

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ	II
REMERCIEMENT.....	III
TABLE DES MATIÈRES.....	IV
LISTE DES TABLEAUX.....	VI
LISTE DES FORMULES.....	VII
LISTE DES FIGURES.....	VIII
INTRODUCTION.....	1
MATÉRIEL ET MÉTHODES.....	5
AIRE D'ÉTUDE.....	5
DESCRIPTION DES SITES.....	5
MESURES ET ÉCHANTILLONNAGE.....	9
ANALYSE DES ÉCHANTILLONS.....	11
1. <i>Croissance</i>	12
2. <i>Analyses cellulaires</i>	14
2.1 <i>Mesures</i>	14
2.2 <i>Standardisation</i>	16
3. <i>Tests mécaniques</i>	17
ANALYSES STATISTIQUES.....	19
<i>Croissance radiale</i>	19
<i>Analyses anatomiques</i>	19
<i>Analyses mécaniques</i>	20
RÉSULTATS.....	21
ANALYSE DES CERNES DE CROISSANCE.....	21
<i>Effet de l'EPC sur la croissance radiale</i>	21
<i>Effet de l'EC sur la croissance radiale</i>	22
<i>Classes de croissance</i>	24
ANALYSES CELLULAIRES.....	26
<i>Analyses anatomiques des sites EPC</i>	26
<i>Analyses anatomiques des sites EC</i>	29
ANALYSES MÉCANIQUES.....	32

<i>Tests mécaniques des sites EPC</i>	32
<i>Tests mécaniques des sites EC</i>	34
DISCUSSION	37
CROISSANCE RADIALE APRÈS L'ÉCLAIRCIE	37
PROPRIÉTÉS DU BOIS APRÈS L'ÉCLAIRCIE	40
RÉFÉRENCES	44

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Caractéristiques de la végétation et du sol des peuplements EPC et EC.....	8
Tableau 2. Localisation des sites et caractéristiques des arbres traités à l'EPC et l'EC. L'écart-type est représenté entre parenthèses.....	10
Tableau 3. Résultats de l'analyse de variance à mesures répétées (MANOVA, $\alpha = 0,05$) de l'accroissement radial (%) selon l'intervention (traités et témoins) avant et après traitement EC.....	23
Tableau 4. Résultats des analyses de variance à un facteur (ANOVA) pour les 10 sites EPC de la largeur du cerne, du nombre de cellules et de l'épaisseur de la paroi cellulaire dans le bois initial et le bois final.....	28
Tableau 5. Résultats des analyses de variance à un facteur (ANOVA) pour les 10 sites EC de la largeur du cerne, du nombre de cellules et de l'épaisseur de la paroi cellulaire dans le bois initial et le bois final.....	31
Tableau 6. Résultats des tests de cisaillement radial (FCR) et de compression axiale (FCA) dont la moyenne avant et après EPC est représentée pour chaque site avec l'écart- type. Le test statistique utilisé est un test de t pour échantillons appariés ($\alpha = 0,05$).....	33
Tableau 7. Résultats des tests de cisaillement radial (FCR) et de compression axiale (FCA) dont la moyenne avant et après EC est représentée pour chaque site avec l'écart- type. Le test statistique utilisé est un test de t pour échantillons appariés ($\alpha =$ $0,05$).....	35

LISTE DES FORMULES

Formule 1. Équation de la largeur indicée du cerne de croissance.....12

Formule 2. Équation du calcul des proportions tirée de Filion et Cournoyer 1995.....15

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Localisation des peuplements traités à l'EPC (carrés), à l'EC (cercles) et des peuplements témoins (triangles pleins) dans la région du Saguenay-lac-St-Jean. L'ellipse pointillée délimite les sites compris dans le sous-domaine bioclimatique de la sapinière à bouleau blanc de l'ouest et l'ellipse pleine, le sous-domaine bioclimatique de la sapinière à bouleau blanc de l'est (d'après MapInfo Corporation 2003).....6

Figure 2. Séparation de l'échantillon pour effectuer les trois types de mesure soit les tests mécaniques, la croissance radiale et l'analyse cellulaire.....9

Figure 3. Organigramme représentant un résumé des trois types de mesures réalisés sur les échantillons de bois.....11

Figure 4. L'effet de l'EPC et de l'EC est comparé avant et après l'année du traitement au moyen de A) l'accroissement radial et B) la croissance d'un témoin pour les EC seulement.....13

Figure 5. A- Identification des six files radiales de cellules pour chaque éclaircie (EPC et EC) soumis aux analyses anatomiques dont trois cernes avant et trois cernes après éclaircie. Le cerne de l'éclaircie (✕) est exclu des analyses. B- La largeur du bois initial et du bois final, le nombre de cellules et l'épaisseur tangentielle de la paroi cellulaire ont été mesurés sur chaque file radiale de cellules.....15

Figure 6. Cylindre de bois où sont prélevés quatre échantillons (1, 2, 3 et 4) de 5 mm de part et d'autre de l'année de l'éclaircie pour les tests de cisaillement radial (FCR) et de compression axial (FCA).....17

Figure 7. A- Le Fractomètre III (Götz et Mattheck 1999) avec les charges pour le cisaillement (FCR) et la compression (FCA). B- Contrainte appliquée en cisaillement

radial. C- Contrainte appliquée en compression axiale. Pour les deux contraintes, la force appliquée est mesurée en Newton (N) et est apposée dans le sens longitudinal des trachéides (Götz et Mattheck 1999).....18

Figure 8. Accroissement radial moyen (ronds pleins, ordonnée de gauche) et nombre d'arbre traité (ronds vides, ordonnée de droite) en fonction des années avant et après l'année de l'éclaircie précommerciale (E) A) des arbres plus jeunes de sept sites EPC et B) des arbres plus âgés de trois sites EPC. L'erreur-type de la moyenne est représentée par des barres horizontales.....22

Figure 9. Accroissement radial moyen (%) en fonction des années avant et après l'année de l'éclaircie commerciale (E) des dix sites traités à l'EC et des quatre sites témoins.....23

Figure 10. Accroissement radial moyen des arbres suite à l'éclaircie distribué à l'intérieur de quatre classes de croissance pour les 10 sites EPC et les 10 sites EC.....25

Figure 11. Comparaison des paramètres cellulaires dans le bois initial et le bois final des 10 sites EPC pour les trois années avant et les trois années après éclaircie (E). A) largeur du cerne (μm), B) le nombre de cellule, C) l'épaisseur de la paroi cellulaire (μm) et D) proportion de bois final (%). Le niveau de significativité entre les moyennes a été détecté par le test *a posteriori* de Student-Newman-Keuls.....27

Figure 12. Comparaison des paramètres cellulaires dans le bois initial et le bois final des 10 sites EC pour les trois années avant et la troisième, quatrième et cinquième année après éclaircie (E). A) largeur du cerne (μm), B) le nombre de cellule, C) l'épaisseur de la paroi cellulaire (μm) et D) proportion de bois final (%). Le niveau de significativité entre les moyennes a été détecté par le test *a posteriori* de Student-Newman-Keuls.....30

Figure 13. Forces de cisaillement radial (N) et de compression axiale (N) avant et après traitement mesurées sur les arbres échantillonnés des 10 sites EPC. L'analyse statistique utilisée est un test de t pour échantillon apparié.....34

Figure 14. Forces de cisaillement radial (N) et de compression axiale (N) avant et après traitement mesurées sur les arbres échantillonnés des 10 sites EC. L'analyse statistique utilisée est un test de t pour échantillon apparié.....36

INTRODUCTION

L'épinette noire (*Picea mariana* (Mill.) B.S.P.) est l'espèce commerciale la plus importante au Saguenay – Lac-Saint-Jean et représente à elle seule 80% du volume de bois du couvert résineux (Fillion 2004). Cette essence est utilisée principalement pour le bois à pâte de qualité, le bois de construction de dimension S-P-F (MRN 1990; Mullins et McKnight 1981) et dès lors dans certains produits à valeur ajoutée (Alteyrac 2005; Bustos 2003). Elle se démarque des autres espèces par sa forte plasticité physiologique et son amplitude écologique lui permettant de s'adapter à son environnement et aux diverses perturbations qui affectent l'intégrité des peuplements (Gagnon et Morin 2001). Récemment, les peuplements naturels de la région ont été soumis intensivement à divers traitements sylvicoles sans que soient connue la dynamique et les conséquences de tels traitements en forêt boréale. L'éclaircie, dont typiquement l'éclaircie précommerciale (EPC) et l'éclaircie commerciale (EC), est un traitement sylvicole dont le principal rôle est de régulariser la croissance d'une forêt dans le but de la garder stable et productive jusqu'à sa maturité (Petras 2002; Tremblay 2006; Viens 2001). L'impact controversé de ce traitement provient des répercussions méconnues sur la qualité du bois des tiges traitées. De plus, une accélération de la croissance suivant l'application de l'éclaircie aurait pour effet de prolonger la phase juvénile des arbres et d'intervenir dans les propriétés futures du bois (Zhang et Chauret 2001; Zhang et al. 1996; Zhang et al. 1998).

Plus spécifiquement, l'EPC est le traitement sylvicole non commercial le plus utilisé au Québec (Cimon et Labbé 2006). Elle est pratiquée au stade de gaulis (hauteur > 1,3 m et diamètre au dhp < 9 cm) et éduque le peuplement à une prochaine éclaircie dite commerciale (MRNFP 2003a). Ce traitement vise à réduire la densité du peuplement par l'abattage des tiges qui nuisent à la croissance des arbres d'avenir en régularisant leur espacement (MRNFP 2003a; MRNF 2007a). Les résultats escomptés sont d'accroître le diamètre des arbres traités (Barbour *et al.* 1992; Brissette *et al.* 1999; Doucet et Boily 1996; Legris et Couture 1999; Pothier 2002; Zhang *et al.* 1998), leur procurer une plus grande valeur monétaire et réduire l'âge d'exploitabilité technique

malgré un défilement plus ou moins prononcé de la tige d'après le type d'éclaircie utilisé et de son niveau d'application (Bédard et al. 2002).

Pour ce qui est de l'EC, ce traitement est pratiqué dans un peuplement forestier régulier d'une seule strate, de couvert fermé et de stade de prématurité (Bédard et al. 2003). Les tiges éclaircies ont des dimensions marchandes ce qui permet de compenser une partie ou la totalité des frais de récolte (OIFQ 1996). Ce traitement vise, tout comme l'EPC, à augmenter l'accroissement du diamètre des arbres restants, et aussi, par une sélection convenable, à améliorer la qualité du peuplement résiduel (Bédard et al. 2003; Bella et DeFranceschi 1974; Mayor et Rodà 1993; Métro 1975; MRNF 2007a; Zhang et Chauret 2001). En outre, les EC permettent de maintenir la vigueur des tiges résiduelles et la hausse potentielle de sa résistance à la tordeuse des bourgeons de l'épinette (*Choristoneura fumiferana* (Clem.)) (Bauce 1996; Bédard et al. 2003; Tremblay 2006).

Au cours des trois périodes d'inventaire décennal mesurées en 1970, 1980 et 1990, on a constaté une régression approximative de 10% du couvert forestier résineux de la région 02. À la fin des années 90, la possibilité forestière a augmenté significativement ce qui serait relié notamment à la hausse des traitements sylvicoles (Fillion 2004; MRNF 2007b). Toutefois, l'application des ces traitements étant récente, ces pratiques n'ont pas fait l'objet d'études approfondies quant aux répercussions sur la qualité du bois chez les arbres traités. Ces traitements influenceraient notamment les propriétés du bois et le taux de croissance des résineux (Zhang et Morgenstern 1995). S'il s'avérait que les traitements effectués sur des milliers d'hectares ne rencontraient pas les standards de l'industrie sur le plan de la résistance mécanique, l'impact sur la valeur marchande du bois serait économiquement néfaste.

La qualité du bois se définit d'après la perception des différents utilisateurs et de l'usage précis que l'on veut en faire (Josza et Middleton 1994; Zhang 1997). Par exemple, le bois à pâte devra contenir des trachéides flexibles, longues, aux parois minces et au lumen large du bois initial (Josza et Middleton 1997). Tandis que le bois de construction, sollicité pour sa résistance et sa rigidité, devra contenir une forte proportion

de bois final et des cellules aux parois épaisses. L'épaisseur de la paroi des trachéides et la proportion du bois final (Alteyrac 2005; Josza et Middleton 1997) sont parmi les quelques critères de qualité retenus et réfèrent directement à la masse volumique du bois (densité). Ainsi, la densité permet d'expliquer de nombreuses autres propriétés du bois (Law et Valade 1997; Zhang et al. 1992) et est principalement influencée par le génotype, l'âge cambial et le taux de croissance (Saranpää 2003).

Plusieurs auteurs ont étudié l'impact d'une accélération de la croissance sur la densité du bois portant sur différents résineux (André *et al.* 1994; Reader et Kurmes 1996; Tasissa et Burkhart 1998; Pape 1999). Il est généralement admis qu'un taux de croissance rapide est associé à une diminution de la densité du bois (Larson et al. 1969; Zhang et al. 1996; Koga et Zhang 2002). Cependant, chez l'épinette noire, la relation densité et largeur de cerne est controversée et semble hautement dépendre de l'âge des arbres (Koubaa et al. 2000; Burdon et al. 2004). La relation est significative chez les arbres jeunes mais absente chez les arbres adultes et matures (Hall 1984; Zhang et al. 1996). De plus, la densité est une mesure variable chez les arbres car elle diffère à l'échelle des individus et davantage au niveau du cerne de croissance (Jaakkola et al. 2005 a). Ce projet a tenu à évaluer la croissance radiale et certaines propriétés du bois des arbres traités à l'éclaircie par une méthode simple et non destructive.

