai dans la récession de celui-ci pourrait augmenter la quantité de bois juvénile dans la tige. Il s'agit donc d'un paramètre intéressant à vérifier dans les prochaines années. De plus, la surface foliaire est un bon indice de la productivité des peuplements. Afin de la déterminer, la surface de l'aubier peut être mesurée, celle-ci y étant reliée, et ainsi calculer un indice d'efficacité de croissance. Ces deux valeurs prises sur l'ensemble du peuplement apporteraient plus d'informations sur la productivité et la qualité de ceux-ci.
- 3) Bien que le volume de bois produit annuellement soit un paramètre important, le volume de bois produit en hauteur de même qu'en diamètre pourrait fournir des informations primordiales sur le défilement de la tige, autres facteurs importants

de qualité. En effet, quelques études ont observé qu'une éclaircie affectait non seulement la croissance des tiges, mais également leur forme (Barbour *et al.*, 1992; Viens, 2001).

- 4) Les paramètres cellulaires ont été mesurés seulement sur deux années après les interventions. En conséquence, les analyses ne permettent pas de généraliser à tous les cerne. D'autant plus que les analyses n'ont pas été effectuées au moment où la croissance était la plus forte. Il se peut que les paramètres, surtout après la CPPTM et la CPRS, soient plus modifiés plusieurs années suivant les coupes. L'analyse de la longueur des fibres pourrait également permettre de comprendre les changements survenus dans les autres paramètres cellulaires. De plus, la longueur des trachéides, tout comme l'épaisseur des parois cellulaires, est un critère important, car elle influence grandement le procédé de fabrication de la pâte et la résistance du papier (Antal et Micko, 1994; Law et Valade, 1997). Erickson et Harrison (1974) ont conclu que la largeur des cerne serait inversement proportionnelle à la longueur des trachéides, ce qui laisse présager un changement à la suite d'interventions sylvicoles.

- 5) Enfin, la masse volumique du bois est un critère très important pour la qualité du bois, car elle influence les propriétés mécaniques (Jozsa et Middleton, 1997; Koubaa *et al.*, 2002). De plus, elle est une bonne indicatrice du bois juvénile. Une analyse de la masse volumique à différentes hauteurs dans la tige permettrait une meilleure vue d'ensemble de la qualité de la tige en entier, en plus de fournir des informations sur la proportion de bois juvénile dans l'ensemble de l'arbre.

- 6) De plus, afin de déterminer l'applicabilité des coupes partielles à grande échelle au Québec, il serait important d'intégrer des études sur la mortalité des tiges (Riopel *et al.*, 2010), sur les coûts et bénéfices des interventions (Liu *et al.*, 2007a), ainsi que sur la conservation de la biodiversité dans les peuplements traités (Rioux *et al.*, 2004).

CONCLUSION

La présente étude a permis de fournir des informations primordiales sur l'effet de trois interventions sylvicoles (EC, CPPTM, CPRS) de plus en plus appliquées en forêt boréale sur la croissance ainsi que sur la qualité du bois produit. L'objectif était d'évaluer la croissance du peuplement et la variabilité intra-station de la croissance à la suite des interventions, évaluer le volume de bois produit annuellement et analyser différents attributs influençant la qualité du bois (proportion de bois final, masse volumique, paramètres anatomiques, longueur du houppier et diamètre des branches). Dans le contexte actuel et futur de convergence vers les produits du bois à haute valeur ajoutée, l'assurance d'un produit final de qualité dépendra de l'état des arbres marchands qui est étroitement lié aux interventions sylvicoles.

Les hypothèses de travail ont partiellement été confirmées. En fait, les trois interventions ont démontré leur efficacité dans l'augmentation de la croissance des tiges résiduelles bien qu'il y ait une forte variabilité intra-station. Cette augmentation de croissance ne semble pas nuire aux paramètres de qualité mesurés à la suite de l'EC ce qui en fait une intervention très intéressante à préconiser en peuplement équien. Également, les paramètres de qualité du bois ne sont pas affectés significativement après une CPPTM, sauf l'épaisseur des parois cellulaires et le diamètre des branches. Ce dernier résultat ne semble cependant pas suffisant pour nuire à la classification du bois. Bien que cette intervention soit plus adaptée aux peuplements à structure irrégulière, le suivi des peuplements dans les prochaines années est important afin de s'assurer que les changements dans les paramètres de qualité, bien que minimes, ne nuisent pas au produit fini. La CPRS, quant à elle, protège la régénération lorsqu'elle récolte toutes les tiges marchandes du peuplement. De ce fait, avec l'ouverture complète de la canopée, cette

régénération en profite largement pour augmenter leur croissance. Cependant, la période de juvénilité semble être prolongée et celle-ci pourrait influencer la qualité du bois produit. Le suivi à long terme de ces peuplements est donc important afin de s'assurer d'une bonne production en volume de bois produit tout en conservant une qualité du bois respectable. Il est possible de conclure que l'effet des interventions en peuplement mature (EC, CPPTM) n'affecte pas significativement les paramètres de qualité analysée dans cette étude. Par contre, les peuplements juvéniles (CPRS) semblent plus affectés.

