

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ	II
REMERCIEMENTS	III
TABLE DES MATIÈRES.....	IV
LISTE DES TABLEAUX.....	VII
LISTE DES FIGURES	VIII
LISTE DES FORMULES	X
1. INTRODUCTION	1
1.1 La coupe avec protection des petites tiges marchandes	1
1.2 Effet sur la croissance et la qualité du bois	2
1.3 Objectifs.....	5
1.4 Hypothèses.....	6
2. MATÉRIEL ET MÉTHODES	7
2.1 Aire d'étude et caractéristiques des sites	7
2.2 Échantillonnage	9
2.3 Mesures et traitement des données	12
2.3.1 Analyse de la croissance.....	12
2.3.1.1 Accroissement de la tige	12
2.3.1.2 Accroissement des branches	15
2.3.2 Analyse de la qualité du bois.....	17
2.3.2.1 Pourcentage de bois final	17
2.3.2.2 Propriétés mécaniques	17

2.3.2.3 Diamètre des branches dans les verticilles.....	19
2.3.2.4 Masse volumique	19
2.4 Analyses statistiques.....	20
2.4.1 Comparaison CPPTM vs TÉMOIN	20
2.4.2 Comparaison AVANT CPPTM vs APRÈS CPPTM	21
2.4.3 Épinette noire vs Sapin baumier.....	22
3. RÉSULTATS.....	23
3.1 Comparaison CPPTM VS TÉMOIN	23
3.1.1 Analyse de la croissance.....	23
3.1.1.1 Accroissement annuel de la tige	23
3.1.1.2 Productivité par tige	26
3.1.1.3 Accroissement annuel en longueur des branches.....	28
3.1.1.4 Accroissement radial annuel des branches	31
3.1.2 Analyse de la qualité du bois.....	33
3.1.2.1 Volume et pourcentage de bois final	33
3.1.2.2 Propriétés mécaniques	35
3.1.2.3 Diamètre moyen des branches dans les verticilles.....	36
3.1.2.4 Masse volumique	37
3.2 Comparaison AVANT CPPTM vs APRÈS CPPTM.....	39
3.2.1 Analyse de la croissance.....	39
3.2.1.1 Accroissement annuel de la tige	40
3.2.1.2 Accroissement annuel en longueur des branches.....	42
3.2.1.3 Accroissement radial annuel des branches	45
3.2.2 Analyse de la qualité du bois.....	47
3.2.2.1 Volume et pourcentage de bois final	47
3.2.2.2 Propriétés mécaniques	49
3.2.2.3 Masse volumique	50

4. DISCUSSION	53
4.1 Analyse de la croissance.....	53
4.1.1 Accroissement de la tige	53
4.1.2 Accroissement des branches	55
4.2 Analyse de la qualité du bois.....	57
4.2.1 Diamètre moyen des branches dans les verticilles.....	57
4.2.2 Pourcentage de bois final et masse volumique	58
4.2.3 Propriétés mécaniques.....	60
4.3 Épinette noire vs Sapin baumier	61
4.4 Croissance vs Qualité du bois.....	62
4.5 Limites de l'étude	63
5. CONCLUSION	64
6. RÉFÉRENCES.....	65

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Description des sites d'étude	8
Tableau 2. Caractéristiques des sites échantillonnés	9
Tableau 3. Répartition du nombre d'individus (et pourcentage que cela représente) selon les classes d'accroissement radial moyen.....	23
Tableau 4. Résultats des analyses de variance à mesures répétées en fonction du traitement et des années pour l'accroissement annuel en diamètre, en hauteur et en volume de l'épinette noire et du sapin baumier.....	24
Tableau 5. Résultats des analyses de variance à mesures répétées en fonction du traitement et des années pour l'accroissement annuel radial et en longueur des branches le long de la cime vivante de l'épinette noire et du sapin baumier	29
Tableau 6. Résultats des analyses de variance à mesures répétées en fonction du traitement et des années pour les paramètres de qualité du bois (accroissement en volume de bois final, pourcentage de bois final, modules d'élasticité et de rupture, diamètre moyen des branches) de l'épinette noire et du sapin baumier	34
Tableau 7. Résultats des analyses de variance à mesures répétées en fonction du traitement et des années pour la masse volumique moyenne et la masse volumique du bois initial et du bois final de l'épinette noire et du sapin baumier du bloc B20	38
Tableau 8. Résultats des analyses de variance à mesures répétées en fonction des années pour l'accroissement annuel en diamètre, en hauteur et en volume des tiges résiduelles d'épinette noire et de sapin baumier	40
Tableau 9. Résultats des analyses de variance à mesures répétées en fonction des années pour l'accroissement annuel radial et en longueur des branches le long de la cime vivante de l'épinette noire et du sapin baumier	43
Tableau 10. Résultats des analyses de variance à mesures répétées en fonction des années pour les paramètres de qualité du bois (accroissement annuel en volume de bois final, pourcentage annuel de bois final, modules d'élasticité et de rupture) de tiges résiduelles d'épinette noire et de sapin baumier	47
Tableau 11. Résultats des analyses de variance à mesures répétées en fonction des années pour la masse volumique moyenne et la masse volumique du bois initial et du bois final de tiges résiduelles d'épinette noire et de sapin baumier	51

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Localisation des sites d'échantillonnage	8
Figure 2. Représentation schématique des échantillons récoltés sur chacun des arbres pour les mesures de croissance et de qualité du bois	11
Figure 3. Représentation schématique de la division du houppier en cinq sections de même dimension.....	11
Figure 4. Représentation schématique de la croissance en longueur d'une branche	16
Figure 5. Représentation schématique de la préparation des échantillons pour les tests de résistance mécanique	18
Figure 6. Accroissement annuel moyen standardisé en diamètre (sans unité) avant et après CPPTM de tiges résiduelles et témoins d'épinette noire et de sapin baumier.....	25
Figure 7. Accroissement annuel moyen standardisé en volume (sans unité) avant et après CPPTM de tiges résiduelles et témoins d'épinette noire et de sapin baumier.....	26
Figure 8. Production moyenne en volume (en dm^3) pour les années avant et après CPPTM de tiges résiduelles et témoins d'épinette noire et de sapin baumier	27
Figure 9. Accroissement annuel moyen en longueur (en mm) des branches de l'épinette noire et du sapin baumier pour les cinq sections de la cime vivante	30
Figure 10. Accroissement radial annuel moyen (en mm) des branches de l'épinette noire et du sapin baumier pour les cinq sections de la cime vivante	32
Figure 11. Accroissement annuel moyen standardisé en volume de bois final (sans unité) avant et après CPPTM pour les tiges résiduelles et témoins d'épinette noire et de sapin baumier	34
Figure 12. Volume de bois final (en pourcentage) avant et après CPPTM de tiges résiduelles et témoins d'épinette noire et de sapin baumier	35
Figure 13. Module d'élasticité et module de rupture (en N/mm^2) avant et après CPPTM de tiges résiduelles et témoins d'épinette noire et de sapin baumier.....	36

Figure 14. Diamètre moyen (en mm) des branches dans les verticilles de l'épinette noire et du sapin baumier pour les cinq sections de la cime vivante	37
Figure 15. Masse volumique moyenne (en kg/m ³) du cerne de croissance des huit années avant la CPPTM, de l'année du traitement et des huit années après pour les épinettes noires et les sapins baumiers du bloc B20	38
Figure 16. Accroissement annuel moyen en diamètre (sans unité) de tiges résiduelles d'épinette noire et de sapin baumier provenant de sites de CPPTM	41
Figure 17. Accroissement annuel moyen en volume (sans unité) de tiges résiduelles d'épinette noire et de sapin baumier provenant de sites de CPPTM	42
Figure 18. Accroissement annuel moyen en longueur (en mm) des branches de tiges résiduelles d'épinette noire et de sapin baumier pour les cinq sections de la cime vivante	44
Figure 19. Accroissement radial annuel moyen (en mm) des branches de tiges résiduelles d'épinette noire et de sapin baumier pour les cinq sections de la cime vivante	46
Figure 20. Accroissement annuel moyen en volume de bois final (sans unité) de tiges résiduelles d'épinette noire et de sapin baumier provenant de sites de CPPTM	48
Figure 21. Volume de bois final (en pourcentage) de tiges résiduelles d'épinette noire et de sapin baumier provenant de sites de CPPTM	49
Figure 22. Module d'élasticité et module de rupture (en N/mm ²) avant et après CPPTM de tiges résiduelles d'épinette noire et de sapin baumier	50
Figure 23. Masse volumique moyenne (en kg/m ³) du cerne de croissance de tiges résiduelles d'épinette noire et de sapin baumier avant et après CPPTM.....	51
Figure 24. Masse volumique moyenne (en kg/m ³) du bois initial et du bois final de tiges résiduelles d'épinette noire et de sapin baumier avant et après CPPTM.....	52

LISTE DES FORMULES

Formule 1. Rayon moyen	13
Formule 2. Volume d'un cône	13
Formule 3. Volume d'un arbre	13
Formule 4. Indice d'accroissement radial	14
Formule 5. Indice d'accroissement en diamètre	14
Formule 6. Indice d'accroissement en volume	14
Formule 7. Accroissement moyen (γ)	14
Formule 8. Module d'élasticité (MOE)	18
Formule 9. Module de rupture (MOR)	18

1. INTRODUCTION

1.1 LA COUPE AVEC PROTECTION DES PETITES TIGES MARCHANDES

Depuis quelques années, les perceptions et les attentes face à la forêt ont beaucoup changé au Québec. Autrefois vue essentiellement comme une source de matière ligneuse à récolter, on cherche maintenant plutôt à mettre en place des règles pour tenter de protéger l'immense réservoir de biodiversité qu'elle représente. L'aménagement forestier écosystémique se veut une approche par laquelle des moyens d'aménagement et des traitements sylvicoles plus appropriés sont privilégiés dans le but de protéger les divers écosystèmes et la biodiversité qui leur est associée. Dans le milieu forestier, le maintien de la biodiversité consiste à assurer la conservation de toute la variété des écosystèmes présents à l'état naturel sur un territoire. Parmi les attributs qu'il importe de préserver, la structure interne des peuplements prend de plus en plus d'importance au fur et à mesure que progresse notre compréhension de la dynamique naturelle des écosystèmes boréaux (Gauthier *et al.*, 2008). Le défi de la biodiversité en aménagement forestier oblige ainsi le sylviculteur à se doter d'outils qui le rendent apte à reproduire toute cette diversité naturelle à l'intérieur des paysages aménagés. C'est dans cette perspective qu'il faut envisager la venue de la coupe avec protection des petites tiges marchandes (Gouvernement du Québec, 2002).

La coupe avec protection des petites tiges marchandes (CPPTM) est un traitement sylvicole dont l'objectif est la récolte d'une partie importante du couvert forestier, soit de 70 à 90 % du volume marchand, et au cours de laquelle les gaules des classes de diamètre de 2 à 8 cm et les petites tiges marchandes de 10 à 14 cm de diamètre sont soigneusement protégées (Gouvernement du Québec, 2002). Lors de leur récolte, les tiges des classes de diamètre 10 à 14 cm nécessitent beaucoup de manipulation comparativement aux revenus qu'elles peuvent engendrer en raison de leurs petites dimensions. La CPPTM permet donc de conserver ces tiges de dimensions marchandes marginales pour que celles-ci puissent

continuer à se développer et former la strate dominante du nouveau peuplement, qui pourrait ultérieurement être récolté sur une période raccourcie (Riopel *et al.*, 2000). Ce type de coupe partielle convient aux peuplements résineux inéquiennes, irréguliers ou étagés (Gouvernement du Québec, 2002) et vise à perpétuer la structure interne du peuplement en conservant les attributs structuraux. De cette façon, les écarts entre les conditions forestières naturelles et celles résultant du traitement sylvicole sont minimisés, ce qui atténue les impacts sur la biodiversité et la productivité des écosystèmes (Gauthier *et al.*, 2008). De plus, un couvert relativement important est conservé pouvant fournir un abri à de nombreux animaux (Gouvernement du Québec, 2002). La CPPTM cause tout de même une perturbation majeure de l'écosystème. Bien que les impacts sur la structure du peuplement et sur les communautés d'oiseaux et de petits mammifères soient moindres que pour les coupes avec protection de la régénération et des sols (CPRS), des coupes partielles où la rétention d'arbres est beaucoup plus importante (coupes de jardinage) sont plus susceptibles d'atténuer l'impact de l'aménagement sur la biodiversité (Cimon-Morin *et al.*, 2010; Le Blanc, 2009).

1.2 EFFET SUR LA CROISSANCE ET LA QUALITÉ DU BOIS

L'ouverture du milieu résultant d'un type de coupe comme la CPPTM entraîne un changement des conditions de croissance des arbres résiduels. Ainsi, la diminution de compétition permet d'obtenir plus de lumière et plus d'eau, une plus grande quantité d'éléments nutritifs sont disponibles et le sol peut être plus facilement réchauffé par les rayons solaires, ce qui favorise la croissance (Bowyer *et al.*, 2007). La diminution de la densité d'un peuplement par l'intermédiaire de coupes partielles est d'ailleurs reconnue pour induire un gain de croissance au niveau de la tige (Latham et Tappeiner, 2002; Thorpe *et al.*, 2007; Youngblood, 1991). Par contre, cette augmentation de croissance pourrait entraîner une diminution de la qualité du bois, notamment en ce qui concerne la densité du bois et les propriétés mécaniques (Alteyrac, 2005; Zhang, 1995).

Jozsa et Middleton (1997) décrivent la qualité du bois comme étant l'aptitude du bois à être utilisé pour un usage précis. En d'autres mots, la qualité du bois peut être vue comme la mesure des caractéristiques du bois qui influencent les propriétés des produits que l'on retire de ce bois. Étant donné les multiples utilisations du bois, toutes ses caractéristiques, qu'elles soient chimiques, anatomiques, physiques ou mécaniques, peuvent être considérées comme des facteurs de qualité; ces derniers sont donc relativement nombreux (Alteyrac, 2005). Parmi les attributs les plus importants permettant de définir la qualité du bois, on retrouve le diamètre et la forme de la tige, le nombre et la taille des nœuds, la densité (ou masse volumique) du bois, le contenu en bois juvénile, la longueur des trachéides, l'angle des microfibrilles dans la paroi cellulaire, le bois de compression et les propriétés mécaniques (MacDonald et Hubert, 2002; Willcocks et Bell, 1995; Zhang, 2003).

Les travaux sylvicoles ont pour objet d'accélérer la croissance des arbres et d'augmenter la valeur du peuplement final en réduisant la compétition et en favorisant la nutrition (Jozsa et Middleton, 1997). La croissance accélérée se traduit au niveau du cerne de croissance par une augmentation du nombre de cellules de bois initial, mais sans grand changement au niveau du bois final (Barbour *et al.*, 1994; Schweingruber, 1988). Ce changement dans les proportions de bois initial et de bois final résulte en une diminution du pourcentage de bois final dans le cerne (Koga *et al.*, 2002; Zhang, 1995). Puisque la masse volumique du bois dépend du pourcentage de bois final et du diamètre radial des trachéides du bois initial (Lindström, 1997), un moindre pourcentage de bois final pourrait avoir comme conséquence une diminution de la masse volumique du bois dans le cerne et de la masse volumique globale du bois produit par l'arbre. Koga et Zhang (2002) ont également relevé que la masse volumique moyenne des cernes était fortement liée à ses composants (la masse volumique du bois initial et celle du bois final) et au pourcentage de bois final. Quant aux propriétés mécaniques du bois, celles-ci sont fortement corrélées à la masse volumique de telle façon que le module d'élasticité, ou rigidité, et le module de rupture, ou résistance, augmentent de façon presque linéaire avec la masse volumique (Bowyer *et al.*,

2007). Les propriétés mécaniques du bois dépendent aussi d'autres facteurs, dont le pourcentage de bois juvénile, le bois de compression et la présence et la taille des nœuds (Zhang et Koubaa, 2009).

Les branches des arbres résiduels peuvent également profiter de la disponibilité accrue de lumière et d'espace après une coupe partielle et permettre à l'arbre d'avoir une cime verte plus étendue et plus productive pour la photosynthèse. Ceci se traduit par une augmentation de la croissance radiale des branches, si bien que l'arbre aura des branches plus grosses (Mäkinen et Hein, 2006), influençant ainsi la résistance et la rigidité du bois, de même que l'apparence des produits finis (MacDonald et Hubert, 2002). En effet, les branches, et plus particulièrement les branches de fort diamètre, créent une zone de faiblesse dans le bois de la tige due à la déviation du fil (Jozsa et Middleton, 1997) et ce phénomène, jumelé au fait que la masse volumique est diminuée par l'accélération de croissance, influence la résistance mécanique du bois (MacDonald et Hubert, 2002). Les propriétés mécaniques du bois, comme le module d'élasticité et le module de rupture en flexion qui sont les caractéristiques mécaniques les plus utilisées pour déterminer la qualité du bois, peuvent donc elles aussi être affectées par une intervention sylvicole en raison de l'effet du traitement sur la croissance, sur la masse volumique du bois et sur le diamètre des branches. En ce sens, il est raisonnable de penser que la qualité du bois pourrait être affectée par un traitement sylvicole comme la CPPTM.

Jusqu'à présent, peu de recherches se sont intéressées à la réponse des arbres résiduels après une coupe partielle (Thorpe *et al.*, 2007) et il existe peu d'informations sur les effets des pratiques sylvicoles sur la qualité du bois de l'épinette noire et du sapin baumier (Zhang et Koubaa, 2009). La CPPTM étant une intervention encore relativement récente, les données pour évaluer la croissance et la qualité du bois des tiges résiduelles dans les peuplements traités sont presque inexistantes, en particulier dans le cas du sapin baumier. L'épinette noire et le sapin baumier, deux espèces reconnues comme ayant un bon potentiel de réaction à l'élimination du couvert (Riopel, 1999; Riopel *et al.*, 2000), sont des

essences commerciales particulièrement importantes au Québec. Il serait donc souhaitable d'obtenir plus d'informations sur la croissance et la qualité de leur bois suite à la coupe avec protection des petites tiges marchandes, ce qui pourrait aider à confirmer la pertinence de prescrire la CPPTM dans un cadre d'aménagement écosystémique et augmenter la fréquence d'utilisation du traitement.

1.3 OBJECTIFS

Évaluer l'effet de la CPPTM sur la croissance et sur certaines caractéristiques déterminant la qualité du bois de l'épinette noire (*Picea mariana* (Mill.) BSP) et du sapin baumier (*Abies balsamea* (L.) Mill.) en forêt boréale. Plus spécifiquement:

1. Évaluer l'accroissement annuel des tiges (en diamètre, hauteur et volume) et des branches (radial et en longueur) provenant de forêts traitées et non traitées et en faire la comparaison avant et après traitement ainsi qu'entre les deux espèces;
2. Évaluer certains paramètres de la qualité du bois et en faire la comparaison avant et après traitement, entre arbres traités et témoins ainsi qu'entre épinette noire et sapin baumier:
 - au niveau des branches (diamètre des branches);
 - au niveau de la tige (pourcentage de bois final, module d'élasticité et module de rupture en flexion, masse volumique du bois).

1.4 HYPOTHÈSES

Les branches devraient d'abord bénéficier de la disponibilité accrue de lumière et d'espace pour augmenter leur croissance en longueur, permettant ainsi à l'arbre de faire plus de photosynthèse. Plus de sucres nécessaires à la croissance seront alors produits, que l'arbre pourra utiliser pour augmenter sa croissance en diamètre, tant au niveau des branches que de la tige. Toutefois, une augmentation du diamètre des branches entraînera une diminution de la qualité du bois des tiges.

Une augmentation de la croissance radiale des tiges devrait donc être observée suite à la CPPTM, ce qui ne devrait pas être sans effet sur la qualité du bois produit. L'augmentation de croissance devrait se traduire par une augmentation de la proportion de bois initial dans les cernes de croissance, mais sans changement au niveau du bois final, résultant ainsi en une diminution du pourcentage de bois final (Barbour *et al.*, 1994; Koga *et al.*, 2002; Zhang, 1995). Puisque le bois initial est moins dense, la croissance accélérée devrait entraîner une diminution de la masse volumique du bois (Larson, 1969). Les propriétés mécaniques pourraient également être diminuées par cet accroissement plus rapide, celles-ci étant fortement corrélées avec la masse volumique (Bowyer *et al.*, 2007).

2. MATÉRIEL ET MÉTHODES

2.1 AIRE D'ÉTUDE ET CARACTÉRISTIQUES DES SITES

Les sites retenus dans le cadre de ce projet ont été sélectionnés parmi les 27 blocs de recherche implantés dans la province par l'Université Laval entre 1997 et 2002. Ces blocs sont distribués dans les domaines bioclimatiques de la sapinière à bouleau jaune, de la sapinière à bouleau blanc ainsi que dans la pessière à mousses et couvrent une diversité de compositions et de densités du couvert (Riopel *et al.*, 2010). Une coupe avec protection des petites tiges marchandes a été effectuée dans chacun des blocs de recherche. Le choix des blocs s'est effectué à partir des critères suivants:

- situés dans la région du Saguenay-Lac-St-Jean ou de la Côte-Nord;
- la CPPTM devait avoir été réalisée entre 1997 et 2000 afin de disposer d'une période de huit à dix ans après l'intervention;
- les blocs devaient contenir une proportion d'épinette noire et de sapin baumier.