L'objectif principal de cette étude était de prédire l'impact de deux traitements sylvicoles (EPC et EC) dans les peuplements d'épinette noire en fonction a) de la croissance radiale des arbres et b) de la qualité du bois. Les objectifs spécifiques étaient 1) de quantifier l'impact du traitement sylvicole sur l'accroissement radial des individus, 2) de qualifier et de quantifier les changements anatomiques survenus suite aux interventions sylvicoles et 3) d'évaluer certaines propriétés mécaniques de rupture avant et après traitement en analysant les échantillons avec un instrument expérimental de mesure, le « fractomètre » (Götz et Mattheck 1999).

Les hypothèses de recherche étaient ; que les traitements sylvicoles (EPC et EC) augmenteraient de façon observable et mesurable la croissance radiale des tiges; que les

propriétés anatomiques et mécaniques du bois seront changées suite à ces traitements; et, que la croissance radiale et les propriétés du bois différeront pour les deux traitements (EPC et EC).

MATÉRIEL ET MÉTHODES

Aire d'étude

L'aire d'étude a été concentrée dans la sous-zone de la forêt boréale continue de la sapinière à bouleau blanc du Saguenay – Lac St-Jean (MRNFP 2003b). Les sites ont été délimités à l'intérieur d'une zone comprise entre le 47,5° et 49,0° de latitude et entre 70,0° et 71,5° de longitude (Figure 1). Ces derniers ont été sélectionnés à partir des cartes écoforestières du Ministère des Ressources naturelles et de la Faune du Québec (2^e et 3^e inventaires). À l'intérieur de ce périmètre, 24 sites de peuplements jeunes et adultes d'épinette noire (*Picea mariana* (Mill.) B.S.P.) comprenant 35 individus par site ont été échantillonnés. Dix sites devaient avoir subi une éclaircie précommerciale (EPC) et dix autres, une éclaircie commerciale (EC). Quatre sites témoins ont été échantillonnés pour les sites EC et devaient représenter les caractéristiques de ces peuplements (Figure 1). De plus, les sites traités devaient respecter un délai préétabli de quatre années au moins entre l'année d'échantillonnage et l'année du traitement. De ce fait, les années d'éclaircie étaient variables et oscillaient entre 1987 et 2000 pour les sites EPC et entre 1995 et 1999 pour les sites EC. Tous les peuplements ont été échantillonnés à l'été 2004, excepté pour le site MV99 échantillonné à l'été 2005.

Description des sites

Les sites sont situés à l'intérieur de six principaux secteurs: le lac de la Belle-Rivière (trois sites), les Monts-Valin (quatre sites), la Réserve faunique des Laurentides (quatre sites), la Rivière Cyriac (deux sites), le Lac à La Carpe (trois sites) et Saint-Ludger de Milot (quatre sites) (Figure 1). Deux sous – domaines bioclimatiques, soit la sapinière à bouleau blanc de l'ouest et la sapinière à bouleau blanc de l'est, touchent principalement ces sites (Figure 1). La partie « ouest », comprenant 11 sites éclaircis (5 EPC; 6 EC) dont un site témoin (Saint-Ludger de Milot), est plutôt continentale, au relief peu accidenté et les dénivellations peu importantes avec une abondance d'essences de lumière. Quant à la partie « est », comprenant 9 sites éclaircis (5 EPC; 4 EC) dont trois

sites témoins (Monts-Valin; Rivière Cyriac; Réserve faunique des Laurentides) est plutôt maritime et les précipitations plus abondantes (MRNFP 2003b). Les températures et les précipitations annuelles ont été calculées d'après une moyenne des normales climatiques entre 1971 et 1990 à l'aide des stations météorologiques à proximité des secteurs nord et des secteurs sud de l'aire d'étude (Environnement Canada 2006). L'ordre des variations est peu important entre le nord et le sud du Saguenay – Lac-Saint-Jean et est en moyenne de 1,8°C et les précipitations, de 970,9 mm.

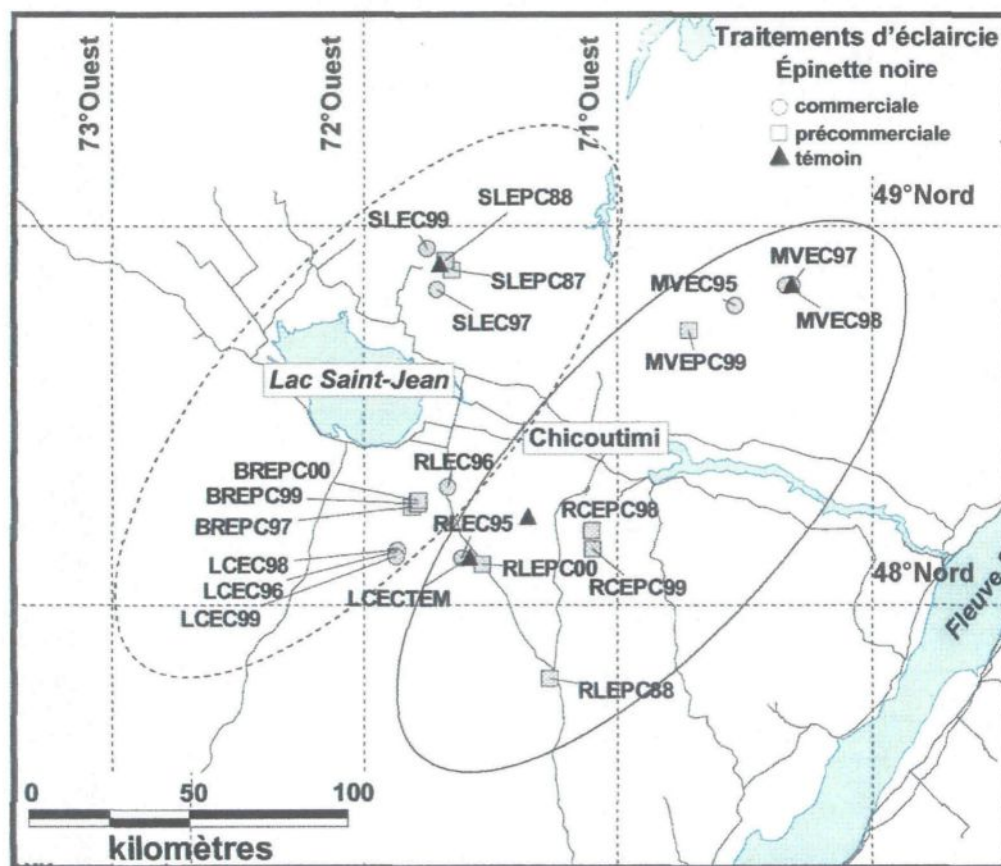


Figure 1. Localisation des peuplements traités à l'EPC (carrés), à l'EC (cercles) et des peuplements témoins (triangles pleins) dans la région du Saguenay-lac-St-Jean. L'ellipse pointillée délimite les sites compris dans le sous-domaine bioclimatique de la sapinière à bouleau blanc de l'ouest et l'ellipse pleine, le sous-domaine bioclimatique de la sapinière à bouleau blanc de l'est (d'après MapInfo Corporation 2003).

Les peuplements régénérés naturellement sont issus d'un feu ou d'une coupe. Leur structure était soit monospécifique, reflétant l'aspect typique des pessières noires, ou mélangée où apparaissaient des essences feuillues codominantes telles que le peuplier faux-tremble (*Populus tremuloides* Michx) et le bouleau à papier (*Betula papyrifera* Marsh) (Tableau 1). Le sapin baumier (*Abies balsamea* (L.) Mill.) était une espèce à la fois émergente de la strate arborescente et une espèce de sous-bois de la strate arbustive. La strate arbustive était dominée principalement par des éricacées (*Ledum groenlandicum* Oeder, *Kalmia angustifolia* L., *Chiogene hispidula* (L.) T. & G., *Vaccinium oxycoccos* L.) et de quelques espèces ligneuses de sous-bois (*Acer spicatum* Lam., *Ribes glandulosum* Grauer et *Diervilla lonicera* Mill.). Quant à la strate herbacée, elle est constituée principalement de *Cornus canadensis* L. et d'*Aralia nudicaulis* L. et la strate mucinale, de *Pleurozium schreberi* (Brid.) Mitt. et de *Sphagnum* sp. La diversité des espèces entre les sites est comparable mais la différence réside davantage au niveau de la surface de recouvrement de chacune d'elles (Tableau 1).

Les sites présentent un drainage généralement bon mais peut être mauvais sur une partie du peuplement dépendamment de la topographie du milieu et des caractéristiques des sols (Tableau 1). Certains sites présentent un sol de type organique (humique) ou mésique (podzol) ou les deux à la fois. Des traces du traitement sont perceptibles sur tous les sites d'après les tiges éclaircies au sol, la présence de souche et les sentiers de débardage (Tableau 1).

Tableau 1. Caractéristiques de la végétation et du sol des peuplements EPC et EC.

No	Site	Sp. compagnes	Drainage	Sol	Pente	Remarques
Éclaircies précommerciales						
1	BR00	Présence modérée	bon	mésique	0-2%	alternance MO et MF, SAB adulte et semis
2	BR97	Présence modérée	moyen	organique et mésique	5-10%	échantillonnage dans une pente
3	BR99	Présence faible	moyen - mauvais	organique et mésique	0-2%	échantillonnage dans une pente légère, nombreuses souches, éclaircie égale
4	MV99	Présence faible	moyen	mésique	0-2%	Débris ligneux et souches nombreuses
5	RC98	Présence modérée	moyen	organique	5-10%	site en MO, éclaircie plus prononcée dans la pente
6	RC99	Présence forte	bon	mésique	5-20%	éclaircie en deux paliers, présence EPN adulte et SAB, PET autour du site
7	RL00	Présence faible	moyen	organique	0%	site très accidenté, SAB = 1% du couvert, strate arbustive = 45cm
8	RL88	Présence faible	bon	organique	0%	dense en EPN, MO à certains endroits
9	SL87	Présence faible	moyen	organique	0-2%	MO près de la moitié du transect
10	SL88	Présence modérée	bon	organique	0-2%	zones en MO et zones arbustives importantes
Éclaircie commerciales						
11	LC96	Présence forte	bon	mésique	0-2%	régénération de PET
12	LC98	Présence faible	moyen - mauvais	mésique	0%	présence PET matures et drageons
13	LC99	Présence modérée	moyen	N/D	0-2%	régénération de SAB, PET mature
14	MV95	Absent	bon	mésique	0%	sous-bois de SAB, éclaircie propre
15	MV97	Présence faible	moyen	N/D	2-5%	nombreux débris
16	MV98	Présence modérée	N/D	N/D	5-10%	nombreux débris
17	RL95	Présence forte	moyen	organique et mésique	0-2%	incursion importante de feuillus en bande
18	RL96	Présence modérée	bon	organique	5-10%	nombreux débris au diamètre important, régénération de SAB
19	SL97	Présence modérée	bon	organique	2-10%	parcours en amonts rocheux et en pente faible, relief variable
20	SL99	Présence modérée	bon	organique	2-5%	BOP matures et morts, régénération de SAB

NB : Acronymes des sites : BR## = Lac de la Belle Rivière, MV## = Mont-Valin, RC## = Rivière Cyriac, RL## = Réserve faunique des Laurentides, SL## = Saint-Ludger de Milot et LC## = Lac à La Carpe, où ## donne l'année du traitement. Abréviations : MO = milieu ouvert, MF = milieu fermé, N/D = indéterminé, les codes d'essence (MRN 1994): EPN; *Picea mariana*, SAB; *Abies balsamea*, MEL; *Larix laricina*, BOP; *Betula papyrifera*, PET; *Populus tremuloides*.

Mesures et échantillonnage

Le nombre d'arbres à récolter pour représenter le peuplement a été déterminé par le biais d'un pré-échantillonnage sur le site MV95 qui était de 74 individus. La taille des échantillons a été déterminée d'après une distribution de la Loi normale (intervalle de confiance à 95%). Ce procédé a été nécessaire afin d'établir le nombre d'individus permettant d'exprimer la croissance générale du site. En moyenne, trente-cinq arbres par site éclairci ont été échantillonnés aléatoirement à l'intérieur d'un parcours de transect (Tableau 2). La hauteur totale et le diamètre à 1,3 m ont été mesurés sur chaque individu (Tableau 2). Lors de l'analyse des échantillons au laboratoire, certains arbres ont été éliminés dû que certains échantillons étaient détériorés ou contenaient du bois de réaction rendant la lecture des cernes difficile.

De chaque arbre a été prélevé un cylindre de bois à environ 0,3 mètres au-dessus du sol, direction ouest, à l'aide d'une sonde de Pressler de 5 mm. La sonde devait traverser tout le diamètre de l'arbre (écorce – moëlle – écorce). Cet échantillon complet a permis d'évaluer d'une part, les propriétés mécaniques du bois et de l'autre, de faire l'analyse des cernes de croissance et des propriétés anatomiques du bois (Figure 2). Les échantillons ont été séchés avant d'être mesurés.

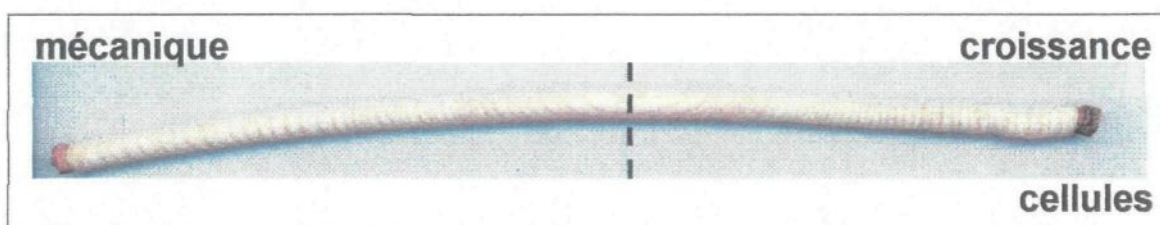


Figure 2. Séparation de l'échantillon pour effectuer les trois types de mesure soit les tests mécaniques, la croissance radiale et l'analyse cellulaire.