RÉFÉRENCES

- Akaike, H., 1987. Factor analysis and AIC. *Psychometrika* 52, 317-332.
- Alteyrac, J., 2005. Influence de la densité de peuplement et de la hauteur dans l'arbre sur les propriétés physico-mécaniques du bois d'épinette noire (*Picea mariana* (Mill.) B.S.P.). Faculté de foresterie et de géomatique. Université Laval, Québec.
- Alteyrac, J., Cloutier, A., Zhang, S.Y., 2006. Characterization of juvenile wood to mature wood transition age in black spruce (*Picea mariana* (Mill.) BSP) at different stand densities and sampling heights. *Wood Sci. Technol.* 40, 124-138.
- Alteyrac, J., Zhang, S.Y., Cloutier, A., Ruel, J.C., 2005. Influence of stand density on ring width and wood density at different sampling heights in black spruce (*Picea mariana* (Mill.) BSP). *Wood Fiber Sci.* 37, 83-94.
- Antal, M., Micko, M.M., 1994. Variation and field estimation of wood quality parameters for black spruce. *Holzforsch. Holzverw* 46, 70-72.
- Barbour, R.J., Bailey, R.E., Cook, J.A., 1992. Evaluation of relative density, diameter growth, and stem form in a red spruce (*Picea rubens*) stand 15 years after precommercial thinning. *Can. J. For. Res.-Rev. Can. Rech. For.* 22, 229-238.
- Barbour, R.J., Fayle, D.C.F., Chauret, G., Cook, J., Karsh, M.B., Ran, S.K., 1994. Breast-height relative density and radial growth in mature jack pine (*Pinus banksiana*) for 38 years after thinning. *Can. J. For. Res.-Rev. Can. Rech. For.* 24, 2439-2447.
- Bégin, J., 2002. Coupe avec protection des petites tiges marchandes (CPPTM). Gouvernement du Québec, M.d.R.n. (Ed.).
- Benjamin, J., Chui, Y.H., Zhang, S.Y., 2007. A method to assess lumber grade recovery improvement potential for black spruce logs based on branchiness. *For. Prod. J.* 57, 34-41.
- Bergeron, J.-F., 1996. La pessière noire à mousse. Manuel de foresterie. Presse de l'Université Laval, Sainte-Foy.

- Bergeron, Y., Harvey, B., Leduc, A., Gauthier, S., 1999. Forest management guidelines based on natural disturbance dynamics: Stand and forest-level considerations. *For. Chron.* 75, 49-54.
- Billosta C., V., Joseleau, J.-P., Cochaux, A., and Ruel, K. 2007. Tying together the ultrastructural modifications of wood fibre induced by pulping processes with the mechanical properties of paper. *Cellulose* 14(2): 141-152.
- Blackburn, P., Petty, J.A., Miller, K.F., 1988. An assessment of the static and dynamic factors involved in windthrow. *Forestry* 61, 29-43.
- Boucher, D., De Grandpre, L., Gauthier, S., 2003. Development of a stand structure classification systems and comparison of two lichen-spruce woodlands in Quebec. *For. Chron.* 79, 318-328.
- Bourgeois, L., Messier, C., Brais, S., 2004. Mountain maple and balsam fir early response to partial and clear-cut harvesting under aspen stands of northern Quebec. *Can. J. For. Res.-Rev. Can. Rech. For.* 34, 2049-2059.
- Boyle, T.J.B., Balatinecz, J.J., McCaw, P.M., 1988. Genetic control of some wood properties in black spruce. Twenty-first Mtg. Can. Tree Improv. Assoc. Part 2., Troro, N.S.
- Brix, H., 1981. Effects of thinning and nitrogen-fertilization on branch and foliage production in douglas-fir. *Can. J. For. Res.-Rev. Can. Rech. For.* 11, 502-511.
- Burns, R.M., Honkala, B.H., 1990. *Sylvics of North America*. United States Department of Agriculture, Forest Service, Agriculture. , Washington, DC.
- 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.
- Canadian Council of Forest Ministers, 2002. *Compendium of Canadian Forestry Statistics*. Service, C.F., Ottawa, Ontario.
- Cao, T.J., Valsta, L., Harkonen, S., Saranpaa, P., Makela, A., 2008. Effects of thinning and fertilization on wood properties and economic returns for Norway spruce. *For. Ecol. Manage.* 256, 1280-1289.