Quatre blocs répondant à ces critères ont été échantillonnés au cours des étés 2009 et 2010 (figure 1). Des sites témoins n'ayant subi aucune intervention et présentant des caractéristiques similaires (dépôt, drainage, pente) ont été sélectionnés à proximité des sites traités par CPPTM.

Des inventaires réalisés sur le terrain avant l'intervention ont permis de déterminer que les sites choisis présentaient tous, avant la CPPTM, une structure diamétrale inéquienne et des caractéristiques semblables au niveau de la composition, de la densité, de la hauteur et de l'âge des peuplements (tableau 1).

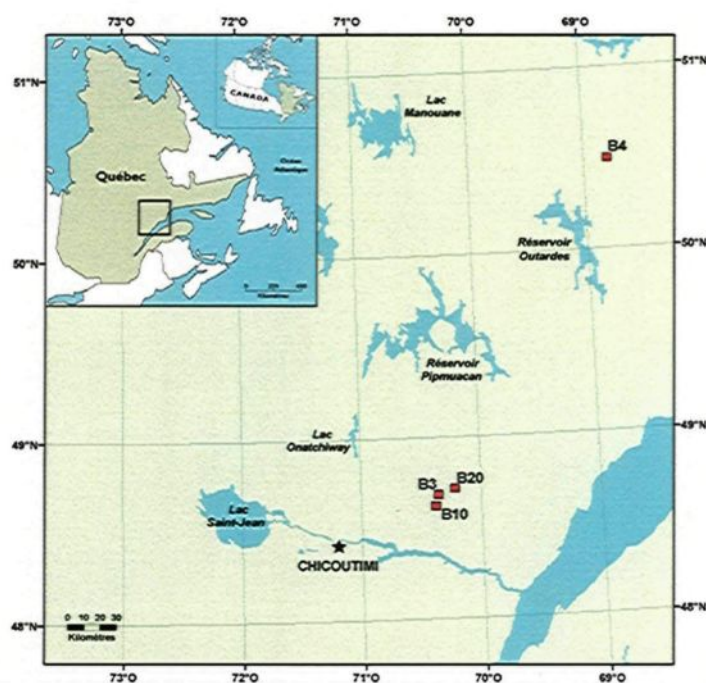


Figure 1. Localisation des sites d'échantillonnage.

Tableau 1. Description des sites d'étude.

Bloc	Site	Traitement	Année de la CPPTM	Coordonnées GPS	Peuplement avant coupe*	Volume marchand avant coupe (m ³ /ha)	Volume marchand récolté (%)
B3	B3	CPPTM	1997	N 48° 41' 00.7" W 70° 21' 50.9"	EE B3 Vin	145.2	79.0
	B3T	TEMOIN	-	N 48° 41' 10.0" W 70° 21' 50.0"			-
B4	B4	CPPTM	1997	N 50° 30' 03.7" W 68° 47' 41.0"	ES C2 120	156.5	84.5
	B4T	TEMOIN	-	N 50° 29' 59.2" W 68° 48' 10.0"			-
B10	B10	CPPTM	1999	N 48° 41' 33.3" W 70° 21' 32.1"	SE-ES B3 120	147.0	80.0
	B10T	TEMOIN	-	N 48° 41' 36.3" W 70° 22' 07.6"			-
B20	B20	CPPTM	2000	N 48° 42' 58.1" W 70° 13' 15.1"	SE B3 120	132.0	72.0
	B20T	TEMOIN	-	N 48° 43' 02.3" W 70° 13' 27.4"			-

*EE B3 Vin: Pessière noire, classe de densité 60 à 80 %, classe de hauteur 12 à 17 m, âgé de plus de 80 ans

ES C2 120: Pessière à sapin, classe de densité 40 à 60 %, classe de hauteur 17 à 22 m, âgé de plus de 101 ans

SE B3 120: Sapinière à épinette noire, classe de densité 60 à 80 %, classe de hauteur 12 à 17 m, âgé de plus de 101 ans

2.2 ÉCHANTILLONNAGE

Dans chacun des sites, trois épinettes noires et trois sapins baumiers se situant à bonne distance des sentiers, ayant un DHP entre 8 cm et 15 cm et ne présentant pas de blessure ou de défaut apparent ont été sélectionnés parmi les tiges dominantes et codominantes. Trois répétitions par site ont été effectuées dans les peuplements traités pour bien représenter la variabilité des sites, alors qu'un seul échantillon a été utilisé dans les peuplements témoins. En somme, 24 arbres par bloc ont été sélectionnés, pour un total de 96 arbres récoltés.

Lors de l'échantillonnage, la hauteur, le diamètre à hauteur de poitrine (DHP) et la longueur de la cime vivante de chaque tige sélectionnée ont été mesurés. Les individus provenant des sites de CPPTM et ceux provenant du site témoin qui leur est associé ont des caractéristiques assez similaires pour l'âge moyen au niveau du sol, le DHP et la hauteur moyenne, ainsi que pour le pourcentage de cime verte (tableau 2). La seule exception notable se retrouve dans le bloc B20, où l'âge des arbres témoins est inférieur à l'âge des arbres traités.

Tableau 2. Caractéristiques des tiges échantillonnées.

Bloc	Site	Épinette noire				Sapin baumier			
		Âge moyen	DHP moyen	Hauteur moyenne	% cime verte	Âge moyen	DHP moyen	Hauteur moyenne	% cime verte
B3	B3	85.0	12.7	9.5	58.6	104.7	12.3	7.8	55.8
	B3T	92.0	11.1	10.1	40.2	117.7	10.6	8.3	48.7
B4	B4	171.8	13.7	10.2	66.7	116.4	14.3	8.7	67.1
	B4T	173.0	14.2	11.3	62.1	119.7	13.1	8.2	74.1
B10	B10	87.2	12.9	9.0	72.6	97.9	13.3	9.5	57.2
	B10T	90.3	11.8	9.4	59.3	100.7	11.7	9.0	53.2
B20	B20	126.2	13.6	10.4	64.3	123.3	11.8	8.1	58.9
	B20T	78.7	13.2	9.5	65.3	103.3	11.3	8.8	59.8
	CPPTM	117.6	13.2	9.8	65.5	110.6	12.9	8.5	59.7
	TEMOIN	108.5	12.6	10.1	56.7	110.3	11.7	8.6	59.0

Une fois les arbres abattus, divers échantillons ont été récoltés le long de la tige pour l'analyse de la croissance et de la qualité du bois (figure 2). D'abord, des rondelles ont été récoltées à tous les mètres ainsi qu'à 1,3 m pour effectuer les analyses de tige. Celles-ci servent à évaluer la croissance et permettent également de mesurer un paramètre de qualité du bois, soit le pourcentage de bois final. Par la suite, cinq branches vivantes ont été récoltées à différentes hauteurs dans le houppier pour évaluer la croissance au niveau des branches. Afin de bien répartir ces cinq branches le long de la cime vivante, celle-ci a été préalablement divisée en cinq sections de même longueur, comme le montre la figure 3. De cette façon, chaque section représente 20 % de la longueur totale du houppier.

Pour évaluer la qualité du bois, la section de la tige située entre 0,5 et 1,0 mètre a été récoltée pour effectuer une analyse des propriétés mécaniques. Un échantillon provenant de la rondelle 1,3 m a aussi été récolté en vue des analyses densitométriques (masse volumique). Finalement, des verticilles répartis dans les cinq sections déterminées précédemment ont été ramenés pour évaluer le diamètre des branches le long de la tige.

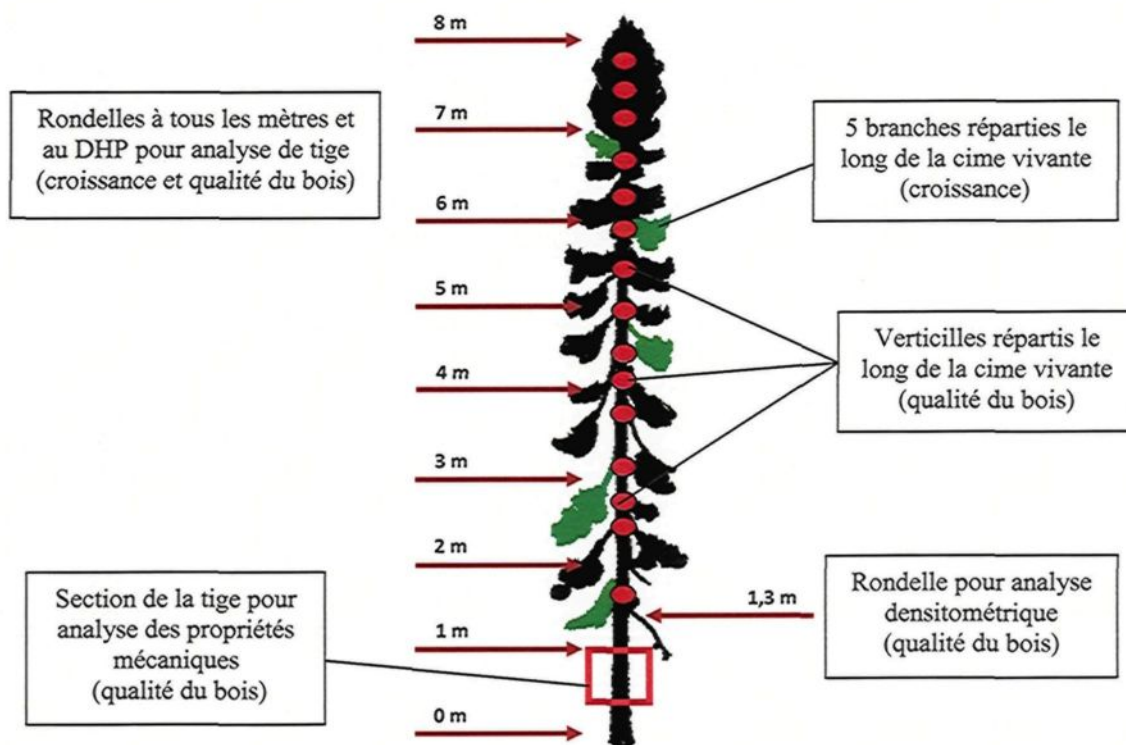


Figure 2. Représentation schématique des échantillons récoltés sur chacun des arbres pour les mesures de croissance et de qualité du bois.

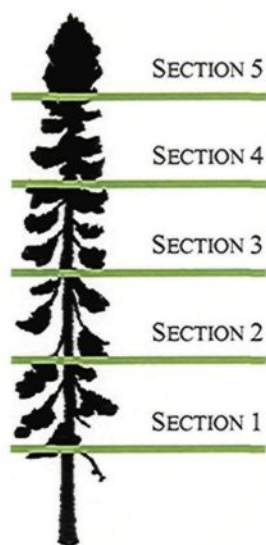


Figure 3. Représentation schématique de la division du houppier en cinq sections de même dimension.

2.3 MESURES ET TRAITEMENT DES DONNÉES

2.3.1 ANALYSE DE LA CROISSANCE

2.3.1.1 Accroissement de la tige

Les rondelles prélevées à tous les mètres le long de la tige ont été sablées pour améliorer la visibilité des cernes annuels de croissance. La mesure de la largeur des cernes s'est effectuée à l'aide du logiciel WinDENDRO (Guay *et al.*, 1992) et de la table dendrométrique de marque Henson (précision de 0,01 mm) dans le cas des échantillons dont les cernes de croissance étaient très minces ou mal définis. Les mesures ont été réalisées sur quatre rayons pour les rondelles situées entre 0 et 2 mètres, et sur deux rayons opposés pour le reste.

L'interdatation a ensuite été utilisée pour détecter les erreurs de mesure ainsi que les cernes discontinus ou absents. D'abord, les mesures des largeurs de cernes ont été placées sous forme de graphiques pour l'interdatation visuelle sur une table lumineuse (Fritts, 1976; Stokes et Smiley, 1968), ce qui a permis de faire la comparaison des patrons de croissance des arbres afin d'identifier des erreurs. Les données ont également été traitées avec le programme COFECHA (Holmes, 1983), qui effectue une interdatation statistique des données, identifie celles qui sont moins bien corrélées et propose certaines possibilités de correction (Levasseur, 2000). L'interdatation a été faite entre les rayons d'une même rondelle, entre les rondelles d'un même arbre et entre les arbres de la même espèce et du même site.

L'accroissement annuel et cumulé en diamètre, en hauteur et en volume des tiges a ensuite été calculé avec le logiciel WinSTEM, à partir de la mesure des cernes de croissance à tous les mètres. Ce programme présente les données tirées des analyses de tige sous forme de moyenne de rayon, de diamètre, de surface, de hauteur et de volume en

fonction du temps (Tremblay, 2009). Ainsi, l'accroissement annuel radial est calculé par le programme en utilisant la méthode de la moyenne quadratique de Siostrzonek (1958), selon la formule suivante:

$$\text{Rayon moyen} = \sqrt{\frac{\sum R^2}{n}} \quad [1]$$

où R = mesure d'un rayon (mm)
 n = nombre de rayons de la rondelle

Le diamètre est ensuite calculé en multipliant le rayon moyen par deux. Quant à l'accroissement en hauteur, celui-ci est calculé selon la méthode de Carmean (1972), qui extrapole la hauteur de l'arbre entre les rondelles. Finalement, le volume d'un arbre, représenté par la somme des troncs de cônes délimités par deux rondelles consécutives, est calculé de la façon suivante (Régent Instruments Inc., 2003):

$$\text{Volume d'un cône tronqué} = \frac{\pi \times H \times (R_a^2 + R_a \times R_b + R_b^2)}{3} \quad [2]$$

$$\text{Volume d'un arbre} = \sum \left(\frac{\text{Volume des cônes tronqués}}{1000} \right) \quad [3]$$

où R_a = rayon de la plus grande rondelle (mm)
 R_b = rayon de la plus petite rondelle (mm)
 H = hauteur du tronc de cône (m)

Une standardisation des mesures d'accroissement radial (formule 4), en diamètre (formule 5) et en volume (formule 6) a dû être effectuée afin d'être en mesure de mieux comparer entre eux les individus de taille et d'âge différents. Elle permet de diminuer les effets des facteurs qui peuvent influencer la croissance, comme l'âge de l'arbre ou ses

conditions environnementales (Levasseur, 2000). La standardisation a été effectuée pour chacune des tiges, avec l'accroissement annuel et la moyenne des accroissements annuels de chaque tige:

$$\text{Indice d'accroissement radial} = \frac{\text{Accroissement annuel en rayon}}{\text{Moyenne des accroissements annuels en rayon}} \quad [4]$$

$$\text{Indice d'accroissement en diamètre} = \frac{\text{Accroissement annuel en diamètre}}{\text{Moyenne des accroissements annuels en diamètre}} \quad [5]$$

$$\text{Indice d'accroissement en volume} = \frac{\text{Accroissement annuel en volume}}{\text{Moyenne des accroissements annuels en volume}} \quad [6]$$

Afin d'évaluer dans un premier temps la réponse au traitement des individus échantillonnés, un pourcentage d'accroissement a été calculé pour chaque tige, représentant la moyenne de l'accroissement depuis l'année de l'intervention (Pamerleau-Couture, 2011; Vincent *et al.*, 2009). L'accroissement moyen (γ) a été calculé avec la moyenne de l'indice de croissance annuelle en rayon des huit années précédant la CPPTM et la moyenne des huit années suivant la coupe:

$$\gamma = \frac{(\sum_{t=(Ac+1)}^{Ac+8} \alpha_t) / 8}{(\sum_{t=(Ac-8)}^{Ac-1} \alpha_t) / 8} \times 100 \quad [7]$$

où γ = accroissement (%)

Ac = année de la CPPTM

t = temps (années)

α = indice de croissance radiale

Des seuils d'accroissement, déterminés par Vincent *et al.* (2009) ont permis de catégoriser l'accroissement des tiges résiduelles après la CPPTM. Un accroissement de moins de 80% signifie une diminution de la croissance radiale moyenne suite à la CPPTM. Un accroissement situé entre 80% et 120% correspond à la variabilité naturelle dans la croissance radiale, c'est-à-dire qu'il n'y a ni augmentation ni diminution de croissance observable (Pamerleau-Couture, 2011). Un accroissement de plus de 120% indique une augmentation de la croissance radiale et lorsque l'accroissement est supérieur à 200%, la croissance radiale est plus que doublée à la suite de la CPPTM.

2.3.1.2 Accroissement des branches

La croissance radiale et en longueur des branches a également été mesurée à l'aide de cinq branches récoltées le long de la cime vivante (figure 2). La croissance annuelle en longueur des branches a pu être mesurée à partir des cicatrices foliaires laissées à chaque année par le bourgeon apical, selon la méthode utilisée par Luszczynski (2009). La branche forme, à chaque année, une pousse apicale d'une certaine longueur et à chaque pousse apicale correspond un cerne de croissance. Le nombre de cernes de croissance présents au niveau d'une section de la branche correspond au nombre de pousses apicales présentes en amont de cette section (Luszczynski, 2009), comme le montre la figure 4. Pour évaluer l'accroissement en longueur d'une branche, le nombre de cicatrices foliaires et la distance séparant chacune d'entre elle ont été comptés, ce qui a permis d'attribuer une valeur de croissance en longueur pour chaque année.

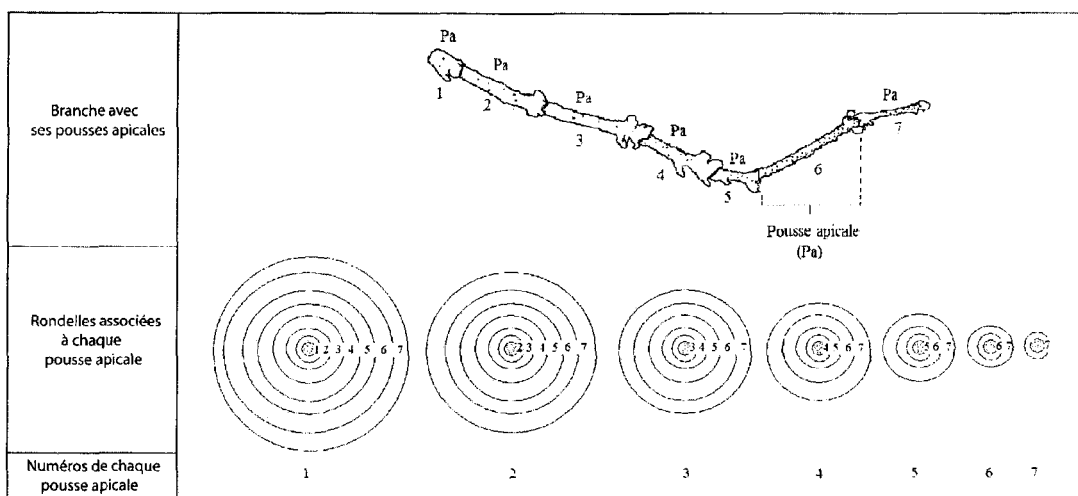


Figure 4. Représentation schématique de la croissance en longueur d'une branche.
Source: Luszczynski, 2009.

Une rondelle récoltée à la base de chaque branche a été utilisée pour mesurer l'accroissement radial des branches. De la même façon que pour les tiges, les petites rondelles ont été sablées et mesurées avec la table dendrométrique Henson. Un seul rayon a été mesuré, en évitant autant que possible la présence de bois de compression lorsque celui-ci était présent. Les mesures des largeurs de cernes n'ont cependant pas été interdites comme pour la tige, les séries étant trop courtes et présentant peu de variation entre les cernes (Luszczynski, 2009).

2.3.2 ANALYSE DE LA QUALITÉ DU BOIS

2.3.2.1 Pourcentage de bois final

En même temps que la largeur des cernes, la largeur du bois initial et du bois final de chaque cerne de croissance a été mesurée avec le logiciel WinDENDRO. Ce dernier permet une détection automatique de la zone de bois final à l'aide des changements d'intensité de lumière. Le volume de bois final peut ainsi être calculé de la même façon que pour le volume total de l'arbre et le pourcentage de bois final peut par la suite être calculé à partir du volume de bois final et du volume total de l'arbre.

2.3.2.2 Propriétés mécaniques

Pour mesurer la résistance mécanique, de petits échantillons clairs (sans nœud et sans défaut apparent) de 10 mm (radial) x 10 mm (tangential) x 150 mm (longitudinal) ont été préparés à partir de la section de la tige située entre 0,5 et 1,0 mètre du sol (figure 5). Ces petites dimensions ont été choisies puisque peu d'années se sont écoulées depuis l'intervention, ce qui fait en sorte qu'une petite quantité seulement de bois a été formée depuis que la CPPTM a été appliquée. Ainsi, les échantillons sélectionnés le plus près de l'écorce contiennent principalement des cernes de croissance formés dans les années après la CPPTM, alors que les échantillons pris plus à l'intérieur comprennent des cernes formés avant la coupe (Vincent, 2010). De cette façon, il est possible d'effectuer séparément des tests avec du bois formé avant et après le traitement. Les échantillons ont été séchés jusqu'à 12% d'humidité dans une chambre de conditionnement (Alteyrac *et al.*, 2006).