Tableau 2. Localisation des sites et caractéristiques des arbres traités à l'EPC et l'EC. L'écart-type est représenté entre parenthèses.

Número	Latitude (N)	Longitude (W)	Nombre d'arbre	Âge	Diamètre (cm)	Hauteur (m)
Éclaircies précommerciales						
1	48° 16' 46.2"	71° 47' 38.3"	32	6,9 (3,3)	5,4 (1,9)	4,0 (0,9)
2	48° 15' 44.0"	71° 49' 14.8"	36	4,6 (2,3)	7,1 (1,8)	5,0 (1,1)
3	48° 16' 09.1"	71° 47' 48.0"	33	7,9 (2,9)	5,2 (1,6)	4,0 (1,0)
4	48° 43' 36.1"	70° 43' 22.5"	35	15,9 (3,7)	6,3 (1,7)	4,0 (1,1)
5	48° 11' 52.6"	71° 06' 16.7"	31	6,6 (5,1)	4,4 (1,3)	4,0 (1,0)
6	48° 09' 00.6"	71° 06' 06.8"	33	6,9 (4,1)	4,6 (1,4)	4,0 (0,9)
7	48° 06' 39.0"	71° 32' 24.8"	35	8,5 (4,4)	5,9 (1,5)	4,5 (0,9)
8	47° 48' 29.5"	71° 16' 19.1"	34	12,3 (8,8)	6,0 (1,8)	4,5 (1,1)
9	48° 53' 11.6"	71° 39' 39.3"	35	20,4 (15,5)	7,3 (2,4)	6,0 (1,6)
10	48° 54' 40.7"	71° 41' 04.2"	35	20,2 (15,4)	9,2 (2,3)	8,0 (1,6)
Moyenne			35	11	6,1	4,8
Éclaircies commerciales						
11	48° 08' 36.7"	71° 52' 32.1"	34	55,7 (5,9)	19,5 (4,4)	16,5 (2,4)
12	48° 08' 51.7"	71° 52' 18.3"	31	59,4 (6,9)	16,0 (3,4)	15 (2,7)
13	48° 07' 50.0"	71° 52' 48.9"	30	58,2 (5,1)	17,3 (4,1)	16,5 (3,2)
14	48° 47' 37.2"	70° 32' 31.1"	74	63,8 (14,9)	15,7 (3,8)	11,5 (2,5)
15	48° 50' 52.5"	70° 19' 21.0"	40	63,2 (7,2)	11,6 (2,2)	10 (1,6)
16	48° 50' 45.4"	70° 20' 33.2"	37	63,2 (11,7)	12,0 (2,2)	11 (1,5)
17	48° 07' 35.2"	71° 37' 23.8"	35	56,0 (6,8)	17,7 (2,9)	15,5 (1,9)
18	48° 18' 53.8"	71° 40' 41.5"	30	57,2 (7,4)	16,3 (2,2)	15 (1,5)
19	48° 50' 07.8"	71° 43' 11.1"	33	57,1 (6,2)	15,3 (3,5)	15 (2,4)
20	48° 56' 35.7"	71° 45' 27.0"	25	58,4 (6,4)	20,3 (4,4)	18 (3,5)
Moyenne			37	59,2	16,2	14,4

Note : *Nombre d'arbres* = nombre correspond aux arbres qui ont été interdatés, *Diamètre* = moyenne du diamètre des arbres au dhp, *Âge* = âge moyen des peuplements au moment de l'éclaircie, *Hauteur* = moyenne de la hauteur totale du peuplement.

Analyse des échantillons

La figure 3 présente les trois types de mesure (1. Croissance, 2. Cellulaire et 3. Mécanique) effectués sur les échantillons de bois pour les EPC et les EC. Plusieurs paramètres d'analyse (e.g. test de cisaillement) ont été utilisés selon qu'ils représentaient le mieux la croissance des arbres ou la qualité du bois. Les données recueillies ont été standardisées puis traitées. Les sections suivantes les présentent en détails.

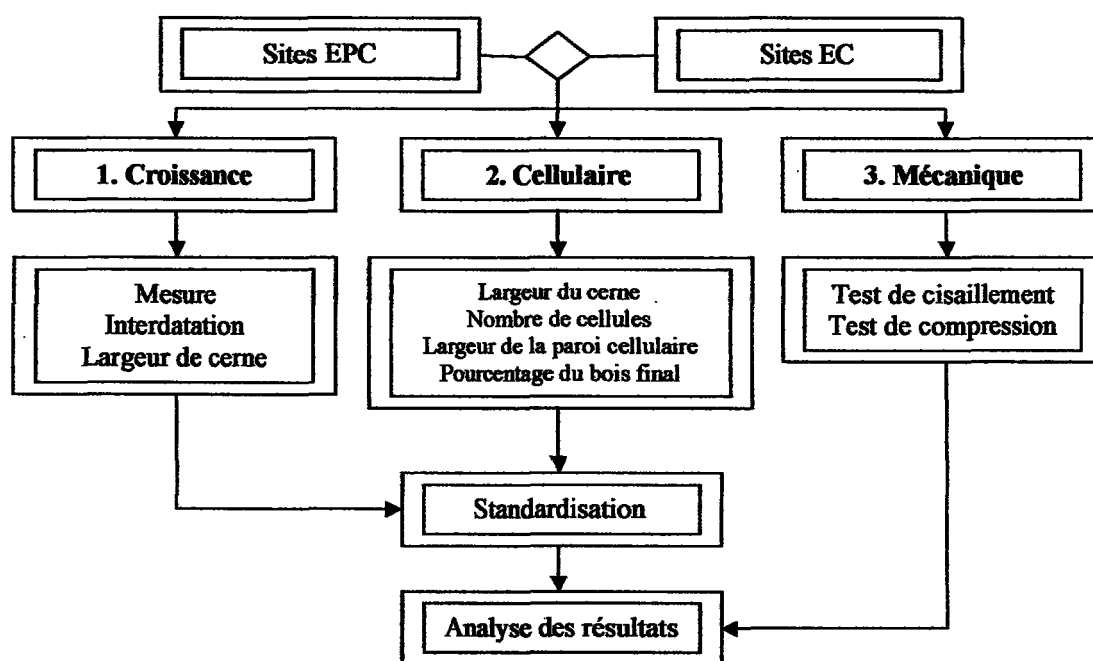


Figure 3. Organigramme représentant un résumé des trois types de mesures réalisés sur les échantillons de bois.

1. Croissance

Les échantillons ont été découpés transversalement avec une lame pour observer les cernes de croissance. Chaque cerne a été par la suite mesuré sur un rayon par un appareil de détection semi-automatique, le WindendroTM (Guay et al. 1992). Le micromètre optique de marque Henson (précision de 0,01 mm) a été utilisé lors de lectures difficiles. Les mesures ont été interdatées visuellement et vérifiées à l'aide du programme statistique Cofecha (Holmes 1983) afin de déceler les cernes manquants ou tout autre problème dans les mesures (Stokes et Smiley 1968).

Ensuite, une standardisation simple a été utilisée afin de comparer les individus entre eux malgré qu'ils soient d'âge ou de provenance différents. De plus, elle permet d'atténuer l'impact de facteurs externes sur la croissance (Levasseur 2000). Cette standardisation a été appliquée sur chaque série de mesure de largeur de cerne par individu avant de calculer une chronologie indexée par site selon la formule suivante :

$$\text{Largeur indicée du cerne de croissance} = \frac{\text{Largeur de cerne}}{\text{Moyenne de la série de mesure}}$$

Formule 1 : Équation de la largeur indicée du cerne de croissance

Rapport-gratuit.com 
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

La croissance des arbres a été évaluée de trois façons. La première consiste à comparer l'accroissement radial avant et après l'année du traitement. Pour les arbres traités à l'EPC, une moyenne des quatre années avant éclaircie a été comparée aux années suivantes alors que cette moyenne s'élève à dix années avant traitement pour l'EC (Figure 4A). Cette différence dans le nombre d'années analysées avant traitement pour les deux éclaircies est expliquée par le nombre inférieur de cernes avant traitement des arbres jeunes des EPC. La seconde manière a été de comparer la croissance des arbres soumis à une EC à celle des arbres témoins avant et après l'année de l'éclaircie (Figure 4B).

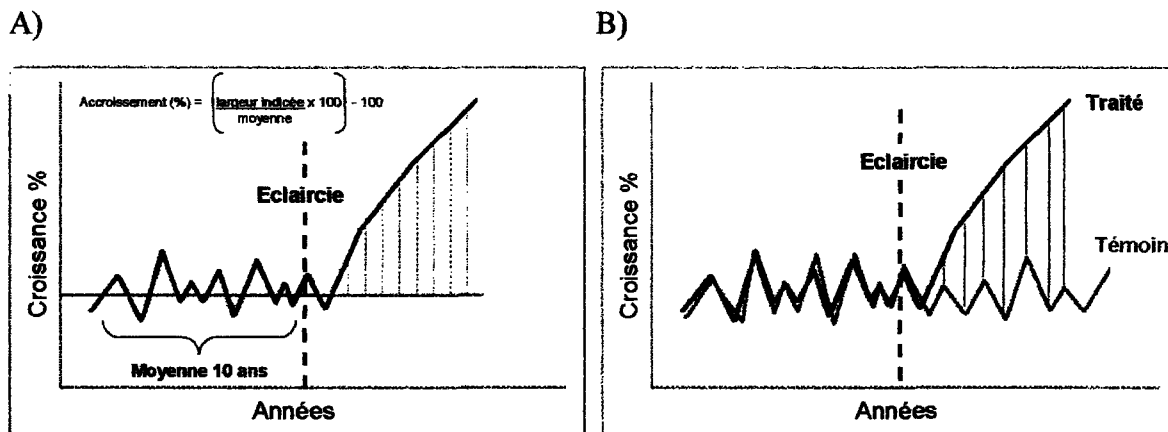


Figure 4. L'effet de l'EPC et de l'EC est comparé avant et après l'année du traitement au moyen de A) l'accroissement radial et B) la croissance d'un témoin pour les EC seulement.

Finalement, chaque arbre a été distribué dans des classes de croissance, ou de réaction, selon leur accroissement radial après traitement. Cette analyse a permis de vérifier si la réponse des individus à l'éclaircie différait pour chacun. Un pourcentage a été calculé en fonction de l'accroissement radial des années précédant l'éclaircie. Les classes de croissance pour l'EPC et l'EC sont distinctes car l'âge des individus et leur taux de croissance diffèrent pour chaque traitement:

pour l'EPC;

classe < 0%,	<i>indique une diminution de la croissance radiale;</i>
classe 1 – 49%,	<i>indique une légère augmentation de la croissance radiale;</i>
classe 50 – 99%,	<i>indique une augmentation modérée de la croissance radiale;</i>
classe > 100%,	<i>indique une augmentation forte de la croissance radiale.</i>

pour l'EC;

classe < -20%,	<i>indique une diminution importante de la croissance radiale;</i>
classe -20 – 0%,	<i>indique une diminution faible de la croissance radiale;</i>
classe 1 – 19%,	<i>indique une légère augmentation de la croissance radiale;</i>
classe > 20%,	<i>indique une augmentation significative de la croissance radiale.</i>

2. Analyses cellulaires

2.1 Mesures

Suivant les analyses des cernes de croissance, dix arbres par site ont été désignés aléatoirement pour les analyses anatomiques des cernes de croissance. Les échantillons ont été fixés dans un bloc de paraffine pour obtenir des coupes minces d'environ 15 μm au microtome. Les coupes ont ensuite été fixées sur une lame et ensuite colorées à la safranine produisant des parois lignifiées de couleur rouge. La procédure de coloration est décrite en détails par Deslauriers (1999).

Trois cernes avant et trois cernes après éclaircie ont été analysés, ce qui donne un total de six cernes à analyser par individu (Figure 5). Pour les EPC, les trois années directement avant éclaircie et les trois directement formées après éclaircie ont été analysées. Pour les EPC, une seule file radiale a été mesurée sur chaque cerne qui est justifiée par un temps d'analyse limité et la longueur importante des files radiales. Pour les EC, trois files radiales par cerne ont été mesurées car elles sont plus courtes que celles des EPC. Toutefois pour les arbres traités à l'EC, l'analyse a débuté au troisième cerne après l'année de l'éclaircie, en relation à une augmentation significative de la croissance radiale détectée seulement à partir de la 3^e année après le traitement. Des photos ont été prises au moyen d'une caméra numérique montée sur un microscope optique et ensuite analysées au moyen du logiciel Wincell™ de Régent Instrument. L'analyse est basée sur les couleurs et les contrastes entre le lumen et les parois cellulaires (Alteyrac 2005). Dans le bois initial et le bois final, la largeur du cerne (μm), le nombre de cellule et l'épaisseur tangentielle de la paroi cellulaire (μm) ont été retenus pour les fins de cette étude.