- Clark, A., Daniels, R.F., Jordan, L., 2006. Juvenile/mature wood transition in loblolly pine as defined by annual ring specific gravity, proportion of latewood, and microfibril angle. *Wood Fiber Sci.* 38, 292-299.
- Cook, E.R., Holmes, R.L., 1986. User manual for program Arstan. University of Arizona, 50-65.
- Coté, G., Bouchard, M., Pothier, D., Gauthier, S., 2010. Linking attributes to cartographic information for ecosystem management purposes in the boreal forest of eastern Québec. *For. Chron.* 86, 511-519.
- Coulombe, G., Huot, J., Arsenault, J., Bauce, E., Bernard, J.-T., Bouchard, A., Liboiron, M.A., Szaraz, G., 2004. Commission d'étude sur la gestion de la forêt publique québécoise. p. 314.
- de Kort, I., Loeffen, V., Baas, P., 1991. Ring width, density and wood anatomy of Douglas fir with different crown vitality. *IAWA Bull.* 12, 453-465.
- Denne, M.P., 1988. Definition of latewood according to Mork (1928). *IAWA Bull.* 10, 59-62.
- Deslauriers, A., 1999. Mise en place du cerne de croissance chez le sapin baumier (*Abies balsamea* (L.) Mill.). Département des sciences fondamentales. Université du Québec à Chicoutimi, Chicoutimi, p. 82.
- Dutilleul, P., Herman, M., Avella-Shaw, T., 1998. Growth rate effects on correlations among ring width, wood density, and mean tracheid length in Norway spruce (*Picea abies*). *Can. J. For. Res.-Rev. Can. Rech. For.* 28, 56-68.
- Erickson, H.D., Harrison, A.T., 1974. Douglas-fir wood quality studies. 1. Effects of age and stimulated growth on wood density and anatomy. *Wood Sci. Technol.* 8, 207-226.
- Fahlvik, N., Eko, P.M., Pettersson, N., 2005. Influence of precommercial thinning grade on branch diameter and crown ratio in *Pinus sylvestris* in southern Sweden. *Scand. J. Forest Res.* 20, 243-251.
- Farrar, J.L., 1995. Trees in Canada. Fitzhenry & Whiteside Limited and the Canadian Forest Service.

- Fillion, D., 2004. Portrait et état de situation des forêts de la région du Saguenay-Lac-St-Jean et de leur gestion. Commission d'étude sur la gestion de la forêt publique québécoise, 35 p.
- Fritts, J.C., 1971. Dendroclimatology and dendroecology. *Quaternary Research* 1, 419-449.
- Fritts, J.C., 1976. *Tree rings and climate*. Academic Presse, New York.
- Fritts, J.C., Swetnam, T.W., 1989. Dendrochronology: a tool for evaluating variations in past and present forest environments. *Adv. Ecol. Res.* 19, 111-188.
- Gagnon, D., 1995. Courte histoire d'une jeune forêt. *Quatre-temps* 19, 20-23.
- Gillespie, A.R., Allen, H.L., Vose, J.M., 1994. Amount and vertical-distribution of foliage of young loblolly-pine trees as affected by canopy position and silvicultural treatment. *Can. J. For. Res.-Rev. Can. Rech. For.* 24, 1337-1344.
- Gough, C.M., Seiler, J.R., Maier, C.A., 2004. Short-term effects of fertilization on loblolly pine (*Pinus taeda* L.) physiology. *Plant Cell Environ.* 27, 876-886.
- Grabner, M., Wimmer, R., Gierlinger, N., Evans, R., Downes, G., 2005. Heartwood extractives in larch and effects on X-ray densitometry. *Can. J. For. Res.-Rev. Can. Rech. For.* 35, 2781-2786.
- Groot, A., Lussier, J.M., Mitchell, A.K., Macsaac, D.A., 2005. A silvicultural systems perspective on changing Canadian forestry practices. *For. Chron.* 81, 50-55.
- Groot, A., Saucier, J.P., 2008. Volume increment efficiency of *Picea mariana* in northern Ontario, Canada. *For. Ecol. Manage.* 255, 1647-1653.
- Grote, R., Pretzsch, H., 2002. A model for individual tree development based on physiological processes. *Plant Biol.* 4, 167-180.
- Hall, J.P., 1984. The relationship between wood density and growth rate and the implications for the selection of black spruce plus trees. Information Report N-X-224. For. Res. Cent., Can. For. Ser., Newfoundland.
- Holmes, R.L., 1983. Computer assisted quality control in tree-ring dating and measurement. *Tree-Ring Bulletin* 43, 69-78.