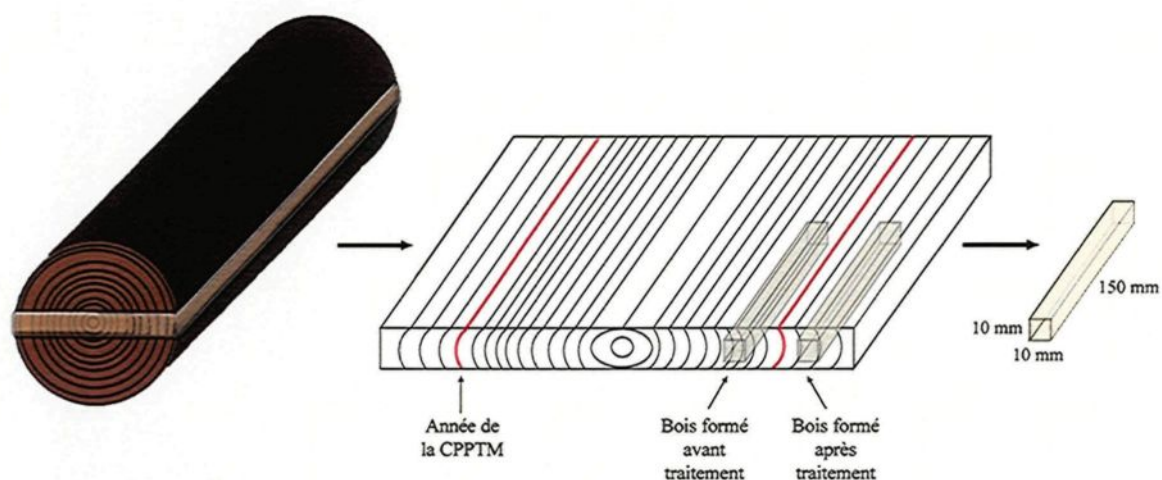


Figure 5. Représentation schématique de la préparation des échantillons pour les tests de résistance mécanique.

Un test de flexion statique à trois points a été réalisé sur un appareil MTS Alliance RT/100 selon la norme ASTM D-143 (ASTM, 2007), celle-ci étant quelque peu modifiée pour s'adapter aux petites dimensions des échantillons. La distance entre les appuis a été fixée à 110 mm et la vitesse de la presse établie à $1,3 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$. Le module d'élasticité (MOE) et le module de rupture (MOR) ont ensuite pu être calculés selon les formules suivantes (Bowyer *et al.*, 2007; Poncsak *et al.*, 2006):

$$\text{MOE} = \frac{P_1 L^3}{4bd^3 y_1} \quad [8]$$

$$\text{MOR} = \frac{3PL}{2bd^2} \quad [9]$$

où P_1 = charge maximale du domaine élastique (N)

L = distance entre les deux appuis (mm)

b = largeur de l'échantillon (mm)

d = épaisseur de l'échantillon (mm)

y_1 = déplacement du centre de l'échantillon à la limite d'élasticité (mm)

P = charge maximale appliquée (N)

Quatre échantillons par arbre ont été testés, deux échantillons provenant de bois formé avant la CPPTM et deux provenant de bois formé après la CPPTM. La moyenne de ces deux échantillons a servi à établir les valeurs du MOE et du MOR avant et après traitement.

2.3.2.3 Diamètre des branches dans les verticilles

Au moins trois verticilles par section du houppier ont été récoltés le long de la cime vivante (figure 2) pour mesurer le diamètre moyen branches. Le diamètre de chaque branche du verticille a été évalué à partir de la moyenne des diamètres vertical et horizontal mesurés à la base de la branche (Hein *et al.*, 2008a). Une fois le diamètre de toutes les branches mesuré, les cinq plus grosses branches ont été sélectionnées pour chacune des cinq sections du houppier.

2.3.2.4 Masse volumique

Pour un seul bloc, soit le B20, un profil de densité le long des cernes de croissance a été effectué à partir d'un échantillon récolté dans la tige à 1,3 m. En premier lieu, les échantillons ont dû être coupés aux bonnes dimensions, pour que chaque échantillon ait une dimension finale de 5 millimètres de largeur et 1,6 millimètre d'épaisseur, avant d'être placés quelques jours en chambre de conditionnement à 20°C et 65% d'humidité relative. Par la suite, la masse volumique approximative de chaque échantillon a été estimée (à partir de la surface, de l'épaisseur et de la masse), puis l'échantillon a pu être analysé au densitomètre. L'appareil utilisé, un densitomètre à rayons X QMS Tree ring analyser (modèle QTRS-01X), émet des rayons X qui parcourent les cernes de croissance, en partant de l'écorce vers la moelle. On obtient ainsi une valeur de masse volumique pour le bois initial, pour le bois final et une masse volumique moyenne pour chaque cerne de croissance

présent sur l'échantillon. La masse volumique approximative a servi à calibrer le densitomètre pour que la masse volumique moyenne mesurée par l'appareil pour un échantillon donné soit environ celle estimée. La transition entre le bois initial et le bois final a été déterminée selon la méthode du point d'inflexion (Koubaa *et al.*, 2002).

2.4 ANALYSES STATISTIQUES

La réaction des arbres a été quantifiée sur une base annuelle en comparant les valeurs avant et après traitement, tout en considérant l'accroissement annuel des arbres témoins. Pour ce faire, une période de huit années avant CPPTM, de même qu'une période équivalente de huit années après coupe ont servi pour la majorité des analyses statistiques.

2.4.1 COMPARAISON CPPTM vs TÉMOIN

Pour comparer les différents paramètres de croissance et de qualité du bois entre les arbres provenant des CPPTM et des témoins, une analyse de variance (ANOVA) multifactorielle à mesures répétées a été utilisée. La procédure MIXED du logiciel SAS a été utilisée, avec les facteurs BLOC et ARBRE aléatoires et les facteurs TRAITEMENT et ANNÉE (ou PÉRIODE dans le cas des propriétés mécaniques et SECTION dans le cas du diamètre des branches) fixes. L'arbre est le sujet et les années sont les mesures répétées sur chaque sujet. La structure de covariance a été sélectionnée à l'aide du critère AIC (Akaike, 1987) et pour tous les paramètres analysés, la matrice de type autorégressive AR(1) s'est avérée la plus appropriée en raison de l'autocorrélation entre les données.

Lorsque l'ANOVA à mesures répétées montrait un résultat significatif à l'interaction entre le traitement et les années, un test de comparaisons multiples par tranches a été effectué pour déterminer à quel endroit se situaient les différences.

Les données ont été préalablement transformées lorsque cela était nécessaire afin de respecter les conditions d'application de l'ANOVA, soit la normalité des données et l'homogénéité des variances (Quinn et Keough, 2002). Le seuil de signification α a été fixé à 0,05. Toutes les analyses statistiques ont été effectuées à l'aide du logiciel SAS 9.2 (SAS Institute, Cary, NC, USA).

2.4.2 COMPARAISON AVANT CPPTM vs APRÈS CPPTM

Une seconde analyse a été effectuée, cette fois uniquement sur les individus provenant des sites de CPPTM dans le but de déterminer si une différence s'est produite dans les années suivant l'application de la CPPTM par rapport à ce qui avait lieu dans les années précédant la coupe partielle. Pour ce faire, une moyenne des huit années avant CPPTM a été calculée pour chacun des paramètres de croissance et de qualité du bois et une ANOVA à mesures répétées a été effectuée. Comme pour l'analyse précédente, les facteurs BLOC et ARBRE étaient aléatoires et le facteur ANNÉE (ou PÉRIODE dans les cas des propriétés mécaniques) fixe. Les années (la moyenne des huit années avant, l'année du traitement et chacune des huit années après coupe) sont les mesures répétées sur chaque sujet, soit sur chaque arbre. À cette étape, on ne tient plus compte de la variabilité avant traitement.

Un test de comparaison de moyennes par contrastes a été utilisé pour déterminer quelles années après la CPPTM étaient significativement différentes de la moyenne des huit années précédant la coupe.

2.4.3 ÉPINETTE NOIRE VS SAPIN BAUMIER

Tout au long de l'étude, les deux espèces ont été traitées séparément et aucune comparaison statistique n'a été réalisée entre les deux espèces. Seule une comparaison visuelle a été effectuée.

3. RÉSULTATS

La majorité des individus échantillonnés ont montré une réponse positive après la CPPTM. En effet, près de 64% des épinettes noires et plus de 97% des sapins baumiers ont présenté une augmentation de croissance après la coupe partielle, avec un accroissement radial moyen de plus de 120% (tableau 3). Les sapins ont réagi très fortement à l'ouverture du milieu avec 72% des individus des CPPTM qui ont plus que doublé leur croissance alors que seulement 8% des épinettes ont présenté la même réponse.

Tableau 3. Répartition du nombre d'individus (et pourcentage que cela représente) selon les classes d'accroissement radial moyen.

Accroissement γ (%)	Épinette noire		Sapin baumier	
	CPPTM	TEMOIN	CPPTM	TEMOIN
$\gamma \leq 80$	3 (8.3)	3 (25.0)	-	-
$80 < \gamma \leq 120$	20 (55.6)	7 (58.3)	1 (2.8)	4 (33.3)
$120 < \gamma \leq 200$	10 (27.8)	2 (16.7)	9 (25.0)	7 (58.3)
$\gamma > 200$	3 (8.3)	-	26 (72.2)	1 (8.3)
Total	36 (100)	12 (100)	36 (100)	12 (100)

3.1 COMPARAISON CPPTM VS TÉMOIN

3.1.1 ANALYSE DE LA CROISSANCE

3.1.1.1 Accroissement annuel de la tige

Il y a une augmentation significative de l'accroissement en diamètre dans les années après la CPPTM par rapport aux témoins (figure 6). Pour les deux espèces, l'interaction entre TRAITEMENT et ANNÉE est hautement significative (tableau 4), ce qui indique une différence de la croissance en diamètre dans le temps attribuable à la CPPTM. Autant pour l'épinette noire que pour le sapin baumier, l'accroissement annuel en diamètre des arbres

traités était semblable ou légèrement inférieur aux témoins avant CPPTM, mais devient significativement plus élevé à partir de la quatrième année après la coupe. La réaction est plus importante pour le sapin.

Tableau 4. Résultats des analyses de variance à mesures répétées en fonction du traitement et des années pour l'accroissement annuel en diamètre, en hauteur et en volume de l'épinette noire et du sapin baumier. Les résultats significatifs sont présentés en caractères gras.

Paramètre	Source	Épinette noire			Sapin baumier		
		DL	F	Prob>F	DL	F	Prob>F
ACCROISSEMENT EN DIAMÈTRE	Traitement	1	2.66	0.1098	1	0.22	0.6462
	Année	16	8.67	<0.0001	16	36.42	<0.0001
	Traitement*Année	16	4.77	<0.0001	16	9.34	<0.0001
ACCROISSEMENT EN HAUTEUR	Traitement	1	4.15	0.0637	1	0.15	0.7061
	Année	16	3.00	<0.0001	16	2.85	0.0002
	Traitement*Année	16	0.89	0.5783	16	0.4	0.9835
ACCROISSEMENT EN VOLUME	Traitement	1	0.12	0.7376	1	0.78	0.3961
	Année	16	17.34	<0.0001	16	63.42	<0.0001
	Traitement*Année	16	3.82	<0.0001	16	8.7	<0.0001

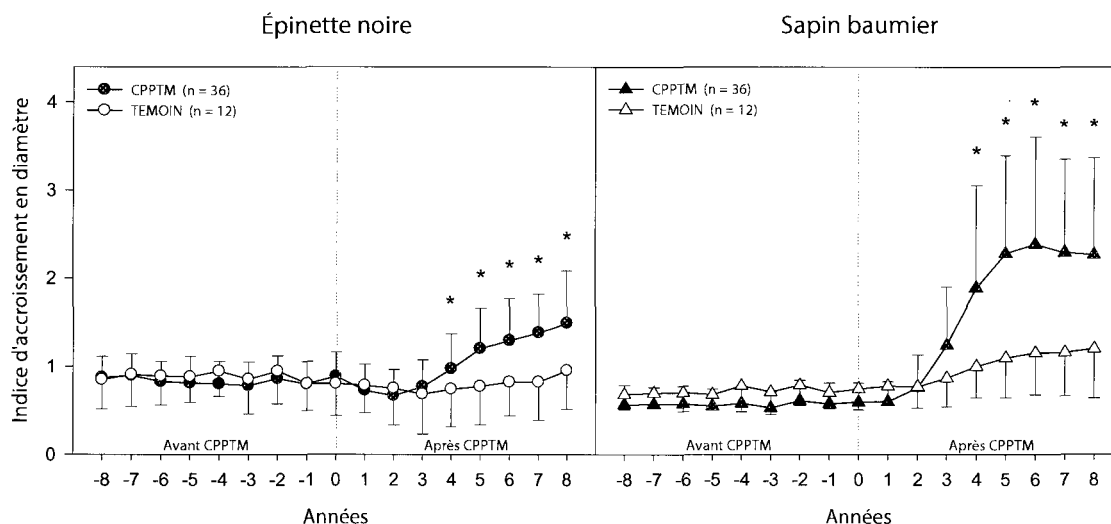


Figure 6. Accroissement annuel moyen standardisé en diamètre (sans unité) avant et après CPPTM de tiges résiduelles et témoins d'épinette noire et de sapin baumier. L'année 0 et le trait vertical pointillé indiquent l'année de la CPPTM et les barres d'erreur représentent l'écart-type. L'étoile montre une différence significative entre CPPTM et TÉMOIN pour une année donnée telle que déterminée par un test de comparaison par tranche.

Aucun changement dans le temps pour l'accroissement en hauteur n'est attribuable à la CPPTM (tableau 4). Pour l'épinette noire, l'accroissement en hauteur est légèrement plus élevé chez les témoins avant la CPPTM et le demeure après traitement. Quant au sapin baumier, aucune différence significative n'est présente, les individus traités par la CPPTM et les témoins montrent un accroissement annuel en hauteur très similaire.

En ce qui concerne l'accroissement annuel en volume, une différence significative dans le temps due à la CPPTM est observable chez les deux espèces (tableau 4). Pour l'épinette noire, l'accroissement en volume était similaire entre les individus traités et témoins pour les huit années avant la CPPTM (figure 7). À partir de la cinquième année après traitement, l'accroissement des arbres traités devient significativement supérieur à celui des témoins. Pour le sapin baumier, l'accroissement en volume était significativement plus élevé chez les témoins pour les huit années avant CPPTM, mais les arbres traités surpassent les témoins dès la troisième année après coupe et l'accroissement devient significativement supérieur à partir de la cinquième année, comme pour l'épinette.

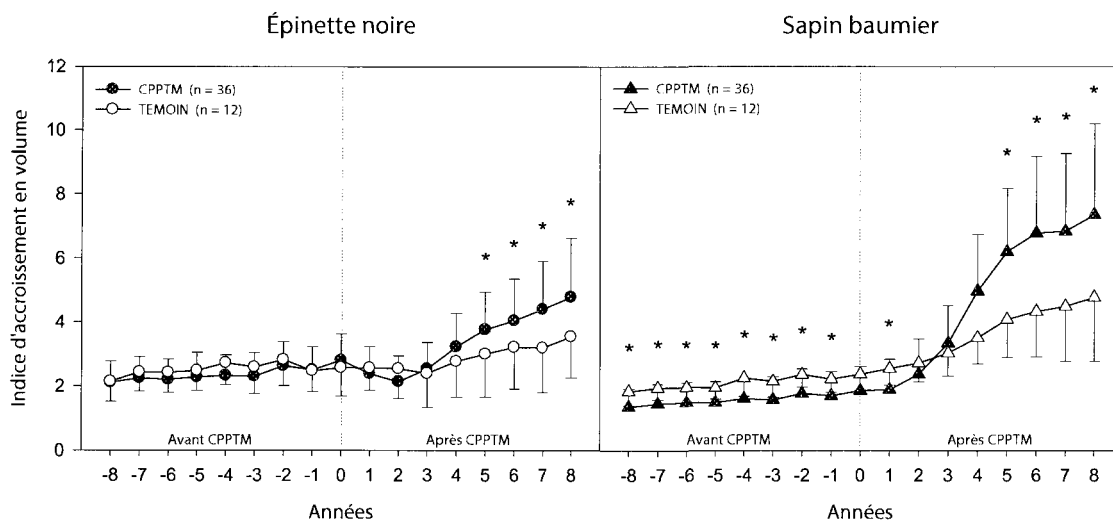


Figure 7. Accroissement annuel moyen standardisé en volume (sans unité) avant et après CPPTM de tiges résiduelles et témoins d'épinette noire et de sapin baumier. L'année 0 et le trait vertical pointillé indiquent l'année de la CPPTM et les barres d'erreur représentent l'écart-type. L'étoile montre une différence significative entre CPPTM et TÉMOIN pour une année donnée telle que déterminée par un test de comparaison par tranche.

3.1.1.2 Productivité par tige

La figure 8 présente la productivité des tiges, exprimée par la moyenne de l'accroissement cumulé en volume de tiges résiduelles des CPPTM et des témoins pour la période allant de 1950 à 2010. Les courbes CPPTM et témoin présentent une allure semblable, avec la courbe CPPTM légèrement supérieure à la courbe témoin. Chez l'épinette noire, la production en volume était déjà légèrement supérieure avant la coupe pour les individus traités par CPPTM et l'écart a continué de s'accroître après. Quant au sapin baumier, les courbes CPPTM et témoin présentent des valeurs similaires avant CPPTM, mais un écart prononcé se développe dans les années après coupe, de sorte qu'une différence d'environ 10 dm³ sépare les deux courbes à l'année 2009. Ainsi, l'augmentation de l'accroissement annuel en volume observée dans les années après l'application du traitement (figure 7) se traduit par une productivité plus importante chez les individus traités. À ce jour, les valeurs moyennes de production sont inférieures pour le sapin baumier par rapport à l'épinette noire, mais l'accélération de la production après la CPPTM

est plus importante chez le sapin.

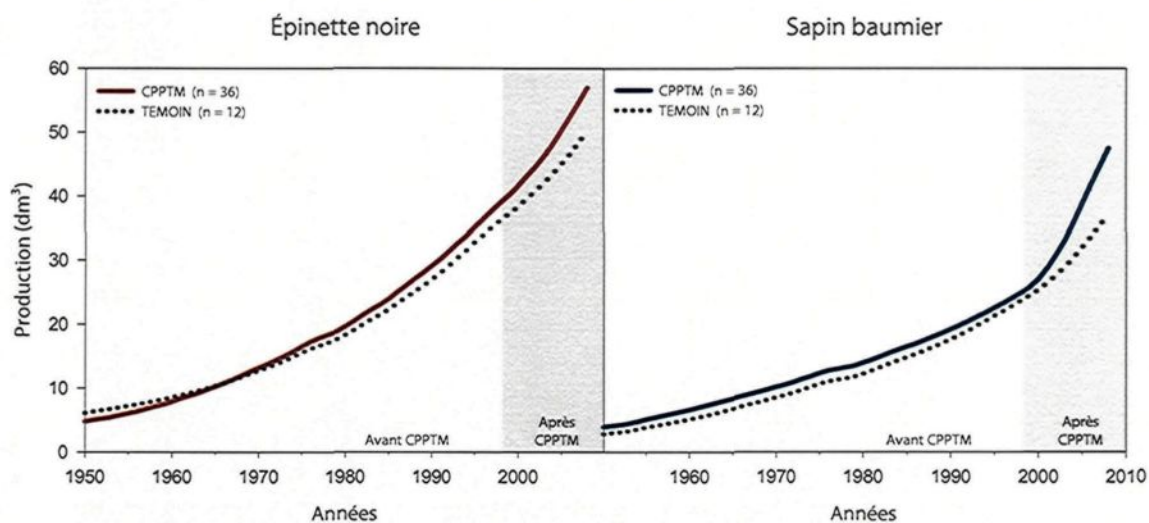


Figure 8. Production moyenne en volume (en dm^3) pour les années avant et après CPPTM de tiges résiduelles et témoins d'épinette noire et de sapin baumier.

En ce qui concerne l'accroissement cumulé en diamètre (figure non présentée), les résultats obtenus sont très semblables à ce qui a été obtenu pour la production en volume, c'est-à-dire que pour l'épinette noire, l'accroissement cumulé moyen est légèrement supérieur pour les individus ayant subi une CPPTM lors des années précédant la coupe partielle et l'écart devient plus prononcé dans les années après. Pour le sapin baumier, les deux courbes d'accroissement étaient similaires dans les années avant coupe; les individus traités par CPPTM semblent néanmoins avoir bien profité de leurs nouvelles conditions de croissance après la coupe alors qu'un écart marqué à la faveur des CPPTM apparaît dans les années après l'intervention. À ce jour, les épinettes noires et les sapins baumiers ont des valeurs de diamètre cumulé moyen équivalentes. Quant à l'accroissement cumulé moyen en hauteur (figure non présentée), celui-ci est très semblable entre les CPPTM et les témoins, et ce, pour les deux espèces. Toutefois, la hauteur cumulée moyenne de l'épinette noire est d'environ 1,50 m supérieure à celle du sapin baumier. La hauteur inférieure du sapin pour un diamètre cumulé moyen comparable entre les deux espèces explique la production inférieure du sapin observée à la figure 8.

En somme, il est possible d'observer une augmentation de la croissance en volume et en diamètre des arbres résiduels dans les années après la CPPTM. L'augmentation perçue est plus marquée pour le sapin baumier. Par contre, aucun changement n'est visible par rapport aux témoins en ce qui concerne la hauteur annuelle ou cumulée.