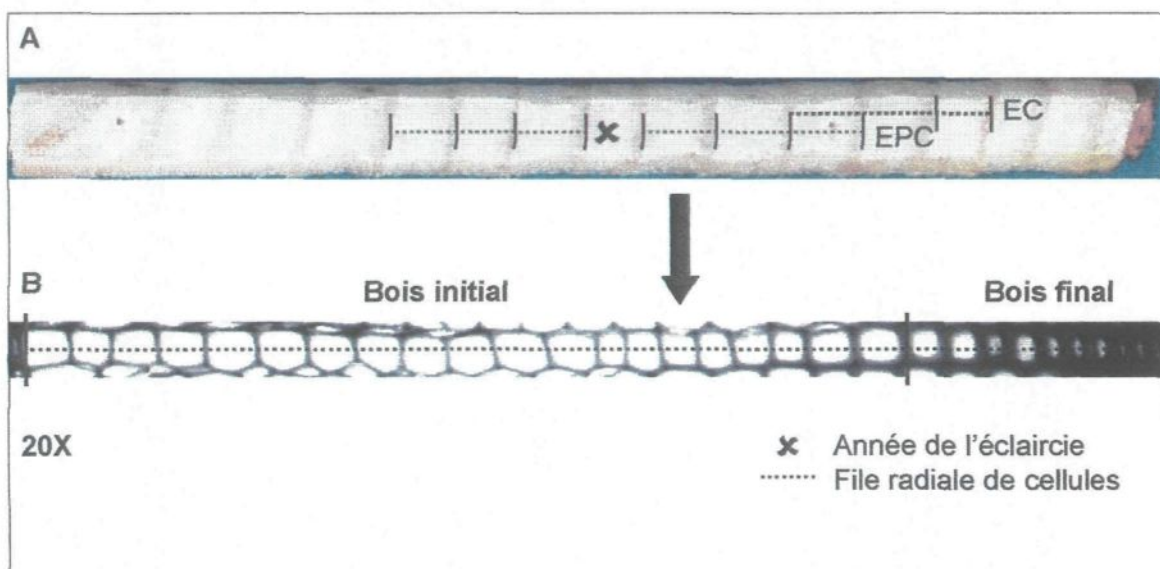


Figure 5. A- Identification des six files radiales de cellules pour chaque éclaircie (EPC et EC) soumis aux analyses anatomiques dont trois cerne avant et trois cerne après éclaircie. Le cerne de l'éclaircie (x) est exclu des analyses. B- La largeur du bois initial et du bois final, le nombre de cellules et l'épaisseur tangentielle de la paroi cellulaire ont été mesurés sur chaque file radiale de cellules.

Les files radiales ont ensuite été subdivisées en bois initial et en bois final. La différenciation entre le bois initial et le bois final est basée sur l'épaisseur radiale de la paroi des trachéides (Denne 1989; Mork 1928). Cette transition a été définie au moment où l'épaisseur de la paroi commune à deux trachéides est supérieure à la moitié de la largeur du lumen (Alteyrac 2005). La proportion du bois final a été déterminée à l'aide du rapport de la largeur du bois final sur la largeur totale du cerne (Filion et Cournoyer 1995) (Formule 2).

$$\% \text{ BF} = \frac{\text{Largeur BF} \times 100}{\text{Largeur totale du cerne}}$$

Formule 2. Équation du calcul des proportions tirée de Filion et Cournoyer 1995.

2.2 Standardisation

La standardisation des mesures a été réalisée à l'aide de la méthode du trachéidogramme (Vaganov 1990). Il s'agit de replacer les mesures sur un même dénominateur pour ainsi permettre leur comparaison et alors calculer des moyennes entre les mesures issues d'arbres différents (Deslauriers 1999). La standardisation s'applique seulement aux EC qui ont trois files radiales comparativement aux EPC qui n'en ont qu'une seule. À titre d'exemple, voici trois files radiales avec un nombre de cellules différent :

File 1 : 40 cellules

File 2 : 35 cellules

File 3 : 38 cellules

La procédure consiste à ajuster les trois files radiales en effectuant une moyenne du nombre de cellules. Dans ce cas-ci, cette moyenne est de 38 cellules $((40+35+38)/3)$. Chaque file radiale devra être ajustée à cette moyenne. Pour la file 1, deux cellules devront être retirées car elle contient un nombre supérieur à la moyenne. Pour savoir lesquelles, les cellules sont retirées (ou ajoutées) à distance égale. Pour retirer deux cellules, la file radiale est divisée en trois ($40/3 = 13$) et les cellules 13^e et 26^e sont retirées. Pour la file 2, le nombre de cellule est inférieur à la moyenne donc, trois cellules devront être ajoutées soit à la 9^e, 18^e et 27^e cellule. La file radiale a donc été divisée en quatre ($35/4 = 9$). Les trois nouvelles cellules insérées dans la file radiale sont identiques aux cellules des positions précédemment énumérées (9^e, 18^e et 27^e cellule). La file 3 reste inchangée car elle représente la moyenne.

3. Tests mécaniques

Chaque échantillon a d'abord été immergé dans l'eau pour une durée de 24 heures dans le réfrigérateur afin d'obtenir une humidité relative de 100% (Götz et Mattheck 1999). Au total, quatre échantillons de cinq millimètres par individu ont été découpés soient deux avant éclaircie et deux après éclaircie (Figure 6). Deux échantillons ont été utilisés pour des tests de cisaillement radial (FCR) et deux autres pour des tests de compression axiale (FCA). L'effet engendré par le cisaillement apporte un détachement des cellules (Figure 7 B) tandis que la compression provoque l'écrasement des trachéides du bois (Figure 7 C). L'outil de mesure utilisé est le Fractomètre III de Götz et Mattheck 1999 (Figure 7 A). L'avantage de cet instrument est qu'il effectue des mesures sur de petites surfaces. Ce faisant, la résistance mécanique est évaluée dans une zone précise de un à quelques cernes de croissance ce qui permet de cibler des années précises avant et après traitement (Figure 7). Cet outil manuel apporte une contrainte graduelle sur l'échantillon jusqu'à sa rupture ou à son écrasement complet (Figure 7).

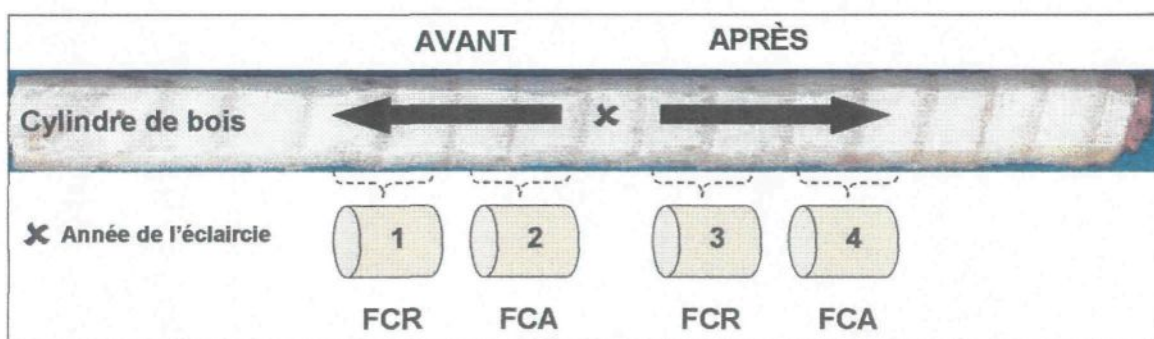


Figure 6. Cylindre de bois où sont prélevés quatre échantillons (1, 2, 3 et 4) de 5 mm de part et d'autre de l'année de l'éclaircie pour les tests de cisaillement radial (FCR) et de compression axiale (FCA).

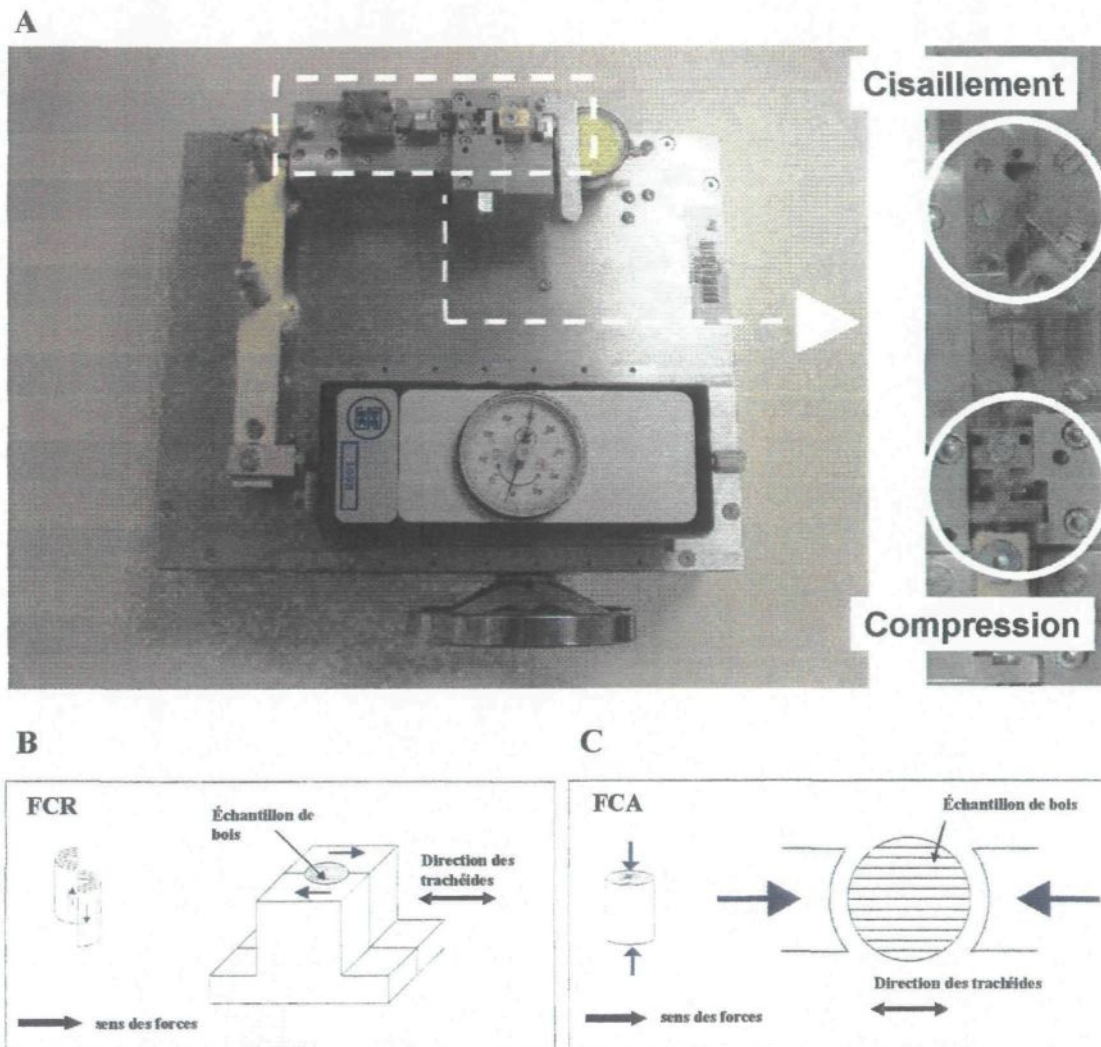


Figure 7. A- Le Fractomètre III (Götz et Mattheck 1999) avec les charges pour le cisaillement (FCR) et la compression (FCA). B- Contrainte appliquée en cisaillement radial. C- Contrainte appliquée en compression axiale. Pour les deux contraintes, la force appliquée est mesurée en Newton (N) et est apposée dans le sens longitudinal des trachéides (Götz et Mattheck 1999).

Analyse statistiques

Les analyses statistiques ont été réalisées avec le logiciel JMP IN, version 5.1 (SAS Institute Inc. 2003) et le logiciel STATVIEW, version 5.0 (SAS Institute Inc. 1992-1998). Un seuil de signification α de 0,05 a été utilisé pour toutes les analyses statistiques. Les données respectaient les critères d'indépendance, d'homoscédasticité et de normalité.

Croissance radiale :

Un test de variance à mesures répétées (MANOVA) a été utilisé afin de comparer l'évolution de l'accroissement radial les 10 années avant et les 6 années après traitement pour les sites EC et les sites témoins indépendamment. Une année repère a été déterminée pour chaque site témoin en calculant une moyenne des années d'éclaircie de site provenant du même secteur. Par exemple, si trois sites provenant du secteur des Monts-Valin ont comme année de traitement l'année 1995, 1996 et 1997, l'année repère déterminé pour le témoin de ce secteur est l'année moyenne de 1996. Le site témoin a donc été comparé simultanément avec les trois sites éclaircies.

Une analyse de variance univariée a été réalisée afin de vérifier si l'accroissement radial des tiges des sites éclaircies et des sites témoins était significativement différent à certaines années. La probabilité de Huynh-Feldt (PH-F) et celle de Greenhouse-Geiser (PG-G), plus conservatrice (Scheiner et Gurevitch 1993), ont été retenues pour l'analyse et permettaient de vérifier les différences significatives.

Analyses anatomiques

Un test de variance à un facteur, ANOVA, a été utilisé pour détecter un changement entre les trois années avant et les trois années (3^e, 4^e et 5^e année pour les EC) après le cerne du traitement dans le bois initial et le bois final indépendamment. Une moyenne annuelle par site a été calculée pour chaque paramètre anatomique analysé. Les différences significatives entre les moyennes ont été détectées par le test de Student-Newman-Keuls.

Analyses mécaniques

Un test de t pour échantillon apparié qui respecte la loi de student inverse a été utilisé pour déterminer une diminution des forces de rupture après l'éclaircie. Deux tests par éclaircie ont été réalisés sur l'ensemble des arbres traités et, indépendamment, pour les arbres de chaque site. Ces analyses ont eu pour but non seulement d'évaluer la diminution des forces de rupture après l'éclaircie mais aussi de démontrer la variabilité qui existe entre les arbres et les sites.

RÉSULTATS

Analyse des cernes de croissance

Effet de l'EPC sur la croissance radiale;

Un changement de la croissance radiale relatif à l'EPC a été détecté. Mais l'absence de témoins nous limite dans l'interprétation de ces résultats. Deux groupes d'âge différencient les arbres des sites EPC. Le premier groupe correspond aux arbres jeunes traités en moyenne à 11 ans comprenant 7 sites (BR97, BR99, BR00, MV99, RC98, RC99 et RL00) (Figure 8 A) et le second groupe, aux arbres plus âgés traités en moyenne à 20 ans comprenant 3 sites (RL88, SL87 et SL88) (Figure 8 B).