- Hunter, M.L.J., 1990. Wildlife, forest and forestry: principles of managing forests for biological diversity. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ.
- Hutton, J., 1788. Theory of the earth; or an investigation of the laws observable in the composition, dissolution, and restoration of land upon the globe. Transactions of the Royal Society of Edinburgh 1, 209-304.
- Ivkovich, M., Namkoong, G., Koshy, M., 2002. Genetic variation in wood properties of interior spruce. II. Tracheid characteristics. Can. J. For. Res.-Rev. Can. Rech. For. 32, 2128-2139.
- Jaakkola, T., Makinen, H., Saranpaa, P., 2005a. Wood density in Norway spruce: changes with thinning intensity and tree age. Can. J. For. Res.-Rev. Can. Rech. For. 35, 1767-1778.
- Jaakkola, T., Makinen, H., Saren, M.P., Saranpaa, P., 2005b. Does thinning intensity affect the tracheid dimensions of Norway spruce? Can. J. For. Res.-Rev. Can. Rech. For. 35, 2685-2697.
- Jordan, L., Re, R.C., Hall, D.B., Clark, A., Daniels, R.F., 2006. Variation in loblolly pine cross-sectional microfibril angle with tree height and physiographic region. Wood Fiber Sci. 38, 390-398.
- Jozsa, L.A., Middleton, G.R., 1997. Les caractéristiques déterminant la qualité du bois : nature et conséquences pratiques. Forintek Canada Corp. Publication spéciale SP-34F.
- Kang, K.Y., Zhang, S.Y., Mansfield, S.D., 2004. The effects of initial spacing on wood density, fibre and pulp properties in jack pine (*Pinus banksiana* Lamb.). Holzforschung 58, 455-463.
- Karlsson, H., 2006. Fiberguide: Fibre analysis and process applications in the pulp and paper industry. AB Lorentzen&Wettre, Sweden. p. 120
- Kneeshaw, D., Williams, H., Nikinmaa, E., Messier, C., 2002. Patterns of above- and below-ground response of understory conifer release 6 years after partial cutting. Can. J. For. Res.-Rev. Can. Rech. For. 32, 255-265.
- Koubaa, A., Isabel, N., Zhang, S.Y., Beaulieu, J., Bousquet, J., 2005. Transition from juvenile to mature wood in black spruce (*Picea mariana* (Mill.) BSP). Wood Fiber Sci. 37, 445-455.

- Koubaa, A., S.Y., Z., Makni, S., 2002. Defining the transition from earlywood to latewood in black spruce based on intrering wood density profiles from X-ray densitometry. *Ann. Sci. Forest* 59, 511-518.
- Krause, C., Rossi, S., Thibeault-Martel, M., Plourde, P.Y., 2010. Relationships of climate and cell features in stems and roots of black spruce and balsam fir. *Annals of Forest Science* 67, 7.
- Kuuluvainen, T., 1991. The effect of two growth forms of norway spruce on stand development and radiation interception- A model analysis. *Trees-Struct. Funct.* 5, 171-179.
- Laplante, S., 2009. Effet de l'éclaircie précommerciale et de l'éclaircie commerciale sur la croissance radiale et la qualité du bois de l'épinette noire de la sapinière à bouleau blanc du Saguenay-Lac-St-Jean. Département des sciences fondamentales. Université du Québec à Chicoutimi, Chicoutimi, Qc, p. 49.
- Larson, P.R., 1969. Wood formation and the concept of wood quality. *Yale Univ. Sch. For. Bull.* 74.
- Law, K.N., Valade, J.L., 1997. Effect of wood quality on thermomechanical pulping : a case study on Black Spruce and Jack Pine. *Proceeding of the Timber management toward wood quality and end-product value. CTIA/IUFRO international wood quality workshop, Quebec city, Canada*, pp. 3-7.
- Levasseur, V., 2000. analyse dendroécologique de l'impact de la tordeuse des bourgeons de l'épinette (*Choristoneura fumiferana*) suivant un gradient latitudinal en zone boréale au Québec. Département des sciences fondamentales. Université du Québec à Chicoutimi, Chicoutimi, p. 96.
- Lindstrom, H., 1996. Basic density in Norway spruce; Development from pith outwards. *Wood Fiber Sci.* 28, 391-405.
- Liu, C., Ruel, J.C., Zhang, S.Y., 2007a. Immediate impacts of partial cutting strategies on stand characteristics and value. *For. Ecol. Manage.* 250, 148-155.
- Liu, C.M., Zhang, S.Y., Jiang, Z.H., 2007b. Models for predicting lumber grade yield using tree characteristics in black spruce. *For. Prod. J.* 57, 60-66.
- Macdonald, E., Hubert, J., 2002. A review of the effects of silviculture on timber quality of Sitka spruce. *Forestry* 75, 107-138.