3.1.1.3 Accroissement annuel en longueur des branches

Au niveau des branches, la réaction à l'ouverture du milieu suite à la CPPTM est présente surtout dans la partie basse de la cime vivante. Pour ce qui est de l'accroissement en longueur, seules les branches des sections 1 et 2 (les branches de la partie inférieure du houppier) de l'épinette noire ont montré une différence significative dans le temps entre individus traités et témoins (tableau 5). Cette différence vient du fait que les branches témoins présentaient un accroissement supérieur avant traitement et que celui-ci diminue dans les années suivantes tandis que les branches basses des arbres traités montrent une légère augmentation de croissance dans les années après la coupe (figure 9). Quant au sapin baumier, aucune différence significative n'est présente entre CPPTM et témoins, peu importe la section du houppier.

Pour la partie supérieure de la cime vivante, la croissance est assez similaire entre les arbres traités et témoins dans les années avant et après CPPTM. Pour les branches de la section 5, les données manquantes indiquent qu'il s'agit de nouvelles branches. De plus, pour les deux espèces et pour chacune des sections, une diminution de la croissance en longueur peut être observée à l'année suivant immédiatement l'application de la CPPTM, mais dès l'année suivante, la croissance redevient à un niveau semblable aux années précédentes.

Tableau 5. Résultats des analyses de variance à mesures répétées en fonction du traitement et des années pour l'accroissement annuel radial et en longueur des branches le long de la cime vivante de l'épinette noire et du sapin baumier. La section 1 représente la partie la plus basse du houppier et la section 5 le sommet de l'arbre. Les résultats significatifs sont présentés en caractères gras.

Paramètre	Section de la cime	Source	Épinette noire			Sapin baumier		
			DL	F	Prob>F	DL	F	Prob>F
ACCROISSEMENT EN LONGUEUR	5	Traitement	1	0.27	0.6095	1	0.03	0.8576
		Année	16	2.54	0.0010	16	2.90	0.0015
		Traitement*Année	16	1.16	0.2985	16	1.34	0.2069
	4	Traitement	1	2.11	0.1728	1	0.64	0.4402
		Année	16	3.36	<0.0001	16	1.95	0.0152
		Traitement*Année	16	0.41	0.9806	16	1.14	0.3130
	3	Traitement	1	3.19	0.1012	1	0.20	0.6580
		Année	16	1.67	0.0480	16	2.80	0.0002
		Traitement*Année	16	0.47	0.9599	16	1.00	0.4593
	2	Traitement	1	5.79	0.0349	1	4.09	0.0622
		Année	16	1.47	0.1067	16	3.60	<0.0001
		Traitement*Année	16	2.54	0.0008	16	1.15	0.3041
	1	Traitement	1	7.02	0.0109	1	3.24	0.0933
		Année	16	1.19	0.2684	16	1.60	0.0634
		Traitement*Année	16	1.83	0.0249	16	1.16	0.2991
ACCROISSEMENT RADIAL	5	Traitement	1	0.99	0.3261	1	0.55	0.4627
		Année	16	1.71	0.0431	16	0.86	0.5843
		Traitement*Année	16	1.12	0.3350	16	0.36	0.9711
	4	Traitement	1	1.19	0.2819	1	0.12	0.7352
		Année	16	1.45	0.1129	16	1.25	0.2265
		Traitement*Année	16	0.83	0.6532	16	0.90	0.5692
	3	Traitement	1	2.84	0.0988	1	0.06	0.8068
		Année	16	2.73	0.0003	16	2.53	0.0009
		Traitement*Année	16	0.91	0.5523	16	1.09	0.3648
	2	Traitement	1	0.32	0.5809	1	0.06	0.8032
		Année	16	2.72	0.0003	16	2.38	0.0018
		Traitement*Année	16	5.13	<0.0001	16	1.20	0.2584
	1	Traitement	1	3.43	0.0894	1	0.11	0.7460
		Année	16	1.84	0.0235	16	1.36	0.1563
		Traitement*Année	16	3.23	<0.0001	16	2.61	0.0006

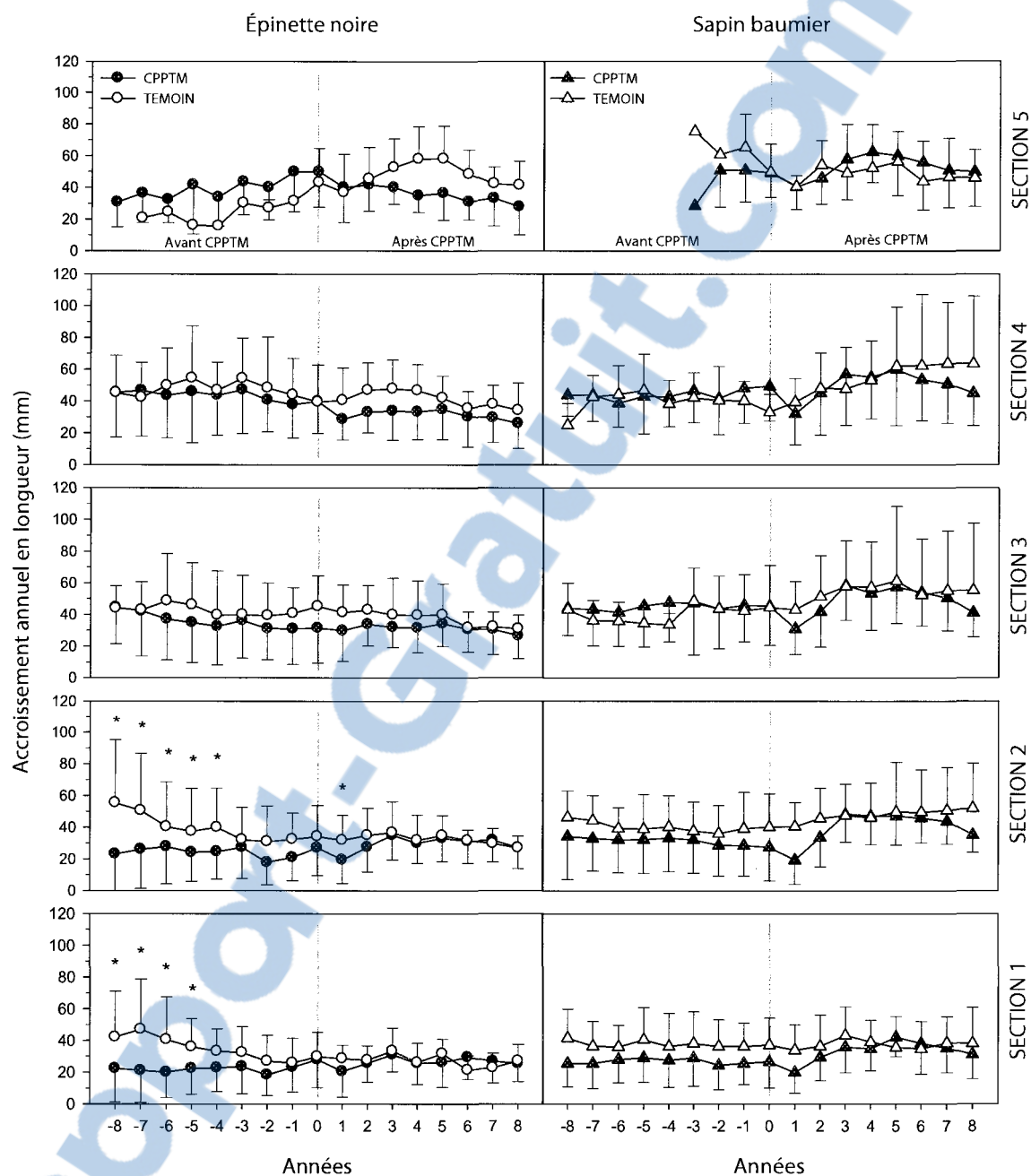


Figure 9. Accroissement annuel moyen en longueur (en mm) des branches de l'épinette noire et du sapin baumier pour les cinq sections de la cime vivante. La section 1 représente la partie la plus basse du houppier et la section 5 le sommet de l'arbre. L'année 0 et le trait vertical pointillé indiquent l'année de la CPPTM et les barres d'erreur représentent l'écart-type. L'étoile montre une différence significative entre CPPTM et TÉMOIN pour une année donnée telle que déterminée par un test de comparaison par tranche.

3.1.1.4 Accroissement radial annuel des branches

Comme pour l'accroissement en longueur, l'accroissement radial des branches est significativement différent dans le temps entre les arbres traités et témoins seulement dans la partie inférieure de la cime vivante, soit aux sections 1 et 2 pour l'épinette noire et à la section 1 uniquement pour le sapin baumier (tableau 5). Dans le cas de l'épinette noire, pour les deux sections inférieures, l'accroissement radial était plus élevé chez les témoins dans les années avant la CPPTM, tandis que l'inverse se produit dans les années suivant la coupe partielle, les branches dans les CPPTM présentant un accroissement supérieur aux témoins (figure 10). En ce qui concerne le sapin baumier, la croissance radiale des branches était semblable avant coupe et reste similaire après, à l'exception de la section 1, où la croissance des arbres traités devient significativement supérieure dans les années après traitement. Quant à la partie supérieure de la cime vivante, la croissance radiale est similaire entre les branches provenant des CPPTM et des témoins, autant dans les années avant qu'après CPPTM.

Autant pour le sapin que pour l'épinette, la croissance est inférieure dans la partie basse du houppier et augmente à mesure que l'on s'élève le long de la cime. Ainsi, les jeunes branches dans le haut de la tige ont une meilleure croissance et les plus vieilles branches dans le bas croissent moins rapidement. Sur toute la longueur de la cime vivante, les valeurs de l'accroissement annuel radial des branches sont assez semblables entre les deux espèces.

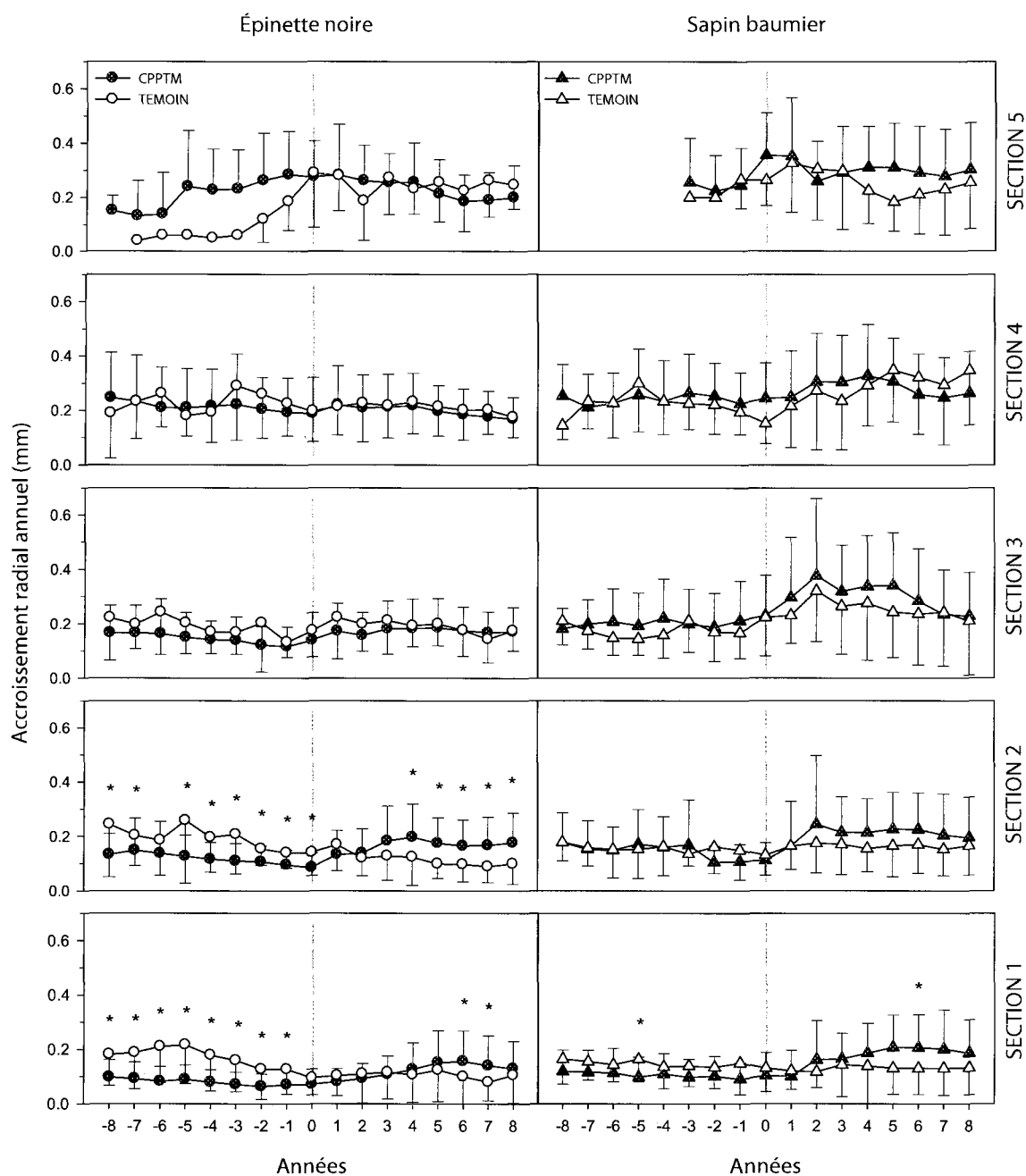


Figure 10. Accroissement radial annuel moyen (en mm) des branches de l'épinette noire et du sapin baumier pour les cinq sections de la cime vivante. La section 1 représente la partie la plus basse du houppier et la section 5 le sommet de l'arbre. Les barres d'erreur représentent l'écart-type et l'étoile montre une différence significative entre CPPTM et TÉMOIN pour une année donnée.



3.1.2 ANALYSE DE LA QUALITÉ DU BOIS

La partie qui suit présente quelques résultats concernant la qualité du bois, notamment au niveau du bois final, des propriétés mécaniques et du diamètre moyen des branches le long de la cime vivante.

3.1.2.1 Volume et pourcentage de bois final

La courbe du volume de bois final suit le même patron que celle du volume total de l'arbre (figures 7 et 11). Pour les deux espèces, une différence significative du volume de bois final produit est présente dans le temps et est attribuable à la CPPTM (tableau 6). Chez l'épinette noire, le volume de bois final était similaire entre individus traités et témoins avant l'intervention, mais devient significativement plus élevé pour la CPPTM quatre, cinq, sept et huit ans après la coupe (figure 11). Quant au sapin baumier, le volume annuel de bois final était significativement inférieur pour toutes les années avant coupe pour les individus traités par la CPPTM, mais ceux-ci augmentent rapidement leur volume de bois final pour devenir significativement supérieurs aux témoins aux années quatre, cinq, six et huit après CPPTM.

Tableau 6. Résultats des analyses de variance à mesures répétées en fonction du traitement et des années pour les paramètres de qualité du bois (accroissement en volume de bois final, pourcentage de bois final, modules d'élasticité et de rupture, diamètre moyen des branches) de l'épinette noire et du sapin baumier. Les résultats significatifs sont présentés en caractères gras.

Paramètre	Source	Épinette noire			Sapin baumier		
		DL	F	Prob>F	DL	F	Prob>F
VOLUME DE BOIS FINAL	Traitement	1	1.31	0.2731	1	0.88	0.3667
	Année	16	15.37	<0.0001	16	40.03	<0.0001
	Traitement*Année	16	1.76	0.0330	16	5.28	<0.0001
POURCENTAGE DE BOIS FINAL	Traitement	1	2.95	0.1122	1	0.12	0.7401
	Année	16	4.01	<0.0001	16	2.39	0.0017
	Traitement*Année	16	0.70	0.7980	16	1.24	0.2325
MODULE D'ÉLASTICITÉ	Traitement	1	0.09	0.7740	1	0.30	0.5935
	Période	1	10.94	0.0021	1	7.00	0.0114
	Traitement*Période	1	0.09	0.7656	1	1.42	0.2393
MODULE DE RUPTURE	Traitement	1	0.43	0.5215	1	0.13	0.7181
	Période	1	2.90	0.0965	1	5.32	0.0268
	Traitement*Période	1	0.05	0.8239	1	1.13	0.2940
DIAMÈTRE MOYEN DES BRANCHES	DHP	1	63.03	<0.0001	1	49.91	<0.0001
	Traitement	1	20.20	0.0009	1	1.35	0.2696
	Section	4	52.49	<0.0001	4	55.82	<0.0001
	Traitement*Section	4	0.49	0.7466	4	0.56	0.6885

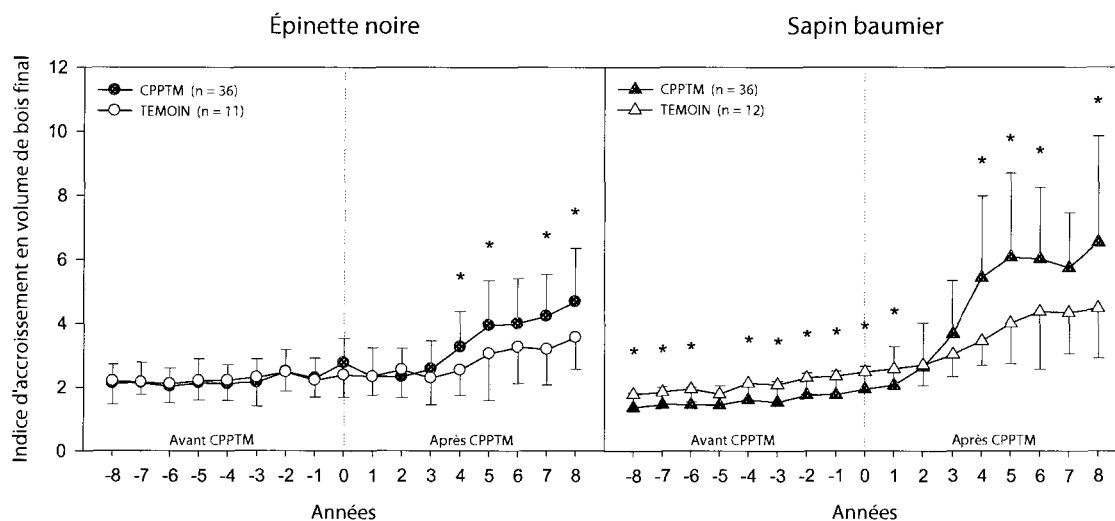


Figure 11. Accroissement annuel moyen standardisé en volume de bois final (sans unité) avant et après CPPTM pour les tiges résiduelles et témoins d'épinette noire et de sapin baumier. Les barres d'erreur représentent l'écart-type et l'étoile montre une différence significative entre CPPTM et TÉMOIN pour une année donnée telle que déterminée par un test de comparaison par tranche.

Pour l'épinette noire et le sapin baumier, aucune différence significative n'est présente entre traités et témoins avant ou après la CPPTM au niveau du volume de bois final en pourcentage (tableau 6). Pour les deux espèces, le pourcentage de bois final est inférieur chez les arbres témoins. Chez l'épinette noire, le pourcentage de bois final reste assez stable tout au long des années avant et après coupe. Quant au sapin baumier, bien qu'une diminution du pourcentage de bois final se produise chez les individus traités à partir de la cinquième année après CPPTM, la différence n'est toutefois pas significative avec les témoins (figure 12). Entre les deux espèces, le volume de bois final en pourcentage est assez similaire.

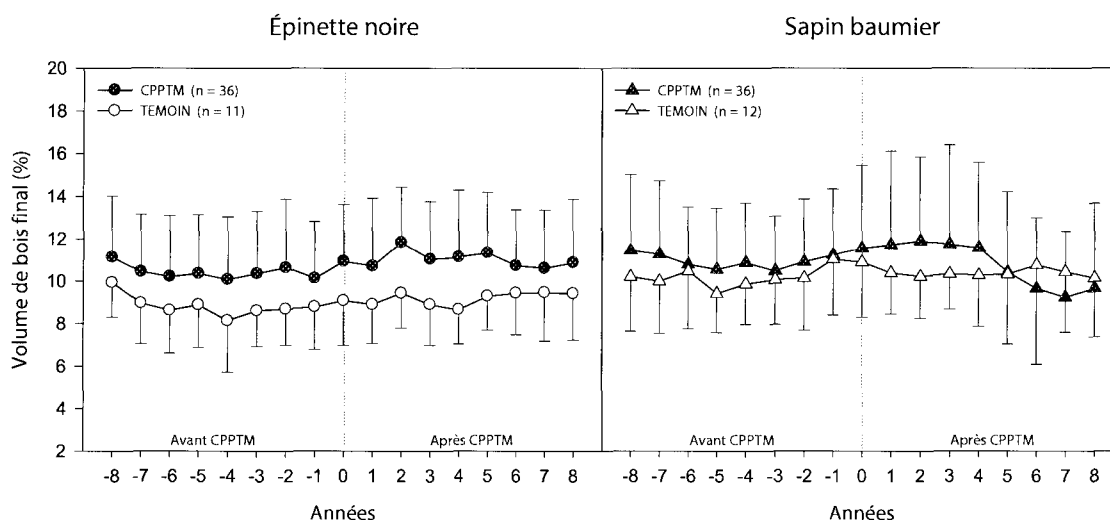


Figure 12. Volume de bois final (en pourcentage) avant et après CPPTM de tiges résiduelles et témoins d'épinette noire et de sapin baumier. Les barres d'erreur représentent l'écart-type et l'étoile montre une différence significative entre CPPTM et TÉMOIN pour une année donnée.