Pour les arbres plus jeunes, une augmentation de la croissance radiale est détectée visuellement deux années avant jusqu'à la deuxième année après le cerne de l'éclaircie (Figure 8 a). À la cinquième et à la sixième année après l'EPC, des écarts plus importants de la croissance radiale sont observés ainsi qu'une diminution du nombre d'arbres traités (Figure 8 A). La variabilité augmente annuellement après l'EPC (erreur-type) et est reliée à la réponse des arbres au traitement (Figure 8 A).

Pour les arbres plus âgés, la croissance radiale est la plus élevée entre la troisième et la cinquième année après l'EPC (Figure 8 B). À la suite de ces années, la croissance radiale diminue sans, toutefois, être inférieure aux années précédant le traitement et fluctue autour d'une valeur moyenne de 66% (Figure 8 B). Comme pour les arbres plus jeunes, la croissance radiale des plus âgés varie après l'EPC selon la réponse de chaque individu au traitement (Figure 8 B).

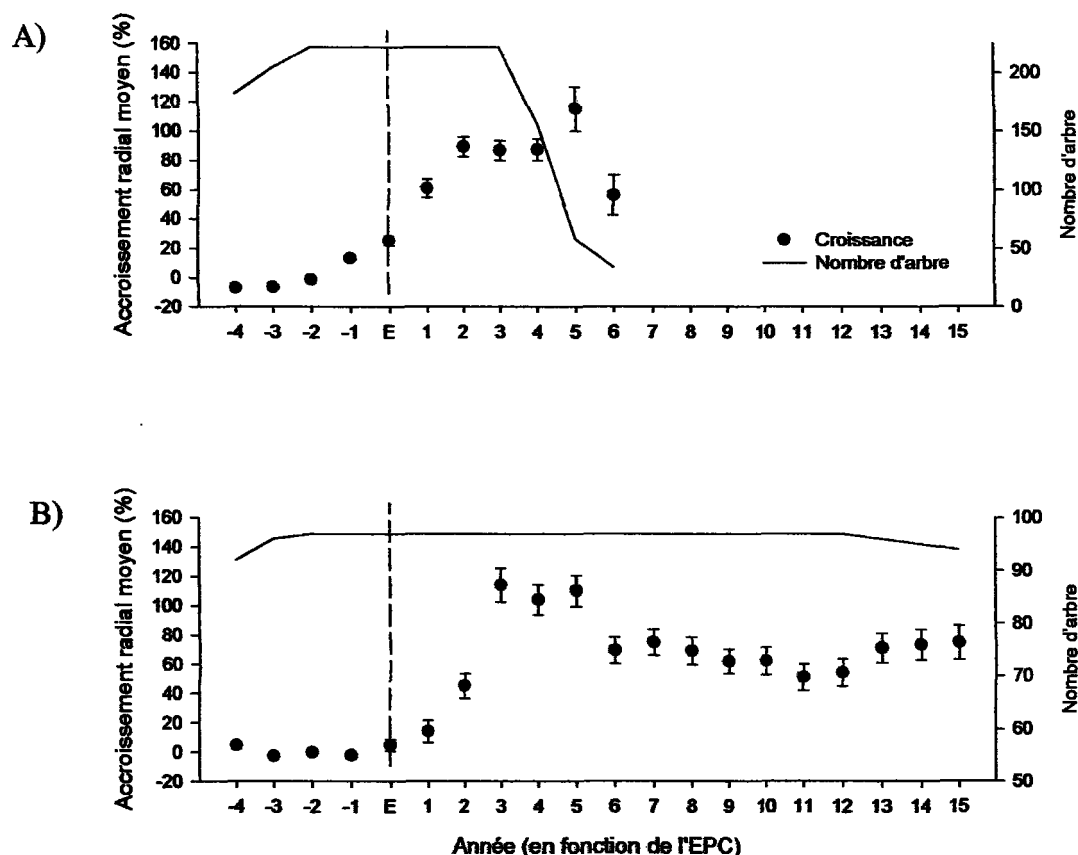


Figure 8. Accroissement radial moyen (ronds pleins, ordonnée de gauche) et nombre d'arbre traité (ronds vides, ordonnée de droite) en fonction des années avant et après l'année de l'éclaircie précommerciale (E) A) des arbres plus jeunes de sept sites EPC et B) des arbres plus âgés de trois sites EPC. L'erreur-type de la moyenne est représentée par des barres horizontales.

Effet de l'EC sur la croissance radiale;

Les résultats des analyses de variance ont révélé qu'il n'y a pas de différence significative entre la croissance des 10 sites EC et des quatre sites témoins les années précédant le traitement EC ($P = 0,8713$, Tableau 3). Toutefois, la croissance des sites traités et témoins diffère après l'année de référence en raison de l'augmentation de la croissance radiale des sites traités suite à l'EC ($P = 0,0123$, Tableau 3, Figure 9). Cette augmentation, qui est de 52%, s'avère significative seulement à partir de la troisième année et se poursuit annuellement jusqu'à la sixième année pour atteindre 76% (Figure 9). Durant cette période après l'EC, la croissance radiale augmente et varie annuellement entre les sites traités ce qui est reliée à la réponse individuelle des arbres au traitement

(Figure 9). Pour les sites témoins, la croissance radiale varie dans le temps mais n'excède pas celle des sites traités (Figure 9).

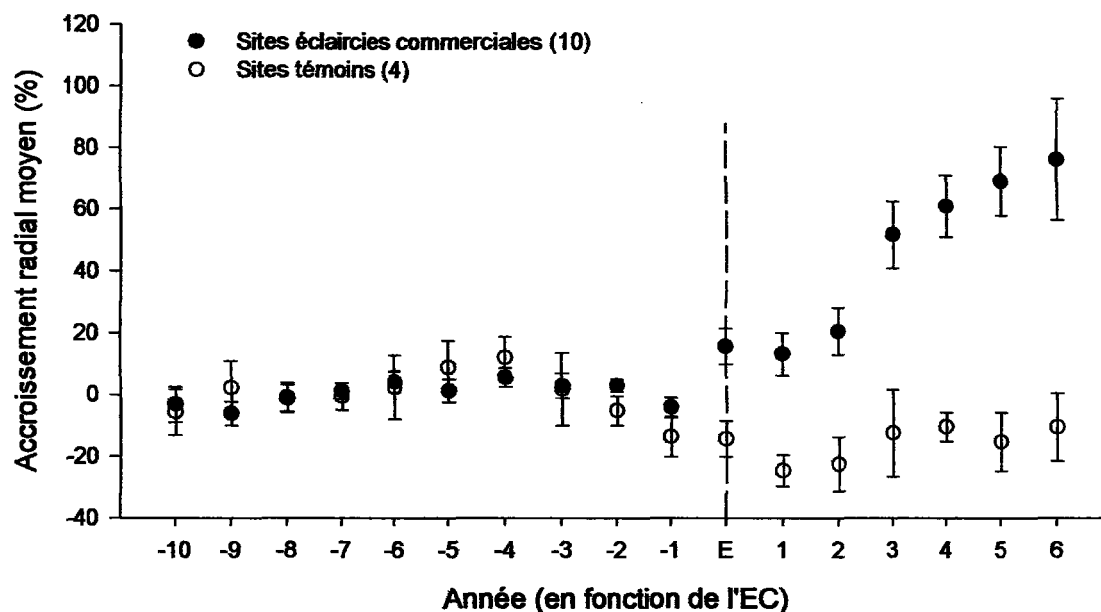


Figure 9. Accroissement radial moyen (%) en fonction des années avant et après l'année de l'éclaircie commerciale (E) des dix sites traités à l'EC et des quatre sites témoins.

Tableau 3. Résultats de l'analyse de variance à mesures répétées (MANOVA, $\alpha = 0,05$) de l'accroissement radial (%) selon l'intervention (traités et témoins) avant et après traitement EC.

Source	ddl	Valeur	F	$P > F$	PG-G	PH-F
Avant traitement						
<i>Intergroupe</i>						
Intervention	1	0,0460443	0,3684	0,5607		
<i>Intragroupe</i>						
Temps	9	1	1,2642	0,2713	0,3080	0,2884
Temps x intervention	9	1	0,4978	0,8713	0,7018	0,8190
Après traitement						
<i>Intergroupe</i>						
Intervention	1	1,9469957	15,5760	0,0043		
<i>Intragroupe</i>						
Temps	5	1	7,2165	<,0001	0,0063	0,0015
Temps x intervention	5	1	3,3748	0,0123	0,0616	0,0370

Note : ddl; degré de liberté, $P > F$; probabilité selon Fisher, PG-G; probabilité selon Greenhouse-Geisser et H-F; probabilité selon Huynh-Feldt.

Classes de croissance :

Les arbres traités par les éclaircies expriment une réponse individuelle différente au traitement. L'effet engendré par les éclaircies (EPC et EC) est donc hétérogène et la reprise de la croissance radiale dans les sites et entre les sites varie de façon importante (Figure 10). Pour les 10 sites EPC, 17% des arbres ont en moyenne diminué leur croissance radiale suite à l'EPC ($<0\%$, Figure 10), 63%, une augmentation légère à modérée (1- 49% et 50 - 99%, Figure 10) et 19%, une forte augmentation de leur croissance radiale ($>100\%$, Figure 10). Pour les 10 sites EC, 38% des arbres ont en moyenne diminué leur croissance radiale suite à l'EC ($<-20\%$ et $-20\% - 0\%$, Figure 10), 14%, une augmentation légère (1-19%, Figure 10) et 48%, une augmentation importante de leur croissance radiale ($>20\%$, Figure 10).

Pour les arbres dont l'éclaircie engendre une diminution de la croissance radiale, elle est plus importante chez les EC que pour les EPC (Figure 10). À l'inverse, pour les arbres dont l'éclaircie engendre une augmentation de la croissance radiale, elle est plus importante chez les EPC que pour les EC (Figure 10). De plus, la variabilité observée à l'intérieur des sites et entre les sites relative à la réponse des arbres à l'éclaircie, est plus importante chez les EPC que pour les EC (Figure 10).

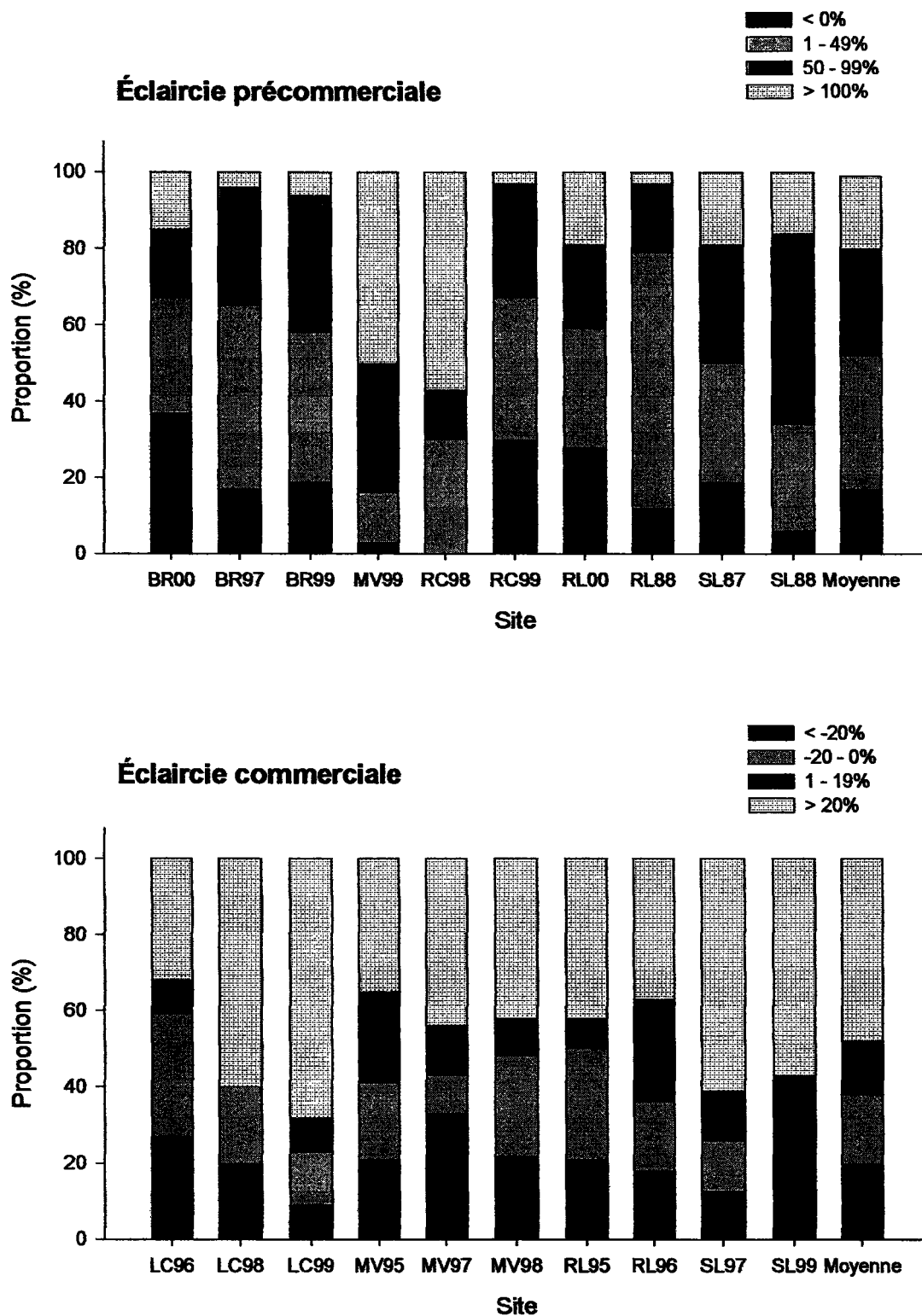


Figure 10. Accroissement radial moyen des arbres suite à l'éclaircie distribué à l'intérieur de quatre classes de croissance pour les 10 sites EPC et les 10 sites EC.