- Makela, A., 1997. A carbon balance model of growth and self-pruning in trees based on structural relationships. *For. Sci.* 43, 7-24.
- Makinen, H., Colin, F., 1999. Predicting the number, death, and self-pruning of branches in Scots pine. *Can. J. For. Res.-Rev. Can. Rech. For.* 29, 1225-1236.
- Makinen, H., Hein, S., 2006. Effect of wide spacing on increment and branch properties of young Norway spruce. *European Journal of Forest Research* 125, 239-248.
- Makinen, H., Saranpaa, P., Linder, S., 2002a. Wood-density variation of Norway spruce in relation to nutrient optimization and fibre dimensions. *Can. J. For. Res.-Rev. Can. Rech. For.* 32, 185-194.
- Makinen, H., Saranpää, P., Linder, S., 2002b. Effect of growth rate on fibre characteristics in norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.). *Holzforschung* 56, 449-460.
- Mansfield, S.D., Parish, R., Di Lucca, C.M., Goudie, J., Kang, K.Y., Ott, P., 2009. Revisiting the transition between juvenile and mature wood: a comparison of fibre length, microfibril angle and relative wood density in lodgepole pine. *Holzforschung* 63, 449-456.
- McCarthy, J.W., Weetman, G., 2006. Age and size structure of gap-dynamic, old-growth boreal forest stands in Newfoundland. *Silva. Fenn.* 40, 209-230.
- Megraw, R.A., 1985. Wood quality factors in loblolly pine: Influences of tree age, position in tree and cultural practices on wood specific gravity, fiber length and fibril angle. TAPPI Press, Atlanta.
- Megraw, R.A., 1986. Douglas-fir wood properties. In: Oliver, C.D.H., D. P., Johnson, J.A., Douglas-fir: Stand management for the future. Coll. For. Resources, University of Washington, pp. 81-96.
- Miron, S., Riopel, M., Bégin, J., Gauthier, D., Ruel, J.-C., 2008. Facteurs affectant l'accroissement, le chablis et la qualité des tiges dans une CPPTM. Colloque international de la Chaire de recherche industrielle CRSNG, Université Laval en sylviculture et faune.
- Mork, E., 1928. Die Qualität des Fichtenholzes unter besonderer Rücksichtnahme auf Schleif-und Papierholz. *Der Papier-Fabrikant* 26, 741-747.

- Morling, T., 2002. Evaluation of annual ring width and ring density development following fertilisation and thinning of Scots pine. *Annals of Forest Science* 59, 29-40.
- MRNF (Ministère des ressources naturelles et de la faune du Québec), 2006. Portrait Territorial-Saguenay-Lac-St-Jean. Direction générale du Saguenay-Lac-Saint-Jean, p. 90.
- MRNFP (Ministère des ressources naturelles, de la faune et des parcs du Québec), 2003. Manuel d'aménagement forestier (4e édition). Direction des programmes forestiers. ISBN : 2-550-41174-9. Pagination multiple.
- Nicholls, J.W.P., 1984. Tracheid cell dimensions and density relationships for normal and abnormal wood of *Pinus radiata* (Don) D. *Australian Forest Research* 14, 85-98.
- Nicoll, B., Dunn, A.J., 2000. The effect of wind speed and direction on radial growth of structural roots. In supporting roots of trees and woody plants: form, function and physiology. Kluwer Academic Publishers.
- Niemisto, P., 1995. Influence of initial spacing and row-to-row distance on the crown and branch properties and taper of silver birch (*Betula pendula*). *Scand. J. Forest Res.* 10, 235-244.
- NLGA, 2008. Règle de classification pour le bois d'oeuvre canadien. Commission National de Classification des Sciages, New Westminster, Colombie-Britannique. p. 276.
- O'Neil, L.C., 1963. The suppression of growth rings in jack pine in relation to defoliation by the Swaine jack-pine sawfly. *Cana. J. Bot.* 41, 227-235.
- O'Neil, M., 1998. World trends and their effects on Canadian forest practices. *For. Chron.* 74, 831-833.
- Oliver, C.D., Larson, B.C., 1996. *Forest Stand Dynamics*. John Wiley and Sons, New York.
- Panshin, A.J., Zeeuw, C., 1980. *Textbook of wood technology*. McGraw-Hill, New-York.
- Pape, R., 1999. Effects of thinning regime on the wood properties and stem quality of *Picea abies*. *Scand. J. Forest Res.* 14, 38-50.