3.1.2.2 Propriétés mécaniques

Aucune différence significative dans le temps et due à la CPPTM n'est présente au niveau des propriétés mécaniques du bois, et ce, pour l'épinette noire et le sapin baumier (tableau 6). Autant pour le module d'élasticité que pour le module de rupture, les valeurs des témoins sont très semblables à celles des traités avant et après CPPTM (figure 13). Les

valeurs du module d'élasticité sont inférieures chez le sapin par rapport à l'épinette. Le même résultat est observé pour le module de rupture.

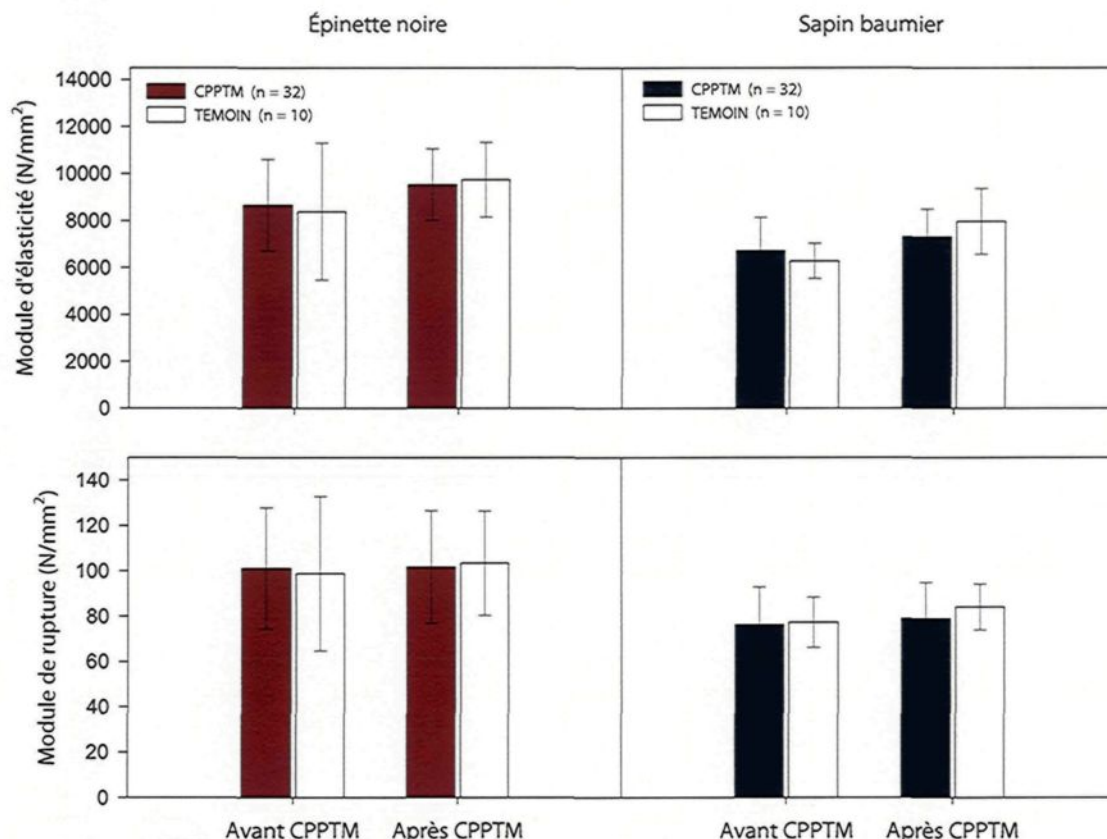


Figure 13. Module d'élasticité et module de rupture (en N/mm²) avant et après CPPTM de tiges résiduelles et témoins d'épinette noire et de sapin baumier. Les barres d'erreur représentent l'écart-type.

3.1.2.3 Diamètre moyen des branches dans les verticilles

Les branches sont en moyenne plus grosses chez les arbres traités que chez les témoins pour toutes les sections de la cime vivante; la différence n'est cependant pas significative (tableau 6, figure 14). Ce sont les branches de la section 2 qui ont le diamètre moyen le plus important pour les deux espèces. Le diamètre des branches augmente

rapidement le long de la cime verte, se stabilise, puis il y a une légère diminution dans le dernier 20% du houppier. Les branches du sapin baumier ont un diamètre moyen un peu plus important que celles de l'épinette noire.

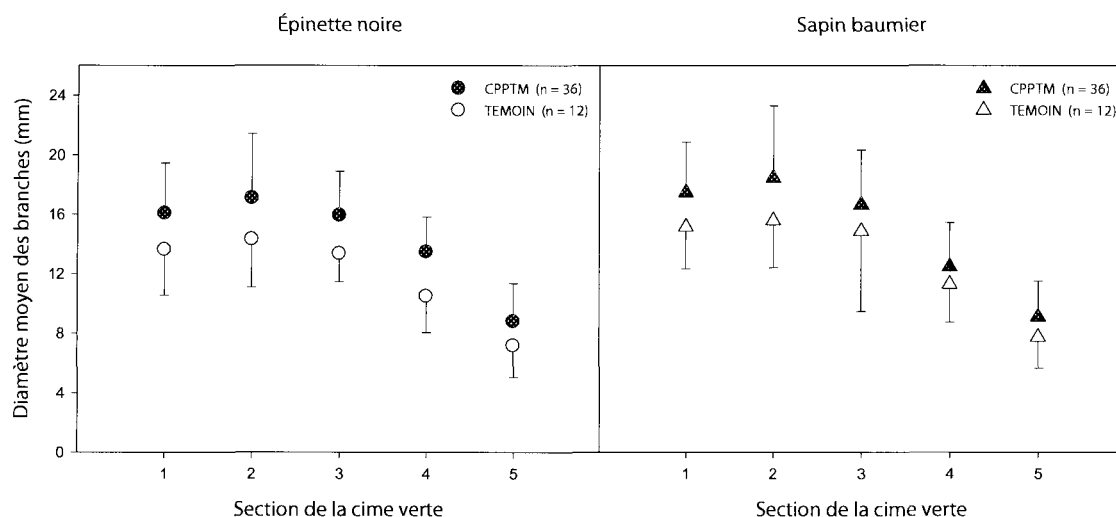


Figure 14. Diamètre moyen (en mm) des branches dans les verticilles de l'épinette noire et du sapin baumier pour les cinq sections de la cime vivante. La section 1 représente la partie la plus basse du houppier et la section 5 le sommet de l'arbre. Les barres d'erreur représentent l'écart-type.

3.1.2.4 Masse volumique

Aucune différence significative n'est présente dans le temps entre les individus traités et témoins en ce qui concerne la masse volumique moyenne des cernes de croissance des individus du bloc B20 (tableau 7). Pour l'épinette noire, la masse volumique était plus élevée avant coupe pour les individus provenant du site ayant subi une CPPTM et reste plus élevée dans les années après coupe (figure 15). Pour le sapin baumier, la masse volumique est également plus élevée avant, mais diminue à la deuxième année après la CPPTM, sans toutefois que cela ne crée une différence significative avec les témoins. Il est aussi possible de remarquer une différence dans la masse volumique moyenne des cernes de croissance entre les deux espèces, celle de l'épinette noire étant plus élevée que celle du sapin baumier.

Tableau 7. Résultats des analyses de variance à mesures répétées en fonction du traitement et des années pour la masse volumique moyenne et la masse volumique du bois initial et du bois final de l'épinette noire et du sapin baumier du bloc B20. Les résultats significatifs sont présentés en caractères gras.

Paramètre	Source	Épinette noire			Sapin baumier		
		DL	F	Prob>F	DL	F	Prob>F
MASSE VOLUMIQUE MOYENNE	Traitement	1	5.09	0.1526	1	2.06	0.1814
	Année	16	1.07	0.3892	16	1.62	0.0713
	Traitement*Année	16	0.77	0.7116	16	1.31	0.2016
MASSE VOLUMIQUE DU BOIS INITIAL	Traitement	1	2.74	0.2412	1	0.60	0.4560
	Année	16	1.36	0.1742	16	1.27	0.2399
	Traitement*Année	16	1.80	0.0399	16	0.75	0.7131
MASSE VOLUMIQUE DU BOIS FINAL	Traitement	1	2.37	0.2640	1	0.65	0.5065
	Année	16	1.24	0.2498	16	1.67	0.0741
	Traitement*Année	16	0.68	0.8068	16	1.53	0.1238

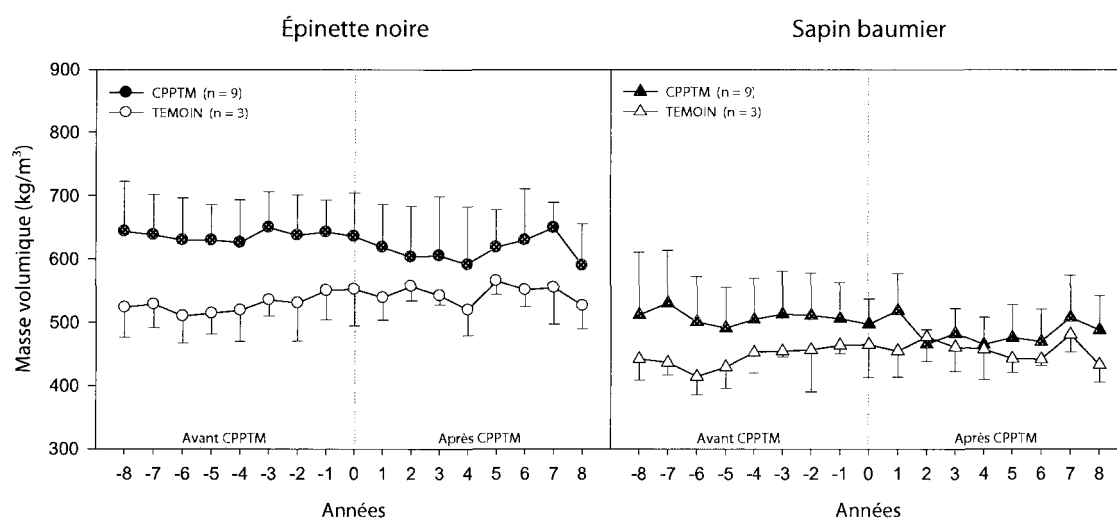


Figure 15. Masse volumique moyenne (en kg/m³) du cerne de croissance des huit années avant la CPPTM, de l'année du traitement et des huit années après pour les épinettes noires et les sapins baumiers du bloc B20. Les barres d'erreur représentent l'écart-type.

En ce qui concerne la masse volumique du bois initial, il est possible d'observer une différence significative dans le temps entre les individus du site de CPPTM et les témoins (tableau 7) pour l'épinette noire. Par contre, le test par tranches ne montre aucune différence significative entre traités et témoins pour une année précise. Quant au sapin

baumier, une diminution de la masse volumique du bois initial apparaît à la deuxième année après CPPTM, comme c'était le cas pour l'épinette noire, mais la différence avec les témoins n'est pas significative (tableau 7). Comme pour la masse volumique moyenne du cerne de croissance, la masse volumique du bois initial est inférieure chez le sapin par rapport à l'épinette noire.

Aucune différence significative dans le temps due à la CPPTM ne peut être observée en ce qui a trait à la masse volumique du bois final pour le bloc B20, et ce, pour les deux espèces (tableau 7). Pour l'épinette noire, la masse volumique du bois final des CPPTM est toujours un peu supérieure à celle des témoins. Pour le sapin, une importante variation apparaît dans les années avant CPPTM, mais celle-ci diminue après l'intervention. Encore une fois, la masse volumique du bois final est inférieure chez le sapin par rapport à l'épinette.

3.2 COMPARAISON AVANT CPPTM vs APRÈS CPPTM

3.2.1 ANALYSE DE LA CROISSANCE

Maintenant qu'il a été possible d'observer un effet de la CPPTM sur certains paramètres de croissance et de qualité du bois, il est également intéressant de voir à quel moment précisément se produit ce changement par rapport à la période avant traitement. Les résultats qui suivent tiennent compte uniquement des individus provenant des sites ayant subi une CPPTM et présentent, tout comme précédemment, les huit années avant la CPPTM, l'année de l'intervention et les huit années après la coupe. Chacune des années après la CPPTM a été comparée avec la moyenne des huit années avant coupe par un test de contraste pour déterminer à partir de quelle année un changement se produit (s'il y en a un) par rapport aux années avant coupe. Puisque la moyenne des années avant le traitement est utilisée, la variabilité avant coupe n'est pas prise en compte.

3.2.1.1 Accroissement annuel de la tige

L'analyse de variance à mesures répétées indique une différence significative entre les années concernant l'accroissement annuel en diamètre et en volume, et ce, pour l'épinette noire et le sapin baumier (tableau 8).

Tableau 8. Résultats des analyses de variance à mesures répétées en fonction des années pour l'accroissement annuel en diamètre, en hauteur et en volume des tiges résiduelles d'épinette noire et de sapin baumier.

Paramètre	Source	Épinette noire			Sapin baumier		
		DL	F	Prob>F	DL	F	Prob>F
ACCROISSEMENT EN DIAMÈTRE	Année	9	23.06	<0.0001	9	84.03	<0.0001
ACCROISSEMENT EN HAUTEUR	Année	9	7.56	<0.0001	9	1.39	0.1933
ACCROISSEMENT EN VOLUME	Période	1	38.7	<0.0001	1	129.3	<0.0001

Pour l'accroissement annuel en diamètre chez l'épinette noire, on peut d'abord observer une diminution significative de la croissance aux deux années suivant immédiatement la CPPTM par rapport à la moyenne des huit années avant coupe (figure 16). Cette baisse est suivie par une augmentation graduelle jusqu'à l'obtention d'une croissance en diamètre significativement supérieure à la moyenne avant coupe à partir de la cinquième année après la CPPTM.

Pour le sapin baumier, la réponse au traitement est beaucoup plus rapide, alors que dès la deuxième année après la CPPTM et pour toutes les suivantes, l'accroissement annuel en diamètre est significativement supérieur à la moyenne des huit années avant la coupe partielle. À partir de la troisième année après coupe, la croissance annuelle en diamètre est plus que doublée et va même jusqu'à presque quadrupler dans les années qui suivent. Par contre, la variabilité des résultats est beaucoup plus grande après la CPPTM pour le sapin,

l'écart-type de chacune des années étant plus grand.

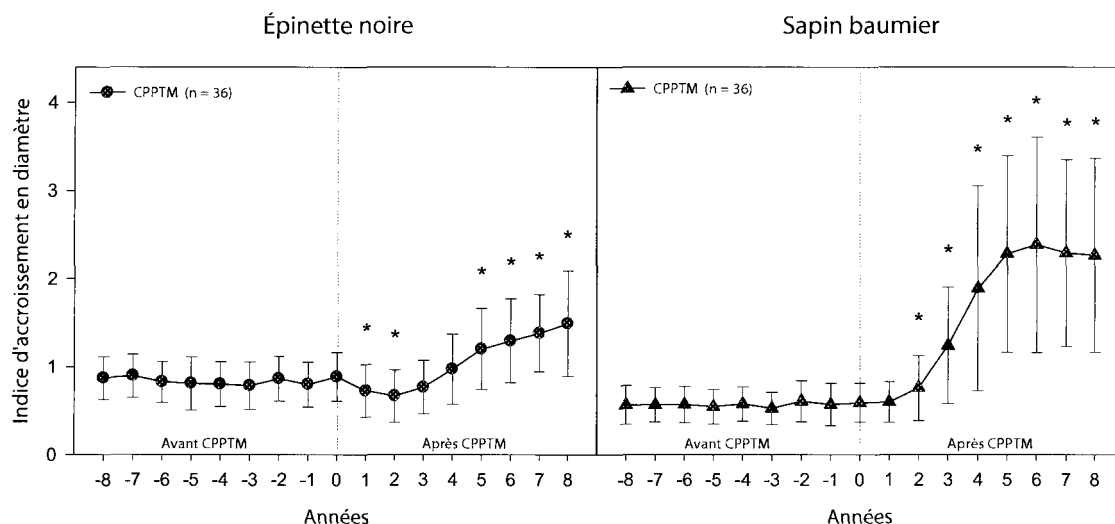


Figure 16. Accroissement annuel moyen en diamètre (sans unité) de tiges résiduelles d'épinette noire et de sapin baumier provenant de sites de CPPTM. L'année 0 et le trait vertical pointillé indiquent l'année de la CPPTM et les barres d'erreur représentent l'écart-type. L'étoile dénote une différence significative entre l'année donnée et la moyenne des huit années avant la CPPTM, déterminée par un test de contraste.

Les résultats obtenus pour l'accroissement annuel en volume (figure 17) sont très similaires à ceux obtenus pour l'accroissement en diamètre (figure 16). En effet, il est possible d'observer une différence hautement significative entre les années (tableau 8) et les courbes ont sensiblement la même allure. Un délai de réponse de quatre ans pour l'épinette noire et de deux ans pour le sapin baumier est observé avant que l'accroissement annuel en volume ne devienne significativement supérieur à ce qu'il était dans les années avant la CPPTM. La réponse au traitement est plus forte chez le sapin. Pour les deux espèces, l'augmentation de croissance se poursuit toujours huit ans après la CPPTM.

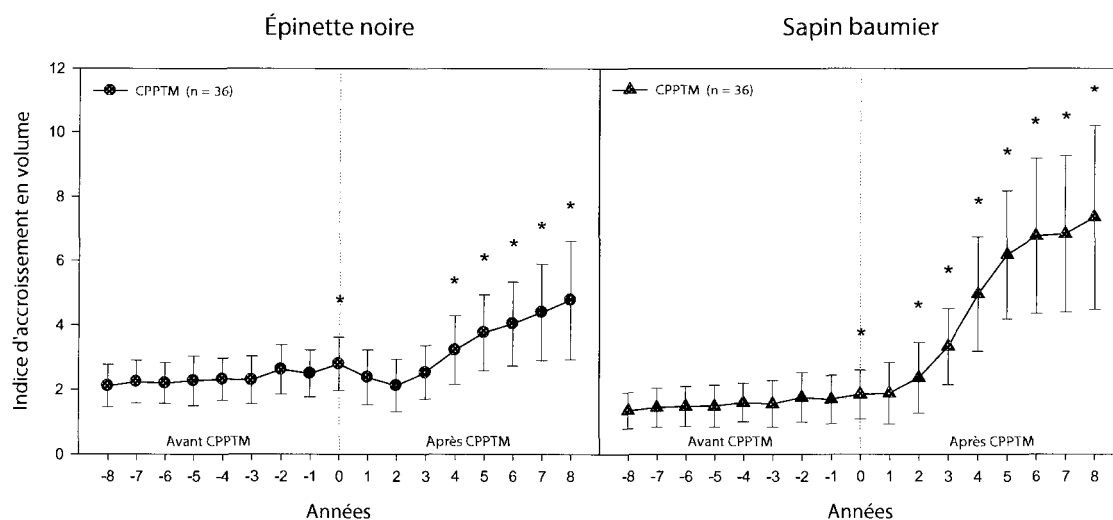


Figure 17. Accroissement annuel moyen en volume (sans unité) de tiges résiduelles d'épinette noire et de sapin baumier provenant de sites de CPPTM. Les barres d'erreur représentent l'écart-type et l'étoile dénote une différence significative entre l'année donnée et la moyenne des huit années avant la CPPTM.

3.2.1.2 Accroissement annuel en longueur des branches

Toutes les sections de la cime vivante montrent une différence significative de l'accroissement annuel en longueur des branches entre les années, et ce, pour les deux espèces (tableau 9). Chez l'épinette noire, dans les branches basses du houppier (sections 1 et 2), certaines années après la CPPTM, mais pas avant la troisième année, ont un accroissement supérieur à la moyenne des huit années avant coupe (figure 18). Pour la partie supérieure de la cime vivante, soit aux sections 4 et 5, toutes les années après la CPPTM ont un accroissement en longueur inférieur à la moyenne avant traitement. La situation est quelque peu différente pour le sapin baumier alors que la croissance en longueur des branches à l'année suivant immédiatement la CPPTM est significativement inférieure à la moyenne des années avant traitement. D'ailleurs, pour les deux espèces et pour les cinq sections du houppier, on peut voir cette réduction de la croissance en longueur lors de l'année suivant immédiatement la CPPTM. Cette baisse ne dure qu'une année est plus prononcée chez le sapin baumier. Contrairement à l'épinette, la croissance en longueur dans les années après la coupe partielle est généralement plus élevée chez le sapin, même

dans la partie la plus haute du houppier. La différence n'est toutefois significative dans la partie inférieure qu'à partir de la troisième année après la CPPTM et jusqu'à la septième année.

Tableau 9. Résultats des analyses de variance à mesures répétées en fonction des années pour l'accroissement annuel radial et en longueur des branches le long de la cime vivante de l'épinette noire et du sapin baumier.