Analyses cellulaires

Analyses anatomiques des sites EPC :

Les résultats des analyses de variance des sites EPC montrent une augmentation significative de la largeur du bois initial après éclaircie pour l'ensemble des sites ($P=0,0163$, Tableau 4). La largeur moyenne du bois initial mesurée est de $1600\mu\text{m}$ à $1800\mu\text{m}$ les trois années avant l'EPC et augmente à $2400\mu\text{m}$ à $2900\mu\text{m}$ les trois années après l'EPC (Figure 11A). Le nombre de cellule dans le bois initial semble augmenter avec la largeur du bois initial mais la valeur de probabilité excède le seuil significatif qui a été préalablement fixé ($P=0,0841$, Tableau 4, Figure 11B). Toutefois, la largeur du bois initial et le nombre de cellule dans le bois initial présentent des variations annuelles plus importantes après l'EPC (Figure 11A et B). Pour l'épaisseur des parois cellulaires dans le bois initial qui est en moyenne de $2,4\mu\text{m}$, l'analyse de variance ne détecte pas de différence significative ($P= 0,8603$, Tableau 4, Figure 11C).

Le bois final ne présente pas de changements significatifs dans la largeur du cerne ($P= 0,9724$, moyenne; $285\mu\text{m}$, Tableau 4, Figure 11A), le nombre de cellule ($P= 0,9916$, moyenne; 16 cellules, Tableau 4, Figure 11B) et l'épaisseur de la paroi cellulaire ($P= 0,9663$, moyenne; $3,6\mu\text{m}$, Tableau 4, Figure 11C). La proportion de bois final dans le cerne, d'après le nombre de cellule du bois final, semble diminuer après l'EPC relativement à une augmentation du bois initial mais n'est pas significatif ($P= 0,0587$, Tableau 4, Figure 11D).

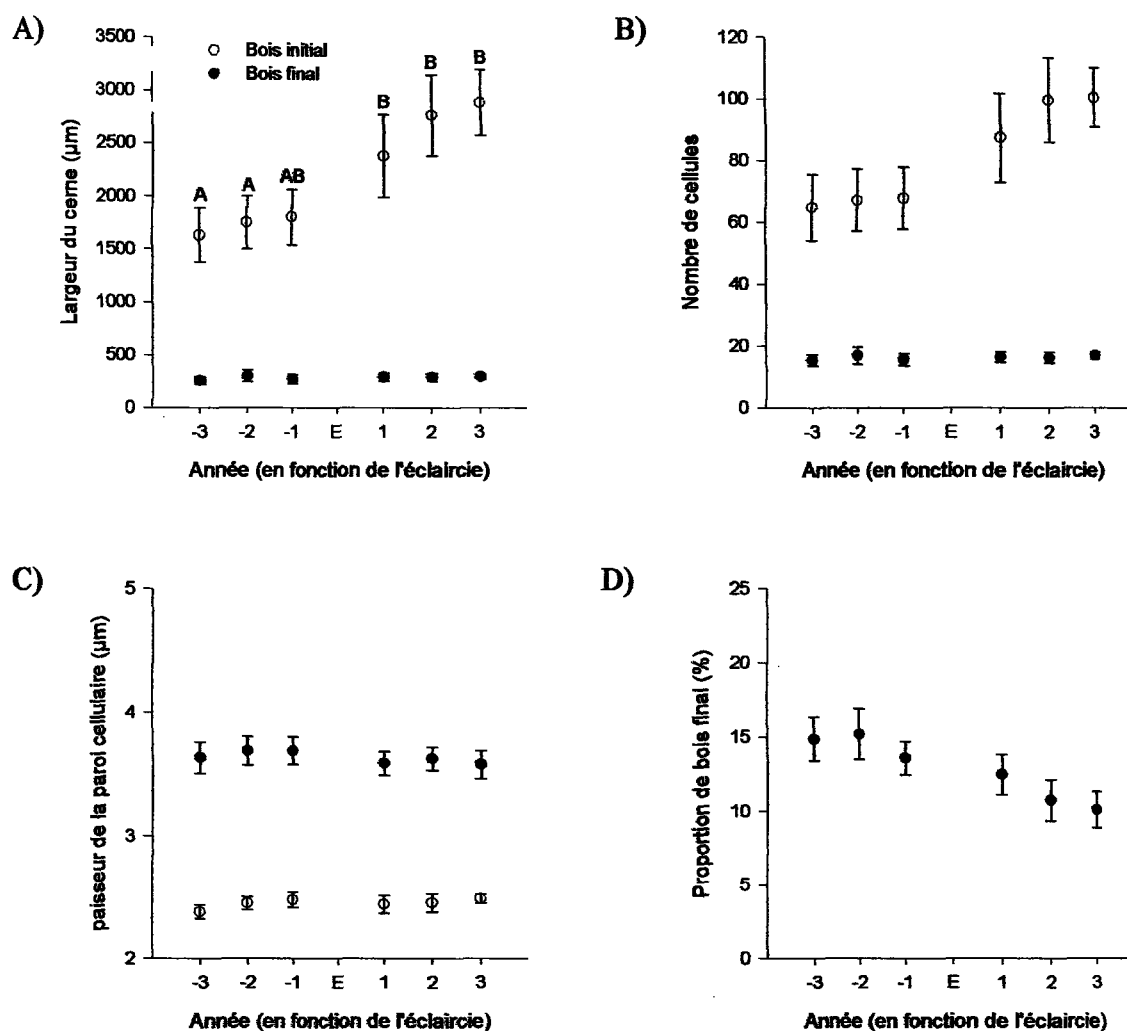


Figure 11. Comparaison des paramètres cellulaires dans le bois initial et le bois final des 10 sites EPC pour les trois années avant et les trois années après éclaircie (E). A) largeur du cerne (μm), B) le nombre de cellule, C) l'épaisseur de la paroi cellulaire (μm) et D) proportion de bois final (%). Le niveau de significativité entre les moyennes a été détecté par le test *a posteriori* de Student-Newman-Keuls.

Tableau 4. Résultats des analyses de variance à un facteur (ANOVA) pour les 10 sites EPC de la largeur du cerne, du nombre de cellules et de l'épaisseur de la paroi cellulaire dans le bois initial et le bois final.

Source	Degré de liberté	Moyenne des carrés	Valeur de F	Prob > F
Bois initial				
Largeur du cerne				
Temps	5	3000967	3,0737	0,0163
Erreur	54	976337		
Nombre de cellules				
Temps	5	2766,82	2,0646	0,0841
Erreur	54	1340,13		
Épaisseur des parois				
Temps	5	0,014264	0,3800	0,8603
Erreur	54	0,037538		
Bois final				
Largeur du cerne				
Temps	5	2731,3	0,1707	0,9724
Erreur	54	16002,5		
Nombre de cellules				
Temps	5	3,6314	0,1005	0,9916
Erreur	54	36,1321		
Épaisseur des parois				
Temps	5	0,023197	0,1870	0,9663
Erreur	54	0,124036		
Proportion de bois final				
Temps	5	44,5722	2,2868	0,0587
Erreur	54	19,4914		

Analyses anatomiques des sites EC :

Les résultats des analyses de variance des sites EC montrent une augmentation significative de la largeur du bois initial après éclaircie pour l'ensemble des sites ($P=0,0385$, Tableau 5). La largeur moyenne du bois initial diminue légèrement de 448 μm à 436 μm les trois années avant l'EC et augmente à 562 μm à 693 μm pour les années après l'EC (Figure 12A). Le nombre de cellule dans le bois initial augmente significativement et parallèlement à l'augmentation de la largeur du bois initial ($P= 0,0188$, Tableau 5). Le nombre de cellule avant éclaircie diminue légèrement de 14,1 à 13,8 cellules pour augmenter après éclaircie de 18,1 à 22,2 cellules (Figure 12B). De plus, la largeur du bois initial et le nombre de cellules dans le bois initial présentent des variations annuelles plus importantes après l'EC (Figure 12A et B). Pour l'épaisseur des parois cellulaires dans le bois initial qui est en moyenne de 2,8 μm , l'analyse de variance ne détecte pas de différence significative ($P= 0,5665$, Tableau 5, Figure 12C).

Le bois final ne présente pas de différences significatives de la largeur du cerne ($P= 0,1167$, moyenne; 192 μm , Tableau 5, Figure 12A), du nombre de cellule ($P= 0,0955$, moyenne; 10,2 cellules, Tableau 5, Figure 12B) et de l'épaisseur de la paroi cellulaire ($P = 0,3038$, moyenne; 4,4 μm , Tableau 5, Figure 12C). La proportion de bois final dans le cerne, d'après le nombre de cellule du bois final, ne présente pas de différence significative après l'EC même si quelques variations annuelles sont observées ($P=0,7758$, Tableau 5, Figure 12 D).

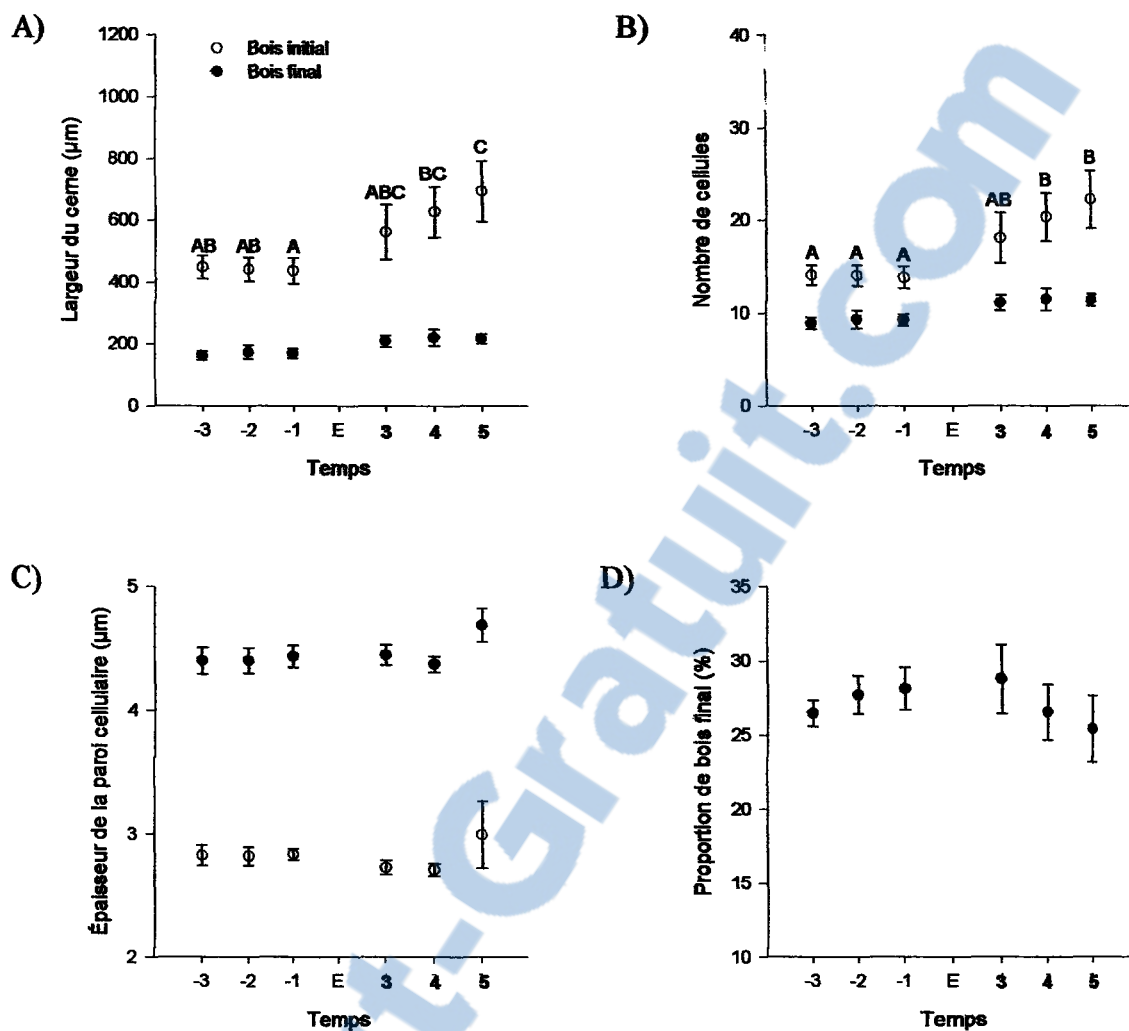


Figure 12. Comparaison des paramètres cellulaires dans le bois initial et le bois final des 10 sites EC pour les trois années avant et la troisième, quatrième et cinquième année après éclaircie (E). A) largeur du cerne (μm), B) le nombre de cellule, C) l'épaisseur de la paroi cellulaire (μm) et D) proportion de bois final (%). Le niveau de significativité entre les moyennes a été détecté par le test *a posteriori* de Student-Newman-Keuls.

Tableau 5. Résultats des analyses de variance à un facteur (ANOVA) pour les 10 sites EC de la largeur du cerne, du nombre de cellules et de l'épaisseur de la paroi cellulaire dans le bois initial et le bois final.