- Peltola, H., Miina, J., Rouvinen, I., Kellomaki, S., 2002. Effect of early thinning on the diameter growth distribution along the stem of Scots pine. *Silva. Fenn.* 36, 813-825.
- Pfister, O., Wallentin, C., Nilsson, U., Eko, P.M., 2007. Effects of wide spacing and thinning strategies on wood quality in Norway spruce (*Picea abies*) stands in southern Sweden. *Scand. J. Forest Res.* 22, 333-343.
- Pothier, D., Doucet, R., Boily, J., 1995. The effect of advance regeneration height on future yield of black spruce stands. *Can. J. For. Res.-Rev. Can. Rech. For.* 25, 536-544.
- Pothier, D., Margolis, A., 1991. Analysis of growth and light interception of balsam fir and white birch saplings following precommercial thinning. *Ann. Sci. For.* 48, 123-132.
- Pothier, D., Margolis, H.A., 1990. Changes in the water relations of balsam fir and white birch saplings after thinning. *Tree Physiol.* 6, 371-380.
- Pothier, D., Margolis, H.A., Poliquin, J., Waring, R.H., 1989. Relation between the permeability and the anatomy of jack-pine sapwood with stand development. *Can. J. For. Res.-Rev. Can. Rech. For.* 19, 1564-1570.
- Raulier, F., Pothier, D., Bernier, P., 2003. Predicting the effect of thinning on growth of dense balsam fir stands using a process-based tree growth model. *Can. J. For. Res.-Rev. Can. Rech. For.* 33, 509-520.
- Raven, P.H., Evert, R. F., Eichhorn, S. E., Bouharmont, J., & Evrard, C.-M. , 2000. *Biologie végétale*. De Boeck Université, Paris.
- Riopel, M., Begin, J., Ruel, J.C., 2010. Probabilités de pertes des tiges individuelles, cinq ans après des coupes avec protection des petites tiges marchandes, dans des forêts résineuses du Québec. *Can. J. For. Res.-Rev. Can. Rech. For.* 40, 1458-1472.
- Rioux, J., Bélanger, L., Bujold, F., 2004. Effets de la CPPTM et de la CPHRS sur la faune de la pessière noire de l'Est. Programme de mise en valeur du milieu forestier (volet 1). Département des sciences du bois et de la forêt, Université Laval, Québec, p. 53.
- Risi, J., Zeller, E., 1960. Specific gravity of the wood of black spruce (*Picea mariana* (Mill) BSP) grown on a *Hylocomium-Cornus* site type. *Laval Univ. For. Res. Found.* , Quebec.

- Running, S.W., 1980. Fiel estimates of root and xylem resistances in *Pinus contorta* using root excision. *J. Exp. Bot.* 31, 555-569.
- SAS, 2002-2008, SAS System, version 9.2, SAS Institute Inc., Cary, North Carolina
- Saucier, J.P., Bergeron, J. F., Grondin, P., Robitaille, A., 1998. Les régions écologiques du Québec méridional: un des éléments du système hiérarchique de classification écologique du territoire mis au point par le ministère des Ressources naturelles. 124, 1-12.
- Schneider, R., Zhang, S.Y., Swift, D.E., Begin, J., Lussier, J.M., 2008. Predicting selected wood properties of jack pine following commercial thinning. *Canadian Journal of Forest Research* 38, 2030-2043.
- Sperry, J.S., Adler, F.R., Campbell, G.S., Comstock, J.P., 1998. Limitation of plant water use by rhizosphere and xylem conductance: results from a model. *Plant Cell Environ.* 21, 347-359.
- Swetman, T.W., Thompson, M.A., Sutherland, W.K., 1985. Spruce budworm handbook. Using dendrochronology to measure radial growth of defoliated trees. United States Departement of Agriculture handbook no. 639.
- Tasissa, G., Burkhart, H.E., 1998. Modeling thinning effects on ring specific gravity of loblolly pine (*Pinus taeda* L.). *For. Sci.* 44, 212-223.
- Tong, Q.J., Zhang, S.Y., 2005. Impact of initial spacing and precommercial thinning on jack pine tree growth and stem quality. *For. Chron.* 81, 418-428.
- Urban, S.T., Lieffers, V.J., Macdonald, S.E., 1994. Release in radial growth in the trunk and structural roots of withe spruce as measured by dendrochronology. *Can. J. For. Res.-Rev. Can. Rech. For.* 24, 1550-1556.
- Vaganov, E.A., 1990. The tracheidogram method in tree-ring analysis and its application. Cook, R., L., Kairiukstis, *Methods of dendrochronology*. Kluwer Academy, Drodrecht, pp. 63-76.
- Viens, E., 2001. Effets de l'éclaircie commerciale sur la croissance et la forme de la tige du pin gris (*Pinus banksiana* Lamb.) en Abitibi, Québec. Département des sciences fondamentales. Université du Québec à Chicoutimi, Chicoutimi, p. 63.