Paramètre	Section de la cime	Source	Épinette noire			Sapin baumier		
			DL	F	Prob>F	DL	F	Prob>F
ACCROISSEMENT EN LONGUEUR	5	Année	9	14.45	<0.0001	9	4.81	<0.0001
	4	Année	9	7.76	<0.0001	9	7.85	<0.0001
	3	Année	9	2.71	0.0052	9	9.83	<0.0001
	2	Année	9	6.63	<0.0001	9	12.48	<0.0001
	1	Année	9	3.59	0.0003	9	5.85	<0.0001
ACCROISSEMENT RADIAL	5	Année	9	4.14	<0.0001	9	1.23	0.2780
	4	Année	9	2.82	0.0035	9	1.55	0.1314
	3	Année	9	2.10	0.0305	9	3.54	0.0004
	2	Année	9	6.72	<0.0001	9	3.66	0.0003
	1	Année	9	3.96	0.0001	9	6.06	<0.0001

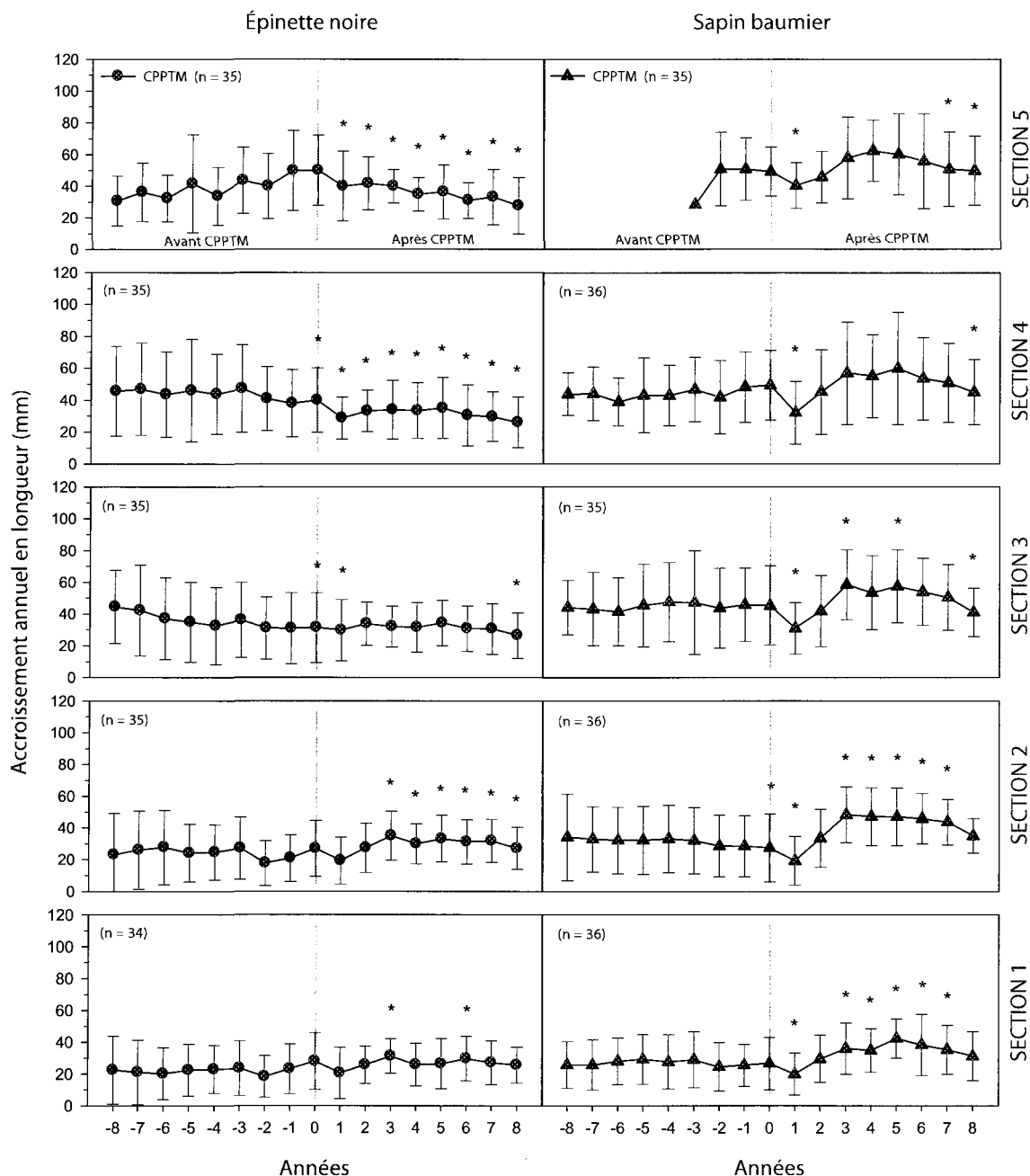


Figure 18. Accroissement annuel moyen en longueur (en mm) des branches de tiges résiduelles d'épinette noire et de sapin baumier pour les cinq sections de la cime vivante. La section 1 représente la partie la plus basse du houppier et la section 5 le sommet de l'arbre. Les barres d'erreur représentent l'écart-type et l'étoile dénote une différence significative entre l'année donnée et la moyenne des huit années avant la CPPTM.

3.2.1.3 Accroissement radial annuel des branches

En ce qui concerne l'accroissement radial des branches, les résultats sont similaires à ce qui a été observé pour la longueur, à l'exception que la réduction de croissance en longueur qui est observable à l'année immédiatement après la CPPTM n'est pas présente au niveau de la croissance radiale. Ainsi, pour l'épinette noire, une différence significative est présente entre les années pour toutes les sections du houppier (tableau 9). Comme pour la croissance en longueur, la croissance radiale des branches devient significativement plus élevée que la moyenne des années avant CPPTM dans la partie inférieure de la cime vivante, alors que l'inverse se produit dans le haut de la cime et la croissance radiale devient significativement inférieure à la moyenne avant coupe (figure 19). Pour le sapin baumier, ce ne sont que les trois sections les plus basses de la cime vivante qui montrent une différence significative entre les années (tableau 9), quelques-unes des années après la CPPTM présentant un accroissement radial des branches significativement supérieur à la moyenne des années avant traitement.

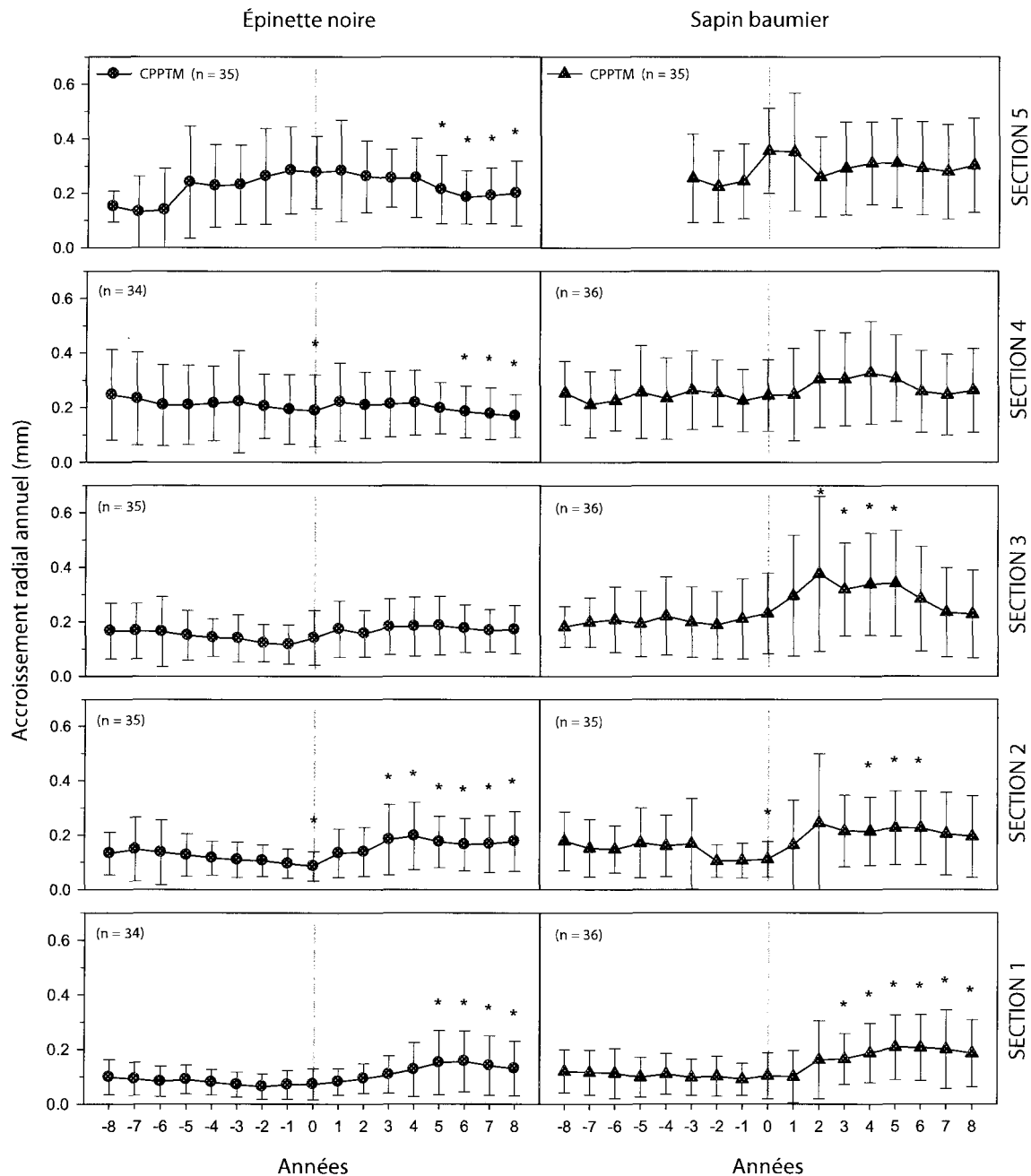


Figure 19. Accroissement radial annuel moyen (en mm) des branches de tiges résiduelles d'épinette noire et de sapin baumier pour les cinq sections de la cime vivante. La section 1 représente la partie la plus basse du houppier et la section 5 le sommet de l'arbre. Les barres d'erreur représentent l'écart-type et l'étoile dénote une différence significative entre l'année donnée et la moyenne des huit années avant la CPPTM.

3.2.2 ANALYSE DE LA QUALITÉ DU BOIS

3.2.2.1 Volume et pourcentage de bois final

Le volume de bois final présente une différence hautement significative entre les années pour l'épinette noire et le sapin baumier (tableau 10). Il y a donc un changement dans le volume de bois final produit par les arbres résiduels dans les années après la CPPTM, de sorte qu'à partir de la quatrième année après la coupe pour l'épinette et dès l'année du traitement pour le sapin, la quantité de bois final produit devient significativement supérieure à la moyenne de ce qui était produit avant la coupe partielle (figure 20).

Tableau 10. Résultats des analyses de variance à mesures répétées en fonction des années pour les paramètres de qualité du bois (accroissement annuel en volume de bois final, pourcentage annuel de bois final, modules d'élasticité et de rupture) de tiges résiduelles d'épinette noire et de sapin baumier.

Paramètre	Source	Épinette noire			Sapin baumier		
		DL	F	Prob>F	DL	F	Prob>F
VOLUME DE BOIS FINAL	Année	9	30.07	<0.0001	9	84.39	<0.0001
POURCENTAGE DE BOIS FINAL	Année	9	3.52	0.0004	9	5.76	<0.0001
MODULE D'ÉLASTICITÉ	Période	1	8.44	0.0072	1	2.68	0.1093
MODULE DE RUPTURE	Période	1	4.24	0.0479	1	2.17	0.1523

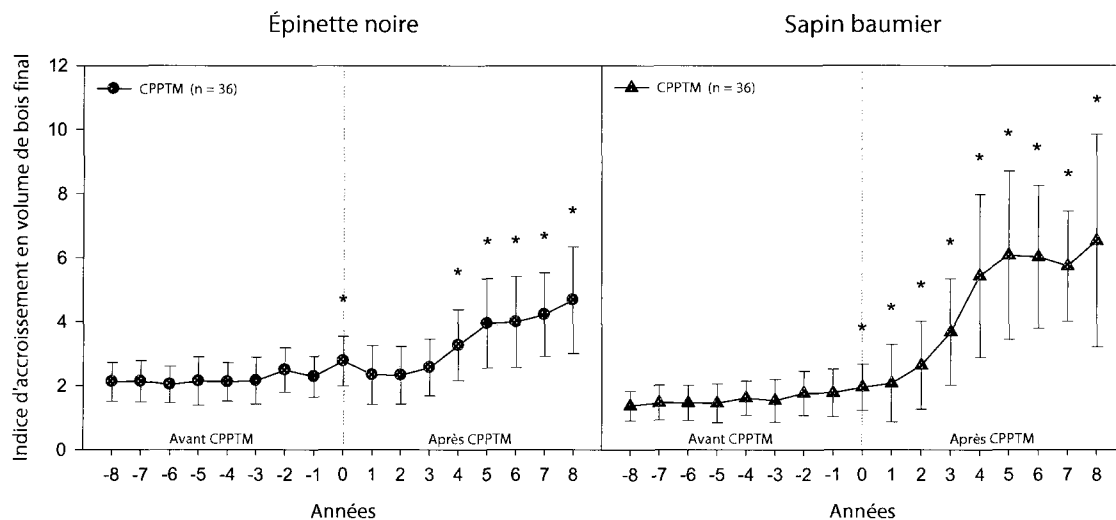


Figure 20. Accroissement annuel moyen en volume de bois final (sans unité) de tiges résiduelles d'épinette noire et de sapin baumier provenant de sites de CPPTM. Les barres d'erreur représentent l'écart-type et l'étoile dénote une différence significative entre l'année donnée et la moyenne des huit années avant la CPPTM.

Puisque le volume de bois final évolue dans le même sens que le volume total de l'arbre, cela résulte en peu de changement sur le pourcentage de bois final (figure 21). Les analyses de variance à mesures répétées indiquent toutefois une différence significative du pourcentage de bois final entre les années (tableau 10). Pour l'épinette noire, les années deux jusqu'à cinq après la CPPTM sont plus élevées qu'avant traitement. Chez le sapin baumier, une diminution du pourcentage de bois final apparaît à partir de la cinquième année après l'intervention, mais seules les années six à huit après traitement sont significativement inférieures à la moyenne avant.

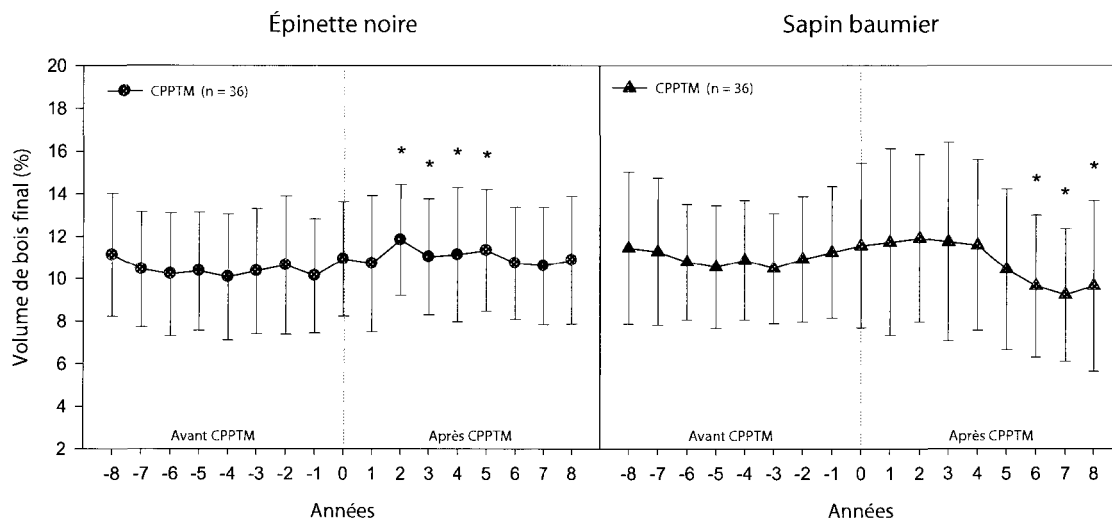


Figure 21. Volume de bois final (en pourcentage) de tiges résiduelles d'épinette noire et de sapin baumier provenant de sites de CPPTM. Les barres d'erreur représentent l'écart-type et l'étoile dénote une différence significative entre l'année donnée et la moyenne des huit années avant la CPPTM.

3.2.2.2 Propriétés mécaniques

Au niveau des propriétés mécaniques, le module d'élasticité et le module de rupture se comportent de façon similaire (figure 22). Pour les deux paramètres, une différence significative est présente entre les périodes avant et après CPPTM chez l'épinette noire seulement, alors qu'aucun changement n'est observable chez le sapin baumier (tableau 10). En effet, pour l'épinette, les valeurs du module d'élasticité sont supérieures dans le bois formé après la CPPTM en comparaison avec la période avant CPPTM.

Le sapin baumier montre des propriétés mécaniques inférieures par rapport à celles de l'épinette noire. Pour le module d'élasticité et le module de rupture, les valeurs obtenues pour le sapin sont effectivement 23% inférieures environ à celles de l'épinette.

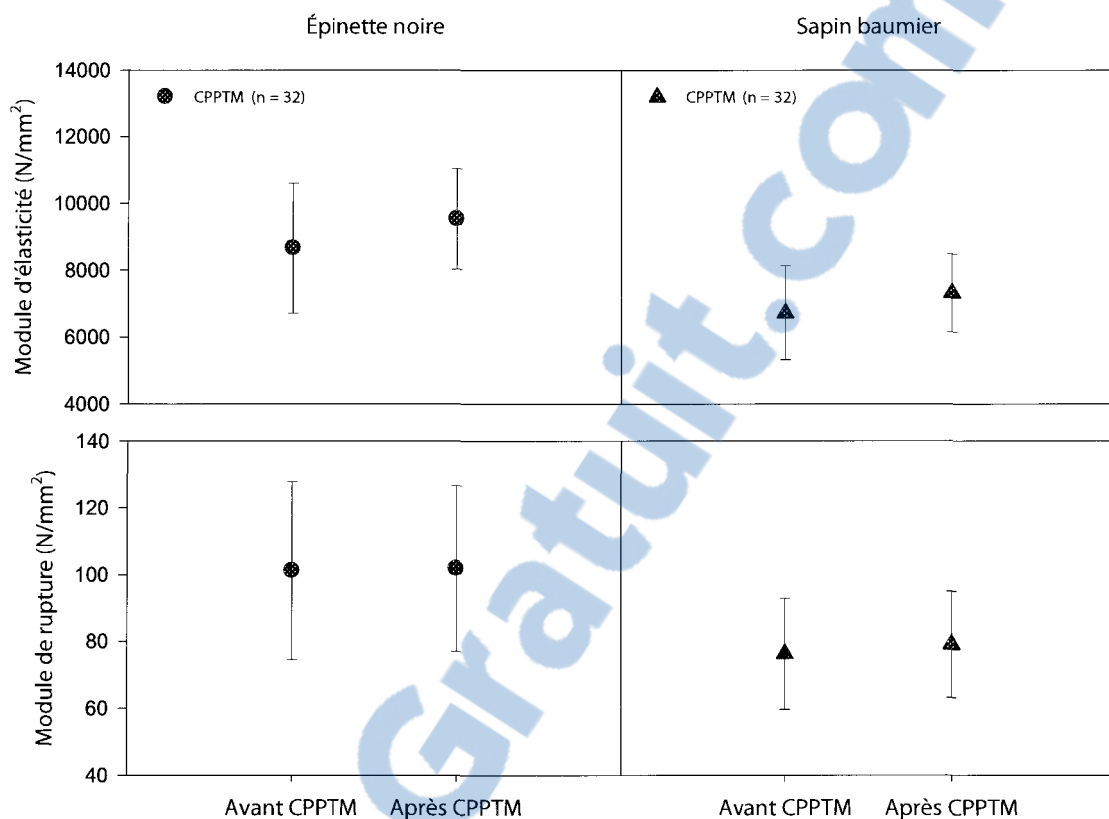


Figure 22. Module d'élasticité et module de rupture (en N/mm²) avant et après CPPTM de tiges résiduelles d'épinette noire et de sapin baumier. Les barres d'erreur représentent l'écart-type.

3.2.2.3 Masse volumique

L'analyse de variance à mesures répétées n'indique pas de différence significative entre les années pour la masse volumique moyenne de l'épinette noire (tableau 11). Quant au sapin baumier, une différence est bien présente entre les années et se situe au niveau des années 2, 4, 5 et 6 après CPPTM, ces dernières étant significativement inférieures à la moyenne avant traitement (figure 23).

Tableau 11. Résultats des analyses de variance à mesures répétées en fonction des années pour la masse volumique moyenne et la masse volumique du bois initial et du bois final de tiges résiduelles d'épinette noire et de sapin baumier.