Source	Degré de liberté	Moyenne des carrés	Valeur de F	Prob > F
Bois initial				
Largeur du cerne				
Temps	5	110435	2,5540	0,0385
Erreur	52	43240		
Nombre de cellules				
Temps	5	122,851	2,9991	0,0188
Erreur	52	40,962		
Épaisseur des parois				
Temps	5	0,089362	0,7831	0,5665
Erreur	52	0,114108		
Bois final				
Largeur du cerne				
Temps	5	6801,70	1,8643	0,1167
Erreur	52	3648,45		
Nombre de cellules				
Temps	5	14,1406	1,9901	0,0955
Erreur	52	7,1055		
Épaisseur des parois				
Temps	5	0,112747	1,2405	0,3038
Erreur	52	0,090889		
Proportion de bois final				
Temps	5	14,1940	0,4987	0,7758
Erreur	52	28,4634		

Analyses mécaniques

Tests mécaniques des sites EPC :

Une moyenne des forces de rupture de l'ensemble des arbres testés a été calculée par site pour le test de cisaillement radial (FCR) et le test de compression axiale (FCA). Pour le test FCR, 7 sites sur 10 ont une diminution significative des forces de rupture de 2,4N à 6,2N après l'EPC (Tableau 6). Pour le test FCA, un nombre équivalent de sites ont une diminution significative des forces de rupture de 3,5N à 6,7N après l'EPC (Tableau 6).

Une analyse a été effectuée sur l'ensemble des individus sans tenir compte des sites en particulier (Figure 13). Les arbres ont en moyenne une diminution significative des forces de rupture après éclaircie de 2,7N pour le test FCR et de 4,2N pour le test de FCA. On constate que les valeurs de rupture sont très variables d'un individu à l'autre. Les forces de rupture peuvent varier de 2N à 37N avant et après EPC pour le cisaillement et de 13N à 62N avant et après EPC pour la compression (Figure 13).

Tableau 6. Résultats des tests de cisaillement radial (FCR) et de compression axiale (FCA) dont la moyenne avant et après EPC est représentée pour chaque site avec l'écart-type. Le test statistique utilisé est un test de t pour échantillons appariés ($\alpha = 0,05$).

Cisaillement radial

Site	ddl	Avant (N)	ET (N)	Après (N)	ET (N)	Écart (N)	Prob > F
BR97	29	22,4	4,9	16,2	2,7	6,2	0,0001
BR99	29	20,6	3,7	17,7	3,4	2,9	0,0005
BR00	28	18,1	4,4	15,7	4,1	2,4	0,0253
RC98	21	16,7	4,9	13,0	2,5	3,7	0,0010
RC99	26	15,9	4,2	13,2	3,4	2,7	0,0264
RL88	29	21,9	6,8	20,8	5,8	1,1	0,3704
RL00	31	18,4	4,5	15,0	3,0	3,4	0,0006
SL87	28	17,0	5,3	16,0	3,2	1,0	0,3416
SL88	30	20,8	5,2	17,9	3,4	2,9	0,0042
MV99	26	16,4	2,0	15,5	2,8	0,9	0,1264

Compression axiale

Site	ddl	Avant (N)	ET (N)	Après (N)	ET (N)	Écart (N)	
BR97	30	35,7	6,1	29,0	7,1	6,7	0,0002
BR99	30	33,3	7,1	28,0	6,3	5,3	0,0004
BR00	28	30,0	5,6	24,0	4,2	6,0	0,0001
RC98	20	28,5	7,0	25,0	5,4	3,5	0,0486
RC99	25	27,1	6,0	23,2	4,1	3,9	0,0003
RL88	27	36,0	9,1	30,1	7,3	5,9	0,0003
RL00	31	26,9	6,3	25,9	6,4	1,0	0,4077
SL87	26	35,0	12,5	30,3	5,1	4,7	0,0174
SL88	30	33,1	7,5	30,4	4,8	2,7	0,0502
MV99	27	29,3	6,6	27,3	5,2	2,0	0,0994

Note : ET; écart-type, Écart; différence entre les valeurs avant et après éclaircie.

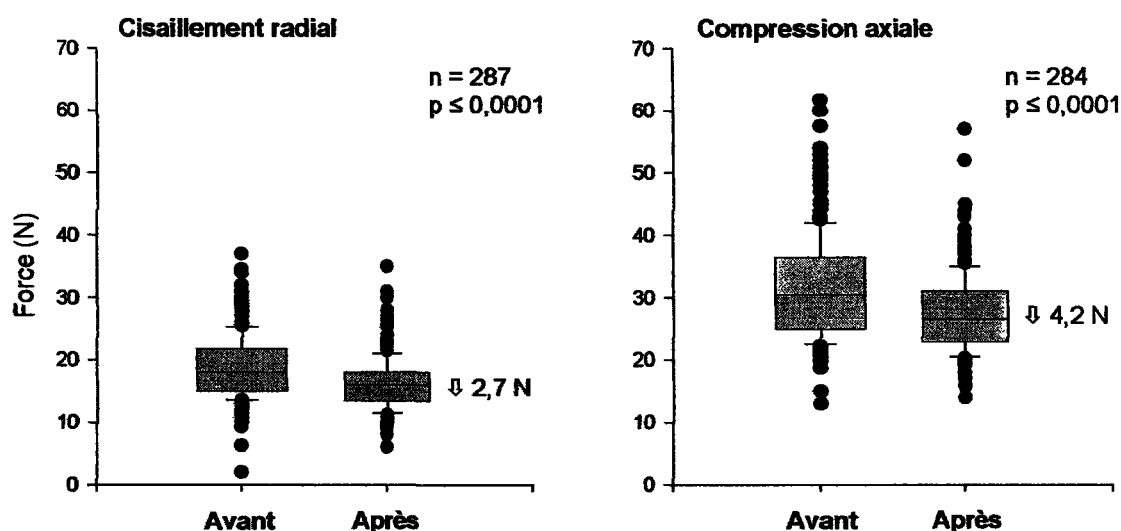


Figure 13. Forces de cisaillement radial (N) et de compression axiale (N) avant et après traitement mesurées sur les arbres échantillonnés des 10 sites EPC. L'analyse statistique utilisée est un test de t pour échantillon apparié.

Tests mécaniques des sites EC :

Comme pour les EPC, une moyenne des forces a été calculée par site EC pour le test FCR et le test FCA. Pour le test FCR, 4 sites sur 10 ont une diminution significative des forces de rupture de 1,1N à 3,4N après EC (Tableau 7). Pour le test FCA, seulement 2 sites sur 10 ont une diminution significative des forces de rupture de 2,5N et 3,7N après EC (Tableau 7).

Pour l'analyse générale comprenant tous les individus, les arbres ont en moyenne une diminution significative des forces de rupture après éclaircie de 1,2N pour le test FCR et de 1,5N pour le test FCA (Figure 14). Les valeurs de rupture sont aussi très variables d'un individu à l'autre. Les forces de rupture peuvent varier de 6N à 37 N avant et après EC pour le cisaillement et de 11N à 58N avant et après EC pour la compression (Figure 14).

Tableau 7. Résultats des tests de cisaillement radial (FCR) et de compression axiale (FCA) dont la moyenne avant et après EC est représentée pour chaque site avec l'écart-type. Le test statistique utilisé est un test de t pour échantillons appariés ($\alpha = 0,05$).

Cisaillement radial

Site	ddl	Avant (N)	ET (N)	Après (N)	ET (N)	Écart (N)	Prob > F
MV95	52	15,9	4,1	14,8	2,8	1,1	0,0408
MV97	26	17,5	3,9	15,7	3,2	1,8	0,0036
MV98	20	14,2	3,7	13,4	3,4	0,8	0,4634
LC96	16	16,2	4,6	16,5	4,2	-0,3	0,7475
LC98	21	17,1	3,9	15,9	3,4	1,2	0,0889
LC99	22	20,3	2,6	19,2	3,2	1,1	0,0640
RL95	21	16,1	4,3	14,5	4,0	1,6	0,0304
RL96	25	21,7	5,2	20,1	5,9	1,6	0,2185
SL97	23	17,5	5,0	17,4	5,2	0,1	0,8354
SL99	17	18,2	3,8	14,8	4,9	3,4	0,0128

Compression axiale

Site	ddl	Avant (N)	ET (N)	Après (N)	ET (N)	Écart (N)	Prob > F
MV95	51	28,8	7,7	27,5	5,8	1,3	0,1448
MV97	25	29,3	5,5	25,6	5,1	3,7	0,0076
MV98	20	25,4	4,8	24,2	4,5	1,2	0,0976
LC96	14	27,7	7,2	29,3	7,5	-1,6	0,1573
LC98	21	29,4	6,0	28,0	6,3	1,4	0,2298
LC99	22	33,7	7,6	31,9	7,2	1,8	0,2566
RL95	20	29,6	7,3	28,6	7,8	1,0	0,2500
RL96	24	32,6	7,2	30,8	5,1	1,8	0,0956
SL97	23	30,6	6,3	29,5	10,2	1,1	0,5991
SL99	18	32,7	3,8	30,2	5,2	2,5	0,0060

Note : ET; écart-type, Écart; différence entre les valeurs avant et après éclaircie.

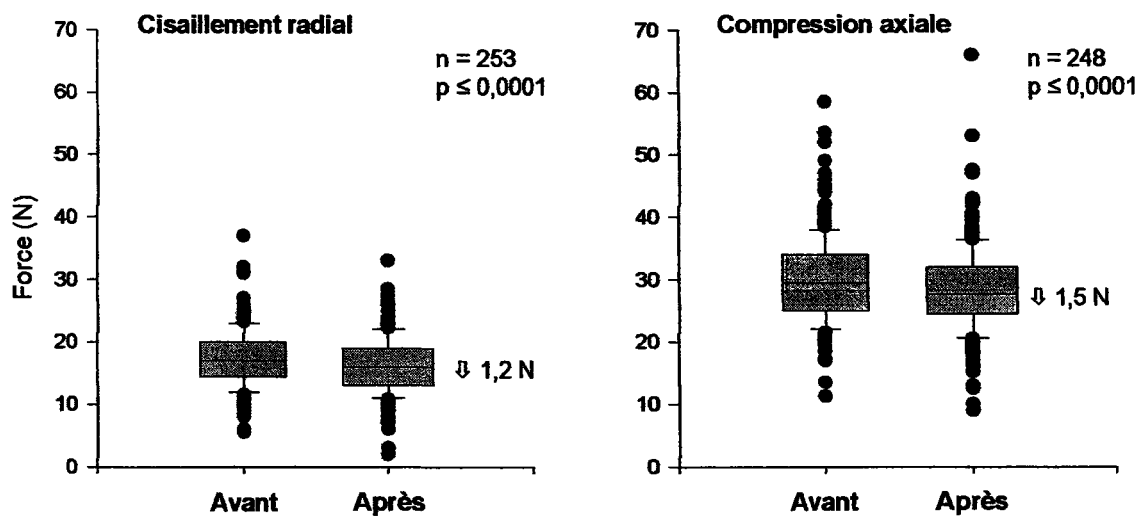


Figure 14. Forces de cisaillement radial (N) et de compression axiale (N) avant et après traitement mesurées sur les arbres échantillonnés des 10 sites EC. L'analyse statistique utilisée est un test de t pour échantillon apparié.

DISCUSSION

Croissance radiale après l'éclaircie

Une augmentation de la croissance radiale a été observée dans les peuplements d'épinette noire de la région du Saguenay – Lac St-Jean suite aux pratiques d'EPC et d'EC. Cette augmentation a d'ailleurs été bien documentée par plusieurs chercheurs et pour différents résineux mais provenant des régions au sud de la forêt boréale (Barbour *et al.* 1992; Chui *et al.* 1997; Tassissa et Burkhart 1997; Zhang *et al.* 1998).

Dans les peuplements plus âgés d'EPC (>20 ans) et les peuplements adultes à matures des EC, une hausse importante de la croissance radiale est observée trois années seulement après le traitement. Ce résultat est appuyé par plusieurs auteurs autant pour l'épinette que pour le pin où ce dernier amorce plutôt cette augmentation deux années après l'éclaircie (Bédard *et al.* 2003; Juodvalkis *et al.* 2005; Tassissa et Burkhart 1997). L'effet de l'éclaircie semble être soutenu à la suite du traitement pour les peuplements plus âgés des EPC car l'accroissement radial des arbres est maintenu supérieur aux années précédant le traitement. L'effet bénéfique de l'éclaircie peut être envisagé à plus long terme si des résultats eu été disponibles pour l'EC au-delà des 6 années de cette étude. Ainsi, certaines études corroborent au fait que l'éclaircie affecte positivement la croissance des arbres quelques années après le traitement. La durée de la réponse à l'éclaircie dépendrait essentiellement de l'espacement initial et des conditions du site, de l'intensité de l'éclaircie et de la réponse des arbres à l'éclaircie (Larson *et al.* 2001; Tremblay 2006; Valinger *et al.* 2000). De plus, les conditions nouvelles d'adaptation reliées à l'ouverture du milieu ou encore à la diminution de la compétition intra spécifique impliquent un laps de temps avant que l'arbre soit bien adapté et qu'une reprise de la croissance soit observée (Karsh *et al.* 1994). L'épinette noire étant une espèce bien adaptée de la forêt boréale et à ses perturbations, elle est néanmoins sujette à des variations radiales qui répondent à cette adaptation et influenceraient notamment les propriétés physiques du bois et le temps de réponse (Gagnon 1998).

Pour les arbres très jeunes traités à l'EPC (<20 ans), le taux d'accroissement annuel est plus élevé comparativement aux arbres plus âgés. Cependant, l'effet de l'éclaircie ne peut être vérifié en raison de l'absence de témoins de conditions similaires et que la hausse de la croissance radiale est d'ore et déjà observée avant l'éclaircie et se poursuit jusqu'à la 5^e année. Le nombre restreint d'années limite de surcroît l'interprétation de ce résultat sachant que l'effet d'une éclaircie peut être visible sur une période de 10 à 20 ans (Barbour et al. 1994).