- Vincent, M., Krause, C., Zhang, S.Y., 2009. Radial growth response of black spruce roots and stems to commercial thinning in the boreal forest. *Forestry* 82, 557-571.
- Vose, J.M., 1988. Patterns of leaf-area distribution within crowns of nitrogen-fertilized and phosphorus-fertilized loblolly-pine trees. *For. Sci.* 34, 564-573.
- Walker, J.F.C., 1993. Principles and Practice. Proceeding Primary wood processing. Chapman and Hall, London.
- Wang, L., Payette, S., Begin, Y., 2002. Relationships between anatomical and densitometric characteristics of black spruce and summer temperature at tree line in northern Quebec. *Can. J. For. Res.-Rev. Can. Rech. For.* 32, 477-486.
- Weiskittel, A.R., Maguire, D.A., Monserud, R.A., 2007. Response of branch growth and mortality to silvicultural treatments in coastal Douglas-fir plantations: Implications for predicting tree growth. *For. Ecol. Manage.* 251, 182-194.
- Yang, J.J., Lu, H.J., 1997. Wood density, mechanical properties and their conversion. *China Wood Industry* 11, 35-38.
- Yang, K.C., Hazenberg, G., 1994. Impact of spacing on tracheid length, relative density, and growth-rate of juvenile wood and mature wood in *Picea mariana*. *Can. J. For. Res.-Rev. Can. Rech. For.* 24, 996-1007.
- Zhang, S.Y., 1998. Effect of age on the variation, correlations and inheritance of selected wood characteristics in black spruce (*Picea mariana*). *Wood Sci. Technol.* 32, 197-204.
- Zhang, S.Y., Chauret, G., Ren, H.Q.Q., Desjardins, R., 2002. Impact of initial spacing on plantation black spruce lumber grade yield, bending properties, and MSR yield. *Wood Fiber Sci.* 34, 460-475.
- Zhang, S.Y., Chauret, G., 2001. Impact of initial spacing on tree and wood characteristics, product quality and value recovery in black spruce (*Picea mariana*). Canadian Forest Service Repor. No. 35. Forintek Canada Corp., p. 47.
- Zhang, S.Y., Gosselin, R., Chauret, G., 1997. Timber management toward wood quality and end-product value. Proceeding CTIA/IUFRO International wood quality workshop, Quebec city, pp. 17-39.

- Zhang, S.Y., Morgenstern, E.K., 1995. Genetic-variation and inheritance of wood density in black spruce (*Picea mariana*) and its relationship with growth-Implications for tree breeding. *Wood Sci. Technol.* 30, 63-75.
- Zhang, S.Y., Simpson, D., Morgenstern, E.K., 1996. Variation in the relationship of wood density with growth in 40 black spruce (*Picea mariana*) families grown in New Brunswick. *Wood Fiber Sci.* 28, 91-99.
- Zobel, B., van Buijtenen, J.P., 1989. Wood variations. Its causes and control. Springer, Series in wood science. Springer-Verlag, Berlin, p. 363.
- Zobel, B.J., Sprague, J.R., 1998. Juvenile wood in forest tree. Springer-Verlag, Berlin, Germany.

ANNEXE 1

RECOUVREMENT DES STRATES ARBUSTIVES, HERBACÉES ET MUSCINALES

Tableau 8. Recouvrement (%) des espèces de la strate arbustive par station d'échantillonnage.

Bloc	Intervention	Strate arbustive							
		<i>Picea mariana</i>	<i>Abies balsamea</i>	<i>Betula papyrifera</i>	<i>Chiogene hispidula</i>	<i>Vaccinium myrtilloides</i>	<i>Kalmia angustifolia</i>	<i>Ledum groenlandicum</i>	<i>Vaccinium angustifolium</i>
ECLA1	EC	80.0	3.0	-	26.8	-	-	-	-
	Témoïn	-	-	-	-	-	-	-	-
ECLC1	EC	10.0	-	-	40.1	10.0	5.3	-	-
	Témoïn	-	-	-	-	-	-	-	-
ECLC2	EC	1.3	-	-	6.0	10.0	-	-	-
	Témoïn	-	-	-	-	-	-	-	-
ECMV3	EC	3.0	-	-	83.5	-	-	-	-
	Témoïn	-	-	-	-	-	-	-	-
ECMV4	EC	1.0	-	-	47.5	-	-	-	-
	Témoïn	-	-	-	-	-	-	-	-
CPPTMB3	CPPTM	30	30	-	45.9	-	-	-	-
	Témoïn	1.8	-	-	3.0	-	-	-	-
CPPTMB10	CPPTM	<1.0	16.5	-	45.3	-	-	-	-
	Témoïn	10.9	15.3	-	9.8	-	-	-	-
CPPTMB3	CPPTM	3.0	-	-	65.0	-	-	3.0	-
	Témoïn	3.0	4.1	-	27.7	-	-	-	-
CPPTMB21	CPPTM	20.0	-	-	6.5	3.0	50.0	36.7	10.0
	Témoïn	16.7	-	-	3.0	3.0	8.3	15.0	20.0
CPPTMB5	CPPTM	15.0	-	-	14.3	-	-	55.0	15.0
	Témoïn	5.3	-	-	3.0	-	5.3	30.0	15.0
CPRSMV1	CPRS	11.7	-	-	10.0	27.0	-	8.5	-
CPRSMV2	CPRS	10.0	-	5.0	-	36.2	15.0	5.0	-
CPRSMV3	CPRS	7.5	-	-	25.0	-	-	-	-
CPRSMV4	CPRS	10.0	-	10.0	11.3	-	10.0	-	-
CPRSR169	CPRS	-	-	-	-	21.7	27.5	-	40.0

Tableau 9. Recouvrement (%) des espèces de la strate herbacée par station d'échantillonnage.