Paramètre	Source	Épinette noire			Sapin baumier		
		DL	F	Prob>F	DL	F	Prob>F
MASSE VOLUMIQUE MOYENNE	Année	9	1.75	0.0969	9	4.95	<0.0001
MASSE VOLUMIQUE DU BOIS INITIAL	Année	9	3.66	0.0017	9	2.55	0.0223
MASSE VOLUMIQUE DU BOIS FINAL	Année	9	2.29	0.0327	9	3.49	0.0030

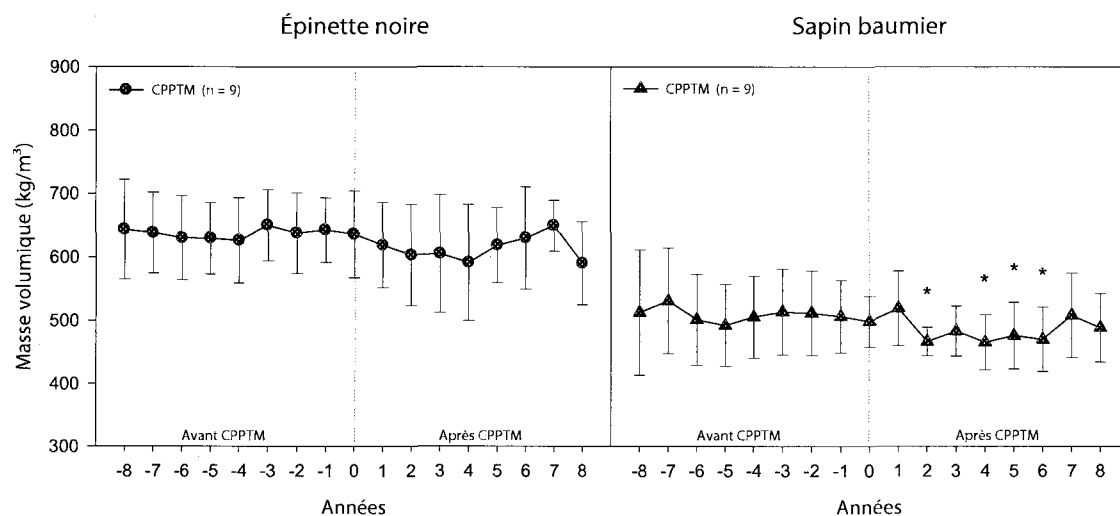


Figure 23. Masse volumique moyenne (en kg/m³) du cerne de croissance de tiges résiduelles d'épinette noire et de sapin baumier avant et après CPPTM. Les barres d'erreur représentent l'écart-type et l'étoile montre une différence significative entre l'année donnée et la moyenne des huit années avant la CPPTM.

Pour la masse volumique du bois initial et du bois final, des différences significatives sont observables entre les années avant et après la CPPTM, autant pour l'épinette noire que pour le sapin baumier (tableau 11). Pour les deux espèces, il est possible de voir une légère diminution de la masse volumique du bois initial et du bois final dans les deux à trois premières années après le traitement, suivie par la suite d'une augmentation graduelle dans les années suivantes. Malgré cette tendance à la hausse, la masse volumique du bois initial diminue après traitement alors que la majorité des années après CPPTM sont significativement inférieures à la moyenne des huit années avant (figure 24). Quant à la masse volumique du bois final, celle-ci tend à augmenter dans les années après la CPPTM alors que certaines années sont significativement supérieures à la moyenne avant traitement chez les deux espèces.

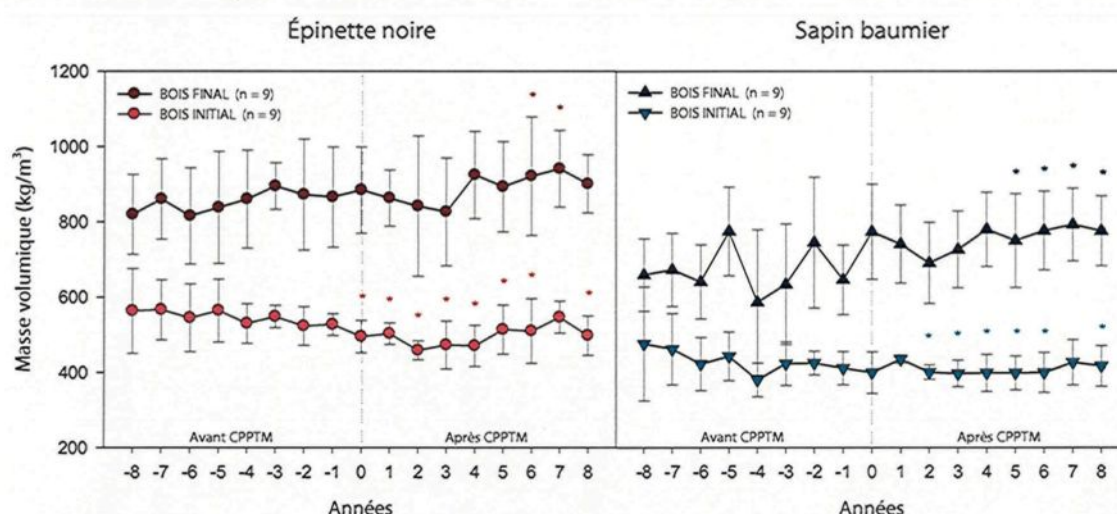


Figure 24. Masse volumique moyenne (en kg/m³) du bois initial et du bois final de tiges résiduelles d'épinette noire et de sapin baumier avant et après CPPTM. Les barres d'erreur représentent l'écart-type et l'étoile montre une différence significative entre l'année donnée et la moyenne des huit années avant la CPPTM.

Comme cela était le cas pour les propriétés mécaniques, les valeurs de masse volumique diffèrent entre l'épinette et le sapin, autant pour la masse volumique moyenne du cerne que pour celles du bois initial et du bois final. Pour le sapin baumier, les valeurs sont environ 20% inférieures aux valeurs obtenues pour l'épinette noire.



4. DISCUSSION

4.1 ANALYSE DE LA CROISSANCE

4.1.1 Accroissement de la tige

La coupe avec protection des petites tiges marchandes entraîne une augmentation de la croissance des tiges résiduelles dans les années après la coupe. Une forte proportion des individus ont montré une réponse positive au traitement pour l'accroissement en diamètre et en volume par rapport à l'accroissement des témoins. Plusieurs études avaient déjà montré un effet positif sur la croissance radiale des tiges lorsque les arbres résiduels sont libérés de leurs voisins, soit lors d'une éclaircie commerciale (Mäkinen et Isomäki, 2004; Pamerleau-Couture, 2011; Vincent *et al.*, 2009) ou lors d'un autre type de coupe partielle (Bebber *et al.*, 2004; Deal *et al.*, 2010; Pamerleau-Couture, 2011; Thorpe *et al.*, 2007).

Au niveau de la tige, l'effet de la CPPTM n'est pas visible immédiatement après la coupe. En effet, une période de quatre ans chez l'épinette noire et de deux ans chez le sapin baumier est nécessaire avant d'observer une croissance en volume significativement supérieure à ce qu'elle était dans les années avant la CPPTM. Cette situation se produit aussi au niveau de la croissance en diamètre de la tige. Ce délai dans la réponse au traitement avait déjà été mentionné par Vincent *et al.* (2009) et Thorpe *et al.* (2007) pour l'épinette noire et Bebbier *et al.* (2004), Latham et Tappeiner (2002) et Youngblood (1991) avec d'autres espèces. Ce délai pourrait être dû à une allocation en premier lieu à la croissance des parties souterraines de l'arbre, qui serait plus avantageuse à court terme qu'une augmentation de la croissance en hauteur et en diamètre de la tige (Claveau *et al.*, 2006). Ceci pourrait s'expliquer par le besoin des arbres d'augmenter d'abord leur stabilité ainsi que leur capacité d'absorption et de transport des ressources du sol pour faire face à la pénétration plus importante du vent dans le peuplement résiduel après coupe (Ruel, 1995) et à la transpiration plus élevée qui en résulte (Kneeshaw *et al.*, 2002). Une réponse plus rapide et plus importante de la croissance des racines par rapport à la tige avait aussi été

observée dans les travaux de Kneeshaw *et al.* (2002), Ruel *et al.* (2003) et Vincent *et al.* (2009). Ainsi, il semble que les arbres investissent en premier pour améliorer leur système racinaire pour par la suite être en mesure de mieux supporter la croissance de la tige. Cette hypothèse semble donc appropriée pour expliquer les résultats observés après la CPPTM.

Une autre hypothèse apportée par Ferguson (1994) fait état d'un possible choc physiologique se produisant après une éclaircie et résultant en quelques années de croissance plus lente immédiatement après l'ouverture du milieu chez le Douglas (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco). Ce choc physiologique serait assez commun après une coupe partielle comme l'éclaircie et déterminerait si l'arbre meurt ou survit et le nombre d'années nécessaires aux survivants pour atteindre un taux de croissance supérieur (Ferguson, 1994). Après la CPPTM, deux années de croissance en volume et en diamètre plus faibles par rapport aux années avant traitement sont observables chez l'épinette noire. Cette diminution de croissance, qui est significative pour la croissance en diamètre (figure 16), mais pas pour la croissance en volume (figure 17), pourrait donc être due à un choc causé par le dégagement soudain des tiges résiduelles après la CPPTM. Cette situation n'est pas présente chez le sapin baumier; le choc serait donc plus important pour l'épinette noire, ce qui pourrait expliquer le fait que celle-ci met deux ans de plus que le sapin avant de montrer une réaction positive au traitement. L'hypothèse du choc physiologique est intéressante et plausible, mais ne suffit pas à elle seule à expliquer les deux années supplémentaires de délai pour l'épinette noire. Des différences physiologiques entre les deux espèces seraient également à considérer.

L'augmentation de croissance en diamètre et en volume observée suite au traitement ne diminue pas après huit ans et continue même d'augmenter dans certains cas. Ce résultat avait déjà été démontré pour l'épinette noire par Thorpe *et al.* (2007), qui avaient obtenu un maximum de croissance se situant huit à neuf années après un type de coupe partielle semblable à la CPPTM. Il est donc possible que la croissance annuelle des tiges continue d'être plus élevée que ce qu'elle était avant la CPPTM pendant encore quelques années

mais que le maximum d'accroissement ait été atteint ou soit tout près de l'être huit ans après le traitement. Toutefois, une période de temps plus longue après la CPPTM serait nécessaire pour déterminer la durée pendant laquelle la réponse au niveau de la croissance de la tige va persister.

4.1.2 Accroissement des branches

La réaction observée au niveau des branches de la partie inférieure du houppier est assez similaire à ce qui se produit au niveau de la tige suite à la CPPTM. En effet, comme pour la tige, on peut observer une augmentation de l'accroissement des branches, mais avec un délai allant de deux à cinq ans. La croissance des branches et celle de la tige semblent donc être reliées et les facteurs qui influencent la croissance des branches ont une influence similaire sur la croissance de la tige (Hein *et al.*, 2008b; Mäkinen, 1999a; Mäkinen et Hein, 2006).

Comme l'avaient observé Forward et Nolan (1961a) chez *Pinus resinosa* Ait., ce sont surtout les branches du milieu et du bas de la cime vivante qui profitent de l'ouverture du milieu après la coupe et qui augmentent leur croissance, aussi bien radiale qu'en longueur. Quant aux branches de la partie supérieure du houppier, celles-ci ne présentent pas d'augmentation de croissance après la CPPTM car elles recevaient déjà la pleine lumière du soleil et ne subissaient pas de compétition de la part des arbres voisins pour la lumière, même avant l'intervention (Hein *et al.*, 2008a). Ceci concorde avec plusieurs études dans lesquelles il ressort que la taille des branches ne diffère pas entre différentes intensités d'éclaircie pour la portion supérieure du houppier (Kantola et Mäkelä, 2004; Mäkinen et Hein, 2006). Ainsi, ce sont les branches qui étaient ombragées par les branches plus jeunes de l'arbre ou par les branches d'arbres situés à proximité qui ont le plus bénéficié de l'augmentation de lumière après l'éclaircie (Forward et Nolan, 1961a, b). La disponibilité de la lumière semble être le facteur le plus déterminant pour la croissance des branches (Mäkinen, 2002).

De plus, il est possible de constater que l'accroissement radial annuel est plus élevé dans les branches de la partie supérieure du houppier après la CPPTM et ce, même si les branches basses bénéficient de toute la lumière nécessaire après l'intervention. Cela est dû au fait que le taux de croissance des branches est surtout relié à l'âge de la branche (Mäkinen, 1999a). Ainsi, l'accroissement radial diminue graduellement du sommet à la base du houppier, c'est-à-dire à mesure que l'âge des branches augmente. La CPPTM pourrait avoir comme effet de permettre aux branches basses qui étaient fortement opprimées de demeurer en vie plus longtemps (Mäkinen, 1999a, b), ce qui à plus long terme pourrait possiblement faire augmenter la grosseur des nœuds en raison de la plus grande longévité des branches (Benjamin *et al.*, 2009). Malgré qu'une augmentation significative de la croissance des branches ait été observée dans les branches basses du houppier après la CPPTM, celle-ci demeure tout de même très faible. Pour des espèces tolérantes à l'ombre comme le sapin baumier et l'épinette noire, il est possible que l'ouverture de la canopée suite à la CPPTM n'induisent peu ou pas d'effet sur les branches. En effet, les branches basses fonctionnaient déjà sans bénéficier de toute la lumière possible (en milieu fermé avant la CPPTM) et le fait d'obtenir finalement cette lumière n'a eu qu'un minime effet sur la croissance en longueur et en diamètre.

L'hypothèse du choc physiologique observé dans la tige pourrait aussi s'appliquer aux branches. En effet, une réduction de l'accroissement est visible à l'année immédiatement après la CPPTM. Cette diminution, qui se produit sur toute la longueur de la cime verte, dure seulement un an et est plus prononcée chez le sapin baumier. L'ouverture créée par la CPPTM et la quantité soudaine de lumière disponible semblent causer un choc aux arbres résiduels, qui prennent une année avant de s'habituer et de profiter pleinement de leur nouvel environnement. Weiskittel *et al.* (2007) avaient observé le même phénomène suite à une éclaircie, mais pour la croissance radiale des branches qui était au départ diminuée puis devenait légèrement supérieure par la suite comparativement à des témoins non traités chez le Douglas.

4.2 ANALYSE DE LA QUALITÉ DU BOIS

4.2.1 Diamètre moyen des branches dans les verticilles

La taille des branches, ou des nœuds dans les produits finis, est un facteur critique affectant la qualité et la valeur du bois (Jozsa et Middleton, 1997). Il a déjà été démontré que la taille des branches augmente généralement avec l'augmentation de l'espacement entre les arbres (Benjamin *et al.*, 2009). Une augmentation de la croissance radiale des branches a bien été observée dans les années après la CPPTM. Toutefois, l'augmentation du diamètre des branches qui en résulte n'a pas été assez importante pour créer une différence significative entre les arbres traités et témoins dix années après la coupe partielle (figure 14).

Bien que le diamètre moyen des branches soit légèrement plus élevé chez les arbres traités, l'impact sur la qualité du bois est atténué par la plus grande taille des tiges, celles-ci permettant l'usinage de pièces de plus grande dimension pour lesquelles la présence de nœuds plus gros est tolérée (Jozsa et Middleton, 1997). Ici, l'étude s'est intéressée seulement aux plus grosses branches de chacune des sections de la cime verte de l'arbre, mais du point de vue de la qualité du bois, ce sont les plus grosses branches qui sont importantes car la qualité des pièces de bois est déterminée selon le diamètre maximum des branches (Mäkinen, 1999a).

Par ailleurs, les plus grosses branches des arbres ne sont pas situées au plus bas du houppier, mais bien entre 60% et 80% de la longueur de la cime verte, en partant du haut. Comme dans les études de Mäkinen et Hein (2006) et Colin et Houllier (1992), le diamètre des branches augmente en descendant le long de la tige jusqu'à atteindre un maximum, puis il y a une légère diminution près de la base du houppier. Les plus grosses branches ne se retrouvent donc pas dans la partie de la tige ayant le plus de valeur, soit dans le bas de la tige, sauf peut-être dans le cas des arbres ayant un pourcentage de cime vivante très élevé.

4.2.2 Pourcentage de bois final et masse volumique

Barbour *et al.* (1994) ont montré qu'après une éclaircie, une augmentation du bois initial et du bois final était observable chez le pin gris (*Pinus banksiana* Lamb.), mais que l'augmentation était beaucoup plus importante dans le bois initial. L'ouverture du milieu après le traitement améliorerait la disponibilité en eau tôt dans la saison de croissance, ce qui favoriserait dans une plus grande mesure la formation du bois initial par rapport au bois final (Barbour *et al.*, 1994). Ceci mène donc à une diminution de la proportion de bois final (Koga *et al.*, 2002; Zhang, 1995) ainsi qu'à une diminution de la masse volumique en raison du moindre pourcentage de bois final à densité élevée (Zhang, 1995). Pourtant, il est possible d'observer qu'après la CPPTM, le volume de bois final augmente selon la même tendance que le volume total de l'arbre; il n'y a donc pas de grand changement dans le pourcentage de bois final par rapport aux témoins dans les années après la coupe. Todaro et Macchioni (2011) avec *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco, tout comme Guller (2007) avec *Pinus brutia* Ten., ont aussi observé après une éclaircie que le pourcentage de bois final n'était pas affecté par le traitement. Par conséquent, même si la CPPTM a eu un effet positif significatif sur la largeur des cernes, l'augmentation de croissance se manifeste autant par une augmentation de la largeur du bois initial que du bois final en réponse au traitement, ce qui concorde avec les résultats de Peltola *et al.* (2007) obtenus avec le pin sylvestre (*Pinus sylvestris* L.).

Une diminution du pourcentage de bois final est cependant visible pour le sapin baumier aux années six à huit après la CPPTM (figure 21), soit dans les années où la croissance en volume est la plus élevée. Cette diminution n'est pas significative par rapport aux témoins, mais la différence est significative lorsque l'on compare avec la moyenne des années avant le traitement. Si la croissance radiale et en volume continue d'augmenter encore quelques années, il est possible que le pourcentage de bois final finisse par devenir significativement inférieur à celui des témoins.

En ce qui concerne la masse volumique, aucune différence significative n'a été observée pour les tiges résiduelles des CPPTM en comparaison avec les témoins pour la masse volumique moyenne du cerne de croissance. Cependant, lorsque l'on compare les années après coupe avec la moyenne des années avant traitement, on constate que la masse volumique du bois final augmente légèrement alors que celle du bois initial subit une certaine diminution. Selon Moschler *et al.* (1989), une éclaircie forte tend à diminuer la densité du bois initial et augmenter la densité du bois final, ce qui correspond à ce qui a été observé pour la CPPTM. Des études sur le sapin baumier ont aussi montré que passé la zone de transition entre le bois juvénile et le bois mature, la masse volumique du bois initial présente une diminution constante (Koga et Zhang, 2004; Koga *et al.*, 2002).

Une diminution significative de la masse volumique moyenne du cerne de croissance est visible entre les années deux et six après la CPPTM chez le sapin baumier. Toutefois, dans les deux années suivantes, les valeurs remontent et s'approchent de ce qu'elles étaient avant le traitement. Après éclaircie et fertilisation chez le Douglas, Erickson et Harrison (1974) avaient aussi montré que la masse volumique du bois tend à revenir aux valeurs d'avant traitement environ huit ans après même si le taux de croissance reste supérieur à ce qu'il était avant. Même si peu de changement s'observe sur la masse volumique moyenne, la qualité du bois peut tout de même être négativement affectée par une éclaircie en raison de la diminution de l'uniformité du bois (Moschler *et al.*, 1989).

Lindström (1997) a affirmé que la densité du bois dépend du pourcentage de bois final et du diamètre radial des trachéides du bois initial alors que Koga et Zhang (2002) ont relevé que la masse volumique moyenne des cernes était fortement liée à ses composants (la masse volumique du bois initial et celle du bois final) et au pourcentage de bois final. Il semble toutefois que le pourcentage de bois final ne soit pas le facteur le plus important déterminant la densité. En effet, après la CPPTM, la diminution de la masse volumique observée chez le sapin baumier se produit à partir de la seconde année après le traitement (figure 23) alors que la diminution du pourcentage de bois final ne se produit qu'à partir de

la sixième année après la CPPTM (figure 21). La diminution de la proportion de bois final n'est donc pas principalement responsable de la diminution de la masse volumique. Celle-ci pourrait plutôt être attribuable à une diminution de la largeur des parois cellulaires du bois initial après CPPTM, tel que démontré par Pamerleau-Couture (2011) avec l'épinette noire. Toutefois, étant donné le très petit nombre d'échantillons mesurés pour la masse volumique, soit uniquement ceux du bloc B20, les résultats sont à considérer avec une certaine prudence.

4.2.3 Propriétés mécaniques

Pour l'épinette noire et le sapin baumier, les valeurs du module d'élasticité (MOE) et du module de rupture (MOR) sont supérieures dans le bois formé après la CPPTM en comparaison avec la période avant CPPTM. Toutefois, la même hausse était aussi visible chez les témoins; cette augmentation des valeurs des propriétés mécaniques dans la période après CPPTM ne peut donc pas être attribuable au traitement. Ainsi, le fait d'avoir une croissance accélérée dans les années après la CPPTM n'a eu aucun effet sur la résistance mécanique. Ce résultat est en accord avec Alteyrac *et al.* (2006), qui ont déterminé que la largeur des cernes n'a pas d'impact significatif sur le MOE et le MOR et avec Guller (2007) et Vincent (2010), qui ont montré que le MOE et le MOR ne sont pas affectés par les traitements d'éclaircie.

Par ailleurs, la légère augmentation des propriétés mécaniques observable après la CPPTM, mais aussi chez les témoins, peut sembler surprenante. Celle-ci pourrait être liée à l'augmentation de la masse volumique observée dans le bois final dans les années après la coupe partielle, la masse volumique étant un important déterminant de la résistance mécanique (Bowyer *et al.*, 2007). L'augmentation pourrait également être due à l'âge cambial. Les pièces provenant de bois formé dans la période avant traitement ont un âge cambial moins élevé que le bois formé après la CPPTM et on sait que les propriétés

mécaniques changent en fonction de l'âge cambial (Schneider *et al.*, 2008). Il est à noter que certains échantillons considérés comme provenant de bois formé après CPPTM peuvent contenir quelques cernes formés dans la période avant traitement. Ceci ne devrait toutefois pas avoir d'effet sur les résultats obtenus, la proportion de bois formé avant traitement étant minime par rapport à celle formée après traitement dans l'échantillon.