Bloc	Intervention	Strate herbacée				
		<i>Cornus canadensis</i>	<i>Coptis groenlandica</i>	<i>Oxalis montana</i>	<i>Trientalis borealis</i>	<i>Linnaea borealis</i>
ECLA1	EC	-	-	-	-	-
	Témoïn	-	-	-	-	-
ECLC1	EC	11.7	-	-	-	-
	Témoïn	-	-	-	-	-
ECLC2	EC	31.3	3.0	<1.0	3.0	5.5
	Témoïn	-	-	-	-	-
ECMV3	EC	2.5	-	-	-	-
	Témoïn	-	-	-	-	-
ECMV4	EC	-	<1.0	-	-	-
	Témoïn	-	-	-	-	-
CPPTMB3	CPPTM	<1.0	-	-	-	-
	Témoïn	-	-	-	-	-
CPPTMB10	CPPTM	1.8	1.3	-	-	5.3
	Témoïn	1.8	-	-	-	10.0
CPPTMB20	CPPTM	-	-	-	-	-
	Témoïn	<1.0	3.0	-	-	-
CPPTMB21	CPPTM	3.0	3.0	-	-	-
	Témoïn	-	-	-	-	-
CPPTMB5	CPPTM	-	-	-	-	-
	Témoïn	3.0	-	-	-	-
CPRSMV1	CPRS	15.0	-	-	-	-
CPRSMV2	CPRS	-	-	-	-	-
CPRSMV3	CPRS	41.3	-	-	-	-
CPRSMV4	CPRS	8.3	-	-	-	-
CPRSR169	CPRS	12.5	-	-	-	-

Tableau 10. Recouvrement (%) des espèces de la strate muscinale par station d'échantillonnage.

Bloc	Intervention	Strate muscinale				
		<i>Pleurozium shreberi</i>	<i>Polytrichum sp.</i>	<i>Sphagnum sp.</i>	<i>Ptilium crista-cartensis</i>	<i>Hylocomium splendens</i>
ECLA1	EC	20.9	30.0	<1.0	-	19.1
	Témoin	-	-	-	-	-
ECLC1	EC	10.0	6.8	9.3	-	67.5
	Témoin	-	-	-	-	-
ECLC2	EC	25.0	2.0	40.0	12.5	-
	Témoin	-	-	-	-	-
ECMV3	EC	-	-	-	-	-
	Témoin	-	-	-	-	-
ECMV4	EC	40.0	5.0	2.0	2.0	20.3
	Témoin	-	-	-	-	-
CPPTMB3	CPPTM	-	<1.0	65.0	-	-
	Témoin	34.3	-	-	<1.0	48.3
CPPTMB10	CPPTM	5.3	6.5	47.6	-	-
	Témoin	23.3	3.0	40.0	-	10.0
CPPTMB3	CPPTM	13.5	10.0	30.0	13.5	21.0
	Témoin	23.3	<1.0	30.0	20.0	45.0
CPPTMB21	CPPTM	-	-	-	-	-
	Témoin	30.0	-	-	-	-
CPPTMB5	CPPTM	45.0	-	-	-	-
	Témoin	55.0	-	50.0	-	3.0
CPRSMV1	CPRS	33.8	45.0	-	-	-
CPRSMV2	CPRS	38.8	7.5	-	-	-
CPRSMV3	CPRS	32.5	10.0	-	-	-
CPRSMV4	CPRS	-	-	-	-	-
CPRSR169	CPRS	33.75	5.63	-	-	-

ANNEXE 2

CARACTÉRISTIQUES DES SOLS

Tableau 11. Caractéristiques du sol par station d'échantillonnage.

Bloc	Intervention	Drainage	Épaisseur des horizons		
			Humus (cm)	Ae (cm)	B (cm)
ECLA1	EC	Bon	10	13	9
	Témoin	.	-	-	-
ECLC1	EC	Bon	10	15	22
	Témoin	.	-	-	-
ECLC2	EC	Mauvais	6	N/D	30
	Témoin	.	-	-	-
ECMV3	EC	Bon	11	19	25
	Témoin	.	-	-	-
ECMV4	EC	Bon	3	5	25
	Témoin	.	-	-	---
CPPTMB3	CPPTM	Très mauvais	7	N/D	15
	Témoin	Bon	30	N/D	N/D
CPPTMB10	CPPTM	Excessif	N/D	N/D	N/D
	Témoin	Mauvais	15	N/D	N/D
CPPTMB20	CPPTM	Bon	15	N/D	10
	Témoin	Bon	17	13	5
CPPTMB21	CPPTM	Bon	10	20	N/D
	Témoin	Modéré	20	10	N/D
CPPTMB5	CPPTM	Mauvais	17	7	N/D
	Témoin	Imparfait	28	N/D	N/D
CPRSMV1	CPRS	Rapide	10	15	20
CPRSMV2	CPRS	Bon	15	20	30
CPRSMV3	CPRS	Bon	20	25	30
CPRSMV4	CPRS	Imparfait	15	5	5
CPRSR169	CPRS	Bon	15	15	25