4.3 ÉPINETTE NOIRE VS SAPIN BAUMIER

Le sapin baumier montre une réponse au traitement plus forte et plus rapide que l'épinette noire au niveau de la croissance de la tige, ce qui est en accord avec la théorie que les sapins du genre *Abies* montrent généralement un délai de réaction à l'ouverture du peuplement plus court que les épinettes (McCaughey et Ferguson (1988) dans Claveau *et al.*, 2006). La différence dans la vitesse de réponse serait liée à la tolérance à l'ombre, les espèces les plus tolérantes présentant une meilleure réponse (Claveau *et al.*, 2006) en raison de leur valence écologique plus large qui leur confère une meilleure capacité de s'adapter à des conditions très variées. Le sapin étant considéré comme plus tolérant que l'épinette noire, celui-ci réagit donc plus rapidement suite à la CPPTM. La meilleure réponse du sapin pourrait également être due à son habileté à exploiter les ressources souterraines disponibles (Weiskittel *et al.*, 2009).

Le sapin baumier est reconnu pour la faible qualité de son bois (Zhang et Koubaa, 2009), surtout au niveau des propriétés mécaniques (Mullins et McKnight, 1981). En général, les paramètres de qualité du bois mesurés sont moins intéressants chez le sapin baumier par rapport à l'épinette noire, et ce, même avant la CPPTM. En effet, le diamètre des plus grosses branches est supérieur dans toutes les sections de la cime verte pour le sapin, les propriétés mécaniques sont inférieures, avec des valeurs environ 23% plus faibles pour les modules d'élasticité et de rupture et la masse volumique moyenne est environ 20% inférieure. En revanche, le pourcentage de bois final est semblable chez les deux espèces.

Étant donné ce résultat, la différence de masse volumique moyenne entre le sapin et l'épinette ne peut pas être liée au pourcentage de bois final, mais est probablement attribuable à des différences anatomiques entre les deux espèces. Les trachéides des deux espèces font en moyenne la même longueur, mais le diamètre des trachéides du sapin est légèrement plus grand (30 à 40 μm) que celui de l'épinette noire (entre 25 et 30 μm) (Zhang et Koubaa, 2009). Avec des parois cellulaires de dimension similaires dans le bois initial et un peu plus minces dans le bois final (Krause *et al.*, 2010), le sapin baumier se retrouve avec un ratio paroi-lumen plus faible que l'épinette noire, ce qui pourrait expliquer la plus faible masse volumique.

Quant aux propriétés mécaniques inférieures chez le sapin, celles-ci pourraient être expliquées par la densité moindre. Cependant, il semble qu'il n'y ait pas de relation entre le MOE et la densité du cerne et une faible corrélation entre le MOR et la densité des cernes, la densité expliquant seulement 16% de la variation du MOR selon Alteyrac *et al.* (2006). C'est plutôt l'angle des microfibrilles qui serait le paramètre le plus important pour expliquer les propriétés mécaniques du bois (Alteyrac *et al.*, 2006). De plus, des parois plus épaisses des trachéides ou un lumen plus petit induisent une rigidité plus élevée. Ainsi, le plus grand diamètre des trachéides du sapin pour une même largeur des parois que l'épinette noire pourraient avoir une influence sur la résistance mécanique plus faible du sapin.

4.4 CROISSANCE VS QUALITÉ DU BOIS

À la lumière des résultats obtenus, il est possible de conclure que la CPPTM permet d'augmenter de façon significative la croissance annuelle des tiges résiduelles d'épinette noire et de sapin baumier et que cette croissance plus rapide n'entraîne pas de changements sensibles dans les paramètres de qualité du bois qui ont été étudiés. Bendtsen (1978) avait affirmé que l'effet de pratiques d'aménagement intensives sur les propriétés du bois est

mineur si on compare avec les différences observées entre les propriétés du bois juvénile et du bois mature et que les différences entre les propriétés du bois causées par la croissance accélérée ne créent pas de problème particulier quant à l'utilisation que l'on peut faire du bois. Par ailleurs, le bénéfice suite au gain en volume surpasse les effets négatifs qui peuvent être observés (Bendtsen, 1978). Il semble donc que ce soit également le cas pour la coupe avec protection des petites tiges marchandes. Néanmoins, c'est seulement dans le futur, avec l'utilisation que l'on fera du bois, qu'il sera possible de vraiment valider les résultats obtenus concernant la qualité du bois.

4.5 LIMITES DE L'ÉTUDE

Seuls quelques paramètres déterminant la qualité du bois ont été étudiés ici. Des études supplémentaires sur d'autres paramètres tels que le défilement de la tige, la proportion de bois de compression, l'angle des microfibrilles dans la paroi cellulaire, la longueur des trachéides, l'épaisseur des parois et le diamètre du lumen pourraient fournir des informations complémentaires concernant la qualité du bois des tiges après la CPPTM. Une étude portant sur une plus longue période après l'intervention serait aussi pertinente afin de déterminer jusqu'à quel moment il est possible de percevoir l'effet de la CPPTM et si la qualité du bois peut en être affectée dans le cas où l'effet se poursuit sur une longue période.

5. CONCLUSION

Une forte proportion des tiges résiduelles a réagi positivement après la CPPTM. Un délai de quatre ans pour l'épinette noire et de deux ans pour le sapin baumier a toutefois été nécessaire avant d'observer un effet positif significatif au niveau de la croissance en diamètre et en volume. Une réponse semblable a été observée dans la partie inférieure du houppier, alors que les branches basses de la cime vivante ont présenté une augmentation de croissance radiale et en longueur après un délai. Quant à la qualité du bois produit après la CPPTM, aucun changement significatif par rapport aux arbres témoins n'a été obtenu pour le pourcentage de bois final, les propriétés mécaniques, le diamètre des plus grosses branches et la masse volumique. Les résultats suggèrent que la coupe avec protection des petites tiges marchandes peut améliorer la production en diamètre et en volume des tiges résiduelles sans trop affecter certains paramètres de qualité du bois. Ceci confirme les hypothèses de travail concernant la meilleure croissance après traitement, mais réfute les hypothèses traitant de la qualité du bois, celle-ci n'étant pas significativement diminuée dans les années après la CPPTM.

Des études supplémentaires sur d'autres paramètres de qualité du bois et sur une période de temps plus longue après l'intervention seraient toutefois nécessaires afin de pouvoir affirmer avec plus de certitude que la CPPTM s'avère un traitement sylvicole approprié pour augmenter la production en volume des tiges résiduelles sans diminuer la qualité du bois produit par ces dernières.

6. 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.). Thèse de doctorat. Université Laval, Faculté de foresterie et géomatique, Québec. 136 p.
- Alteyrac, J., Cloutier, A., Ung, C.H. et Zhang, S.Y., 2006. Mechanical properties in relation to selected wood characteristics of black spruce. *Wood and Fiber Science* 38(2): 229-237.
- ASTM, 2007. Standard Test Methods for Small Clear Specimens of Timber, ASTM D-143. Dans *Annual Book of ASTM Standards*, Vol. 04.10 on Wood. West Conshohocken, PA.
- Barbour, R.J., Fayle, D.C.F., Chauret, G., Cook, J., Karsh, M.B. et Ran, S.K., 1994. Breast-Height Relative Density and Radial Growth in Mature Jack Pine (*Pinus banksiana*) for 38 Years after Thinning. *Canadian Journal of Forest Research* 24(12): 2439-2447.
- Bebber, D.P., Thomas, S.C., Cole, W.G. et Balsillie, D., 2004. Diameter increment in mature eastern white pine *Pinus strobus* L. following partial harvest of old-growth stands in Ontario, Canada. *Trees-Structure and Function* 18(1): 29-34.
- Bendtsen, B.A., 1978. Properties of wood from improved and intensively managed trees. *Forest Products Journal* 28(10): 61-72.
- Benjamin, J.G., Kershaw, J.A., Weiskittel, A.R., Chui, Y.H. et Zhang, S.Y., 2009. External knot size and frequency in black spruce trees from an initial spacing trial in Thunder Bay, Ontario. *Forestry Chronicle* 85(4): 618-624.
- Bowyer, J.L., Shmulsky, R. et Haygreen, J.G., 2007. *Forest products and wood science: an introduction*, fifth edition. Blackwell Publishing, Iowa, USA, 568 p.
- Carmean, W.H., 1972. Site index curves for upland oaks in the Central States. *Forest Science* 18:102-120.
- Cimon-Morin, J., Ruel, J.C. et Darveau, M., 2010. Short term effects of alternative silvicultural treatments on stand attributes in irregular balsam fir-black spruce stands. *Forest Ecology and Management* 260(5): 907-914.
- Claveau, Y., Comeau, P.G., Messier, C. et Kelly, C.P., 2006. Early above- and below-ground responses of subboreal conifer seedlings to various levels of deciduous canopy removal. *Canadian Journal of Forest Research* 36(8): 1891-1899.

Colin, F. et Houllier, F., 1992. Branchiness of Norway Spruce in Northeastern France - Predicting the Main Crown Characteristics from Usual Tree Measurements. *Annales Des Sciences Forestieres* 49(5): 511-538.

Deal, R.L., Heithecker, T. et Zenner, E.K., 2010. Comparison of tree size structure and growth for partially harvested and even-aged hemlock-spruce stands in southeast Alaska. *J. For. Res.* 15(1): 31-37.

Erickson, H.D. et Harrison, A.T., 1974. Douglas Fir wood quality studies. Part I: Effects of age and stimulated growth on wood density and anatomy. *Wood Science and Technology* 8(3): 207-226.

Ferguson, D.E., 1994. Advance regeneration in the inland West: considerations for individual tree and forest health. *Journal of Sustainable Forestry* 2(3-4): 411-422.

Forward, D.F. et Nolan, N.J., 1961a. Growth and morphogenesis in the Canadian forest species. IV. Radial growth in branches and main axis of *Pinus resinosa* Ait. under conditions of open growth, suppression and release. *Can. J. Bot.* 39: 385-409.

Forward, D.F. et Nolan, N.J., 1961b. Growth and morphogenesis in the Canadian forest species. V. Further studies of wood growth in branches and mean axis of *Pinus resinosa* Ait. under conditions of open growth, suppression, and release. *Can. J. Bot.* 39: 413-436.

Fritts, H.C., 1976. Tree rings and climate. Academic Press, London, 255 p.

Gauthier, S., Vaillancourt, M.-A., Leduc, A., De Grandpré, L., Kneeshaw, D., Morin, H., Drapeau, P. et Bergeron, Y., 2008. Aménagement écosystémique en forêt boréale. Presses de l'Université du Québec, Sainte-Foy, Québec, 568 p.

Gouvernement du Québec, 2002. Coupe avec protection des petites tiges marchandes (CPPTM), Avis scientifique. Comité consultatif scientifique du manuel d'aménagement forestier, Ministère des Ressources Naturelles, Direction de la recherche forestière. 146 p.

Guay, R., Gagnon, R. et Morin, H., 1992. A New Automatic and Interactive Tree-Ring Measurement System Based on a Line Scan Camera. *Forestry Chronicle* 68(1): 138-141.

Guller, B. 2007. The effects of thinning treatments on density, MOE, MOR and maximum crushing strength of *Pinus brutia* Ten. wood. *Annals of Forest Science* 64(4): 467-475.

Hein, S., Weiskittel, A.R. et Kohnle, U., 2008a. Branch characteristics of widely spaced Douglas-fir in south-western Germany: Comparisons of modelling approaches and geographic regions. *Forest Ecology and Management* 256(5): 1064-1079.

- Hein, S., Weiskittel, A.R. et Kohnle, U., 2008b. Effect of wide spacing on tree growth, branch and sapwood properties of young Douglas-fir [*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco] in south-western Germany. *European Journal of Forest Research* 127(6): 481-493.
- Holmes, R., 1983. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. *Tree-ring bulletin* 43: 69-78.
- Jozsa, L.A. et Middleton, G.R., 1997. Les caractéristiques déterminant la qualité du bois: nature et conséquences pratiques. Publication spéciale SP-34F. Forintek Canada Corp., Sainte-Foy (Québec), 42 p.
- Kantola, A. et Mäkelä, A., 2004. Crown development in Norway spruce *Picea abies* (L.) Karst. *Trees-Structure and Function* 18(4): 408-421.
- Kneeshaw, D., Williams, H., Nikinmaa, E. et Messier, C., 2002. Patterns of above- and below-ground response of understory conifer release 6 years after partial cutting. *Canadian Journal of Forest Research* 32(2): 255-265.
- Koga, S. et Zhang, S. Y., 2002. Relationships between wood density and annual growth rate components in balsam fir (*Abies balsamea*). *Wood and Fiber Science* 34(1): 146-157.
- Koga, S. et Zhang, S.Y., 2004. Inter-tree and intra-tree variations in ring width and wood density components in balsam fir (*Abies balsamea*). *Wood Science and Technology* 38(2): 149-162.
- Koga, S., Zhang, S.Y. et Begin, J., 2002. Effects of precommercial thinning on annual radial growth and wood density in balsam fir (*Abies balsamea*). *Wood and Fiber Science* 34(4): 625-642.
- Koubaa, A., Zhang, S.Y.T. et Makni, S., 2002. Defining the transition from earlywood to latewood in black spruce based on intra-ring wood density profiles from X-ray densitometry. *Annals of Forest Science* 59(5-6): 511-518.
- Krause, C., Rossi, S., Thibeault-Martel, M. et 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(4): 402.
- Larson, P.R., 1969. Wood formation and the concept of wood quality. *Yale University School of Forestry, Bull.* 74.
- Latham, P. et Tappeiner, J., 2002. Response of old-growth conifers to reduction in stand density in western Oregon forests. *Tree Physiol.* 22(2-3): 137-146.

Le Blanc, M.-L., 2009. Réaction des micromammifères et des oiseaux à différentes intensités de coupe en forêt boréale irrégulière. Mémoire de maîtrise, Université Laval, Faculté des sciences et génie, Département de biologie, Québec. 40 p.

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. Mémoire de maîtrise, Université du Québec à Chicoutimi, Département des sciences fondamentales. Chicoutimi, 86 p.

Lindström, H., 1997. Fiber length, tracheid diameter, and latewood percentage in Norway spruce: Development from pith outwards. *Wood and Fiber Science* 29(1): 21-34.

Luszczynski, B., 2009. Croissance des branches et des tiges d'épinette noire: effet de la tordeuse des bourgeons de l'épinette et de l'éclaircie commerciale. Mémoire de maîtrise, Université du Québec à Chicoutimi, Département des sciences fondamentales. Chicoutimi, 105 p.

MacDonald, E. et Hubert, J., 2002. A review of the effects of silviculture on timber quality of Sitka spruce. *Forestry* 75(2): 107-138.

Mäkinen, H., 1999a. Effect of stand density on radial growth of branches of Scots pine in southern and central Finland. *Canadian Journal of Forest Research* 29(8): 1216-1224.

Mäkinen, H., 1999b. Growth, suppression, death, and self-pruning of branches of Scots pine in southern and central Finland. *Canadian Journal of Forest Research* 29(5): 585-594.

Mäkinen, H., 2002. Effect of stand density on the branch development of silver birch (*Betula pendula* Roth) in central Finland. *Trees-Structure and Function* 16(4-5): 346-353.

Mäkinen, H. et Hein, S., 2006. Effect of wide spacing on increment and branch properties of young Norway spruce. *European Journal of Forest Research* 125(3): 239-248.

Mäkinen, H. et Isomäki, A., 2004. Thinning intensity and growth of Norway spruce stands in Finland. *Forestry* 77(4): 349-364.

McCaughy, W.W. et Ferguson, D.E., 1988. Response of advance regeneration to release in the inland mountain west: a summary. Dans *Proceedings – Future Forests of the Mountain West: A Stand Culture Symposium*, 29 September - 3 October 1986, Missoula, Mont. Édité par W.C. Schmidt. USDA For. Ser. Gen. Tech. Rep. INT-243, p. 255-266.

Moschler, W.W., Dougal, E.F. et McRae, D.D., 1989. Density and growth ring characteristics of *Pinus taeda* L. following thinning. *Wood and Fiber Science* 21(3): 313-319.

Mullins, E.J. et McKnight, T.S., 1981. Les bois du Canada, leurs propriétés et leurs usages, Québec. 509 p.

Pamerleau-Couture, É., 2011. Impact de trois interventions sylvicoles sur la croissance et la qualité du bois de l'épinette noire en forêt boréale. Mémoire de maîtrise, Université du Québec à Chicoutimi, Département des sciences fondamentales. Chicoutimi, 98 p.

Peltola, H., Kilpeläinen, A., Sauvala, K., Räisänen, T. et Ikonen, V.P., 2007. Effects of early thinning regime and tree status on the radial growth and wood density of Scots pine. *Silva Fennica* 41(3): 489-505.

Poncsak, S., Kocaefe, D., Bouazara, M. et Pichette, A., 2006. Effect of high temperature treatment on the mechanical properties of birch (*Betula papyrifera*). *Wood Science and Technology* 40(8): 647-663.

Quinn, G.P. et Keough, M.J., 2002. *Experimental Design and Data Analysis for Biologists*. Cambridge University Press, Cambridge, UK. 537 p.

Régent Instruments Inc., 2003. WinSTEM™ 2003d User's Guide. 29 p.

Riopel, M., 1999. Potentiel de croissance de la haute régénération préétablie de sapin baumier: Une analyse dendrométrique au niveau de la tige et du peuplement. Mémoire de maîtrise, Université Laval, Faculté de foresterie et géomatique, Département des sciences du bois et de la forêt. Québec, 149 p.

Riopel, M., Bégin, J. et Gingras, J.F., 2000. Une option pour la récolte en forêt boréale: la coupe avec protection des petites tiges marchandes. *FERIC Advantage*, p. 1-8.

Riopel, M., Bégin, J. et 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. *Canadian Journal of Forest Research* 40(7): 1458-1472.

Ruel, J.C., 1995. Understanding windthrow - Silvicultural implications. *Forestry Chronicle* 71(4): 434-445.

Ruel, J.C., Larouche, C. et Achim, A., 2003. Changes in root morphology after precommercial thinning in balsam fir stands. *Canadian Journal of Forest Research* 33(12): 2452-2459.

Schneider, R., Zhang, S.Y., Swift, D.E., Bégin, J. et Lussier, J.M., 2008. Predicting selected wood properties of jack pine following commercial thinning. *Canadian Journal of Forest Research* 38(7): 2030-2043.

Schweingruber, F.H., 1988. *Tree rings basic and applications of dendrochronology*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.

Siostrzonek, E., 1958. More accurate determination of basal area increment with increment boring and log disks. *Forstwissenschaftliches Centralblatt*, 77:237-254. (Forestry Science Department, Forest Research Institute, Munich)

Stokes, M. et Smiley, T., 1968. An introduction to tree-ring dating. University of Chicago Press, London. 73 p.

Thorpe, H.C., Thomas, S.C. et Caspersen, J.P., 2007. Residual-tree growth responses to partial stand harvest in the black spruce (*Picea mariana*) boreal forest. *Canadian Journal of Forest Research* 37(9): 1563-1571.

Todaro, L. et Macchioni, N., 2011. Wood properties of young Douglas-fir in Southern Italy: results over a 12-year post-thinning period. *European Journal of Forest Research* 130(2): 251-261.

Tremblay, M.-J., 2009. Dynamique et croissance de vieux peuplements d'épinettes noires (*Picea mariana*) entre les 51^{ième} et 52^{ième} degrés de latitude nord au Québec. Mémoire de maîtrise, Université du Québec à Chicoutimi, Département des sciences fondamentales. Chicoutimi, 78 p.

Vincent, M., 2010. Impact des éclaircies commerciales sur la croissance et la qualité du bois de l'épinette noire (*Picea mariana* (Mill.) BSP) en forêt boréale. Thèse de doctorat, Université du Québec à Chicoutimi, Département des sciences fondamentales. Chicoutimi, 200 p.

Vincent, M., Krause, C. et Zhang, S.Y., 2009. Radial growth response of black spruce roots and stems to commercial thinning in the boreal forest. *Forestry* 82(5): 557-571.

Weiskittel, A.R., Kenefic, L.S., Seymour, R.S. et Phillips, L.M., 2009. Long-Term Effects of Precommercial Thinning on the Stem Dimensions, Form and Branch Characteristics of Red Spruce and Balsam Fir Crop Trees in Maine, USA. *Silva Fennica* 43(3): 397-409.

Weiskittel, A.R., Maguire, D.A., et Monserud, R.A., 2007. Response of branch growth and mortality to silvicultural treatments in coastal Douglas-fir plantations: Implications for predicting tree growth. *Forest Ecology and Management* 251(3): 182-194.

Willcocks, A.J. et Bell, W., 1995. Effect of stand density (spacing) on wood quality. Ontario Ministry of Natural Resources. Northeast Science & Technology. 12 p.

Youngblood, A.P., 1991. Radial Growth After a Shelterwood Seed Cut in a Mature Stand of White Spruce in Interior Alaska. *Canadian Journal of Forest Research* 21: 410-413.

Zhang, S.Y., 1995. Effect of growth rate on wood specific gravity and selected mechanical properties in individual species from distinct wood categories. *Wood Science and Technology* 29(6): 451-465.

Zhang, S.Y. 2003. Wood Quality Attributes and Their Impacts on Wood Utilization. *Dans* XII World Forestry Congress, Quebec, Canada.

Zhang, S.Y. et Koubaa, A., 2009. Les résineux de l'Est du Canada: écologie forestière, caractéristiques, transformations et usages, Québec. 377 p.