Ainsi, il est bien connu dans la littérature que la largeur des cernes de croissance en relation de l'âge des individus et pourrait contribuer à une part non négligeable de la variation observée de la réponse des arbres jeunes et adultes à l'éclaircie. Les arbres traités entre 5 et 20 ans dans cette étude correspondraient à une phase de changement tant sur le plan physiologique et anatomique appelé communément la période juvénile (Josza et Middleton 1997). Durant cette période, le bois juvénile est le siège de fortes variations radiales et est plus sensibles aux perturbations, ce qui rend ce bois instable comparativement au bois adulte qui présente davantage d'homogénéité et une amplitude modérée aux changements (Burdon et al. 2004; Alteyrac 2005).

Notre étude montre un aspect intéressant sur la variabilité de la croissance radiale des arbres provenant des peuplements traités à l'éclaircie. Certains sujets ont soit diminué leur croissance ou l'ont augmentée jusqu'à doubler leur accroissement radial après traitement. Une faible variation entre les sujets traités et non traités a été observée avant l'EC, mais cette variabilité augmente significativement pour les sujets traités après éclaircie alors qu'elle reste inchangée pour les sujets témoins. De plus, cette variation ne s'exprime pas seulement au niveau des individus mais aussi entre les sites également. Mäkinen et al. (2002) a rapporté également cette variation pour le *Picea abies* en rapport avec le pourcentage de la cime vivante des arbres et la densité du peuplement. L'état dans lequel les individus sont enclins à répondre positivement ou négativement à l'éclaircie dépendrait de plusieurs facteurs. Certains facteurs sont en rapport direct avec l'historique du peuplement. Les techniques d'éclaircie employées et leur intensité (Bédard et al. 2003) ou l'espacement initial des peuplements (Tremblay 2006) sont des exemples

potentiels. Les facteurs modifiant directement le milieu dans lequel les arbres évoluent pourraient aussi affecter la croissance. La compétition en est un exemple. On a remarqué que certains individus supprimés dont la croissance annuelle était faible ont augmenté significativement leur croissance radiale après l'année du traitement, alors que les arbres dominants ont eu un changement moins important de leur croissance suite à l'éclaircie. Néanmoins, ces résultats ne sont pas présentés dans cette étude. Suite à une ouverture du milieu, un nouveau microclimat est créé et rend la lumière plus disponible aux arbres résiduels (Bédard et al. 2003). Pour expliquer la variabilité observée entre les arbres, les conditions de croissance difficiles rencontrées chez les arbres supprimés avant éclaircie, comparativement aux arbres dominants, les favoriseraient davantage pour l'accès à la lumière et à l'eau et la production rapide de la biomasse. Pour les arbres dominants, il s'avèrerait plus difficile de créer des largeurs de cerne plus grandes après éclaircie étant donné la largeur non négligeable de ces derniers avant le traitement.

Sur le plan physiologique, avant d'accroître significativement leur croissance radiale, les arbres ont besoin de former de nouvelles racines et du feuillage pour occuper l'espace disponible (Karsh et al. 1994). Ainsi, la vitalité des arbres en relation avec la compétition intra spécifique expliquerait en partie la variabilité observée dans la croissance des arbres. L'augmentation de la température du sol dans les peuplements éclaircis stimulerait la croissance racinaire (Piene 1978; Thibodeau et al. 2000). De plus les dénivellations dans les peuplements telles que les dépressions et les pentes sont aussi reconnues pour influencer la réponse des arbres. L'effet du climat au moment d'éclaircir pourrait influencer la variabilité observée entre les sites car les années de traitement différeraient entre ces derniers (Bédard et al. 2002; Bédard et al. 2003).

La variation observée dans la croissance radiale a été notée plus forte chez les jeunes individus. Comme mentionnée plus haut, ces arbres sont plus sensibles et répondent drastiquement aux changements. Le fait que les arbres plus âgés ont des variations radiales moins importantes les rendent moins vulnérables sur le plan adaptatif et la qualité des tiges s'en trouve moins affectée comparativement aux individus jeunes où la variation radiale est importante.

Propriétés du bois après l'éclaircie

Sachant que l'éclaircie a un effet positif global sur la croissance des arbres, il est intéressant d'aborder les paramètres anatomiques et mécaniques chez les sujets traités étant donné qu'ils réfèrent directement à la valeur marchande du bois. Nous avons observé un changement significatif dans les propriétés du bois en rapport avec une augmentation significative de la croissance après l'éclaircie. Sur le plan anatomique, les résultats montrent que la largeur du bois initial et le nombre de cellules formées ont augmenté après l'éclaircie. L'augmentation de la largeur du bois initial est plus importante pour les arbres jeunes des EPC. Toutefois, le nombre de cellule n'augmente pas significativement avec la hausse de la largeur du bois initial chez les EPC. Pour les EC, la largeur du bois initial et le nombre de cellule semblent être corrélés positivement. Pour le bois final, reconnu comme le critère de référence en matière de qualité du bois (Verkasalo 1992), aucune variation significative n'a été rapportée. Pourtant, l'âge cambial, les conditions relatives au milieu et les traitements sylvicoles sont reconnus pour influencer la production du bois final (Mäkinen et al. 2002). Pour les EPC, la largeur du bois final ne change pas nonobstant la hausse du bois initial. Par contre, pour les EC, la proportion du bois final augmente avant traitement puis diminue après l'éclaircie et serait reliée directement à la hausse du bois initial. De ce fait, on a pu observer une légère augmentation de la largeur du bois final suite à l'éclaircie mais la largeur importante du bois initial diminue conséquemment la proportion de bois final. Plus le cerne est large en rapport avec le nombre de trachéides du bois initial, plus la proportion de bois final diminue (Wang et al. 2002). L'aspect mécanique de cette étude rapporte une diminution des forces de rupture pour les deux éclaircies et concorde potentiellement avec la hausse du bois initial de densité plus faible. En effet, les trachéides plus nombreuses du bois initial chez l'épinette sont caractérisées par un lumen plus large et une épaisseur des parois plus mince comparativement au bois final dont la densité est supérieure (Jaakkola et al. 2005b). Cette diminution de la densité est donc plus importante pour l'EPC renfermant une proportion plus élevée de bois initial comparativement aux tiges des EC.

Larson (1962), a déjà rapporté une diminution de la densité du bois suite à une éclaircie. D'autres études tels que Ericson (1966) ont démontré une diminution faible de

7% de la densité du bois avec une augmentation de 28% de la largeur du cerne de croissance alors qu'Herman et al. (1998) et Mäkinen et al. (2007) ont rapporté une diminution significative de la densité du bois après éclaircie. D'un autre côté, les résultats de certains auteurs ne montrent aucune diminution significative de la densité du bois lors d'une augmentation de la croissance radiale suite à ce même traitement (Valinger et al. 2000; Mörling 2002). Chez les conifères, il est reconnu qu'une diminution de la densité du cerne avec une augmentation de la croissance radiale est généralement attribuée à une augmentation de la proportion du bois initial, ce qui est notamment le cas dans cette étude (Josza et Brix 1989; Larson 1969). Cependant, Jakkola et al. (2006) mentionne une légère différence (0-9%) dans le pourcentage de bois final et la densité de ce dernier diminuerait après éclaircie dans les peuplements de *Picea abies*. Ainsi, il semble qu'une diminution de la densité du cerne est reliée à une diminution de la densité du bois initial ou à une diminution de la proportion du bois final. La littérature rapporte que les changements du bois initial et du bois final seraient attribués à la paroi cellulaire ce dernier étant un second critère de qualité reconnu. Un taux de croissance rapide diminuerait légèrement l'épaisseur des parois cellulaires dans les peuplements traités à l'éclaircie (Mäkinen et al. 2002; Jaakkola et al. 2005b). Néanmoins, ceci n'est pas observé pour les peuplements traités de cette étude. Toutefois, d'autres paramètres d'importance pourraient induire une altération des parois cellulaires sans modifier leur épaisseur tels que la longueur et l'orientation des microfibrilles des trachéides (Josza et Middleton 1997).

Certains auteurs ont démontré qu'il y a une corrélation entre les propriétés du bois (largeur de cerne et densité du cerne) et l'âge des arbres (bois juvénile et bois mature) (Koubaa et al. 2000; Koga et Zhang 2002). Le bois juvénile, plus fortement présent chez les arbres traités à l'EPC, est caractérisé par des propriétés physiques et anatomiques changeantes du fait de la variabilité simultanée entre les largeurs de cerne et la masse volumique du bois. Ce qui pourrait expliquer cette baisse plus importante des propriétés du bois. Adulte ou mature (âge supérieur à 40 ans), de très faibles variations entre ces deux paramètres n'affectent que très peu les propriétés mécaniques et anatomiques du bois (Jozsa et Middleton 1997; Koubaa et al. 2005). Par conséquent, l'effet d'une

accélération de la croissance sur la densité du bois devient moins importante avec l'âge (Koubaa et al. 2000; Zhang 1998).

Fielding (1967) a statué que les pratiques sylvicoles telles que l'éclaircie influencent le taux de croissance des arbres et Larson et al. (2001) d'ajouter que l'effet de ce traitement sur la qualité du bois est variable et dépend de plusieurs facteurs. Ces facteurs sont l'espacement initial, l'âge des arbres, l'année de traitement, la qualité du site et du milieu, etc. Cependant, les paramètres à considérer sont nombreux et le degré selon lequel ces paramètres affectent l'arbre est difficile à cerner.

Principalement notre étude a tenu à démontrer l'effet positif de l'éclaircie sur la croissance radiale des arbres de la forêt boréale du Québec. Comme l'a également constaté Mörling (2002), les résultats de cette étude montrent que l'éclaircie ne modifie pas profondément la densité du bois et les changements rapportés chez ce dernier sont inférieurs aux changements rapportés dans la croissance radiale. L'épinette noire est caractérisée par une transition progressive du bois initial et du bois final ce qui rend son bois plus résistant dû aux écarts de densité moins élevés que certaines autres essences résineuses tels que le pin ou le mélèze où la transition est nette (Alteyrac 2005; Dutilleul et al. 1998; Jozsa et Middleton 1997). Il convient toutefois d'affirmer que la densité du bois diminue beaucoup moins comparativement à la hausse des largeurs de cerne de croissance chez les EC. Pour ce qui est des EPC, la diminution de la densité du bois semble toute aussi importante que la hausse des largeurs de cernes seulement pour les jeunes individus. L'effet de cette diminution devra être ultérieurement considéré sur la qualité future de la tige.

Le fractomètre est ainsi un instrument expérimental utile de cette étude car il permet de mesurer les propriétés mécaniques sur de petits échantillons de bois sans abattre l'arbre (mesure non destructive). Toutefois, il n'était pas possible de comparer les valeurs du fractomètre avec des valeurs de référence ou standardisées approuvées par l'ASTM (American Society for Testing and Materials) qui sont, elles, obtenues sur des échantillons plus gros. Toutefois, depuis quelques années, il existe un appareil prometteur

pouvant estimer certaines propriétés mécaniques du bois sans détruire l'échantillon; une machine de classement mécanique (*stress grading machine*) (OIFQ 1996). Il serait intéressant dans une prochaine étude de mesurer la résistance des échantillons par cet appareil (échantillon non détruit) pour ensuite le soumettre au fractomètre (échantillon détruit) afin de comparer les valeurs obtenues.

RÉFÉRENCES

- 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 en sciences du bois, Faculté de foresterie et de géomatique. Université Laval. 154 p.
- André, P., Buchet, V., Defays, E., Lhoir, P., et Reginster, P. 1994. *Éclaircie en futaie résineuse*. Ministère de la région Wallonne, Direction générale des ressources naturelles et de l'environnement, Division de la nature et des forêts, Service de l'aménagement et du génie forestier. Fiche technique n° 3. Université Catholique de Louvain, Belgique. 36 p.
- Barbour, R.J., Bailey, R.E., et Cook, J.A. 1992. *Evaluation of relative density, diameter growth, and stem form in a red spruce (Picea rubens) stand 15 years after precommercial thinning*. Can. J. For. Res. 22: 229-238.
- Barbour, R.J., Fayle, D.C.F., Chauret G., Cook J., Karsh M.B., Ran S. 1994. *Breast-height relative density and radial growth in mature jack pine (Pinus banksiana) for 38-years after thinning*. Can. J. For. Res. 24 : 2439-2447.
- Bauce, E. 1996. *One and two years impact of commercial thinning on spruce budworm feeding ecology and host tree foliage production and chemistry*. For. Chron. 72: 393-398.
- Bédard, S., Bégin, J., De Grandpré, L., Duchesne, L., Grondin, P., Jetté, J.-P., Jobidon, R., Lussier, J.-M., Pothier, D., Prément, G., et Ruel, J.-C. 2002. *Éclaircie précommerciale pour le groupe de production prioritaire SEPM*. Avis scientifique du Comité consultatif scientifique du Manuel d'aménagement forestier. Ministère des Ressources naturelles du Québec, Forêt Québec. 126 p.
- Bédard, S., De Grandpré, L., Duchesne, L., Grondin, P., Jetté, J.-P., Jobidon, R., Lussier, J.-M., Pothier, D., Prément, G. et Ruel, J.-C. 2003. *Éclaircie commerciale pour le groupe de production prioritaire SEPM*. Avis scientifique du Comité consultatif scientifique du Manuel d'aménagement forestier. Ministère des Ressources naturelles du Québec, Forêt Québec. 80 p.
- Bella, L.E. et DeFranceschi, J.P. 1974. *Analysis of jack pine thinning experiments, Manitoba and Saskatchewan*. Dept. Environment, Canadian forestry service, publication no 1338.
- Brissette, J.C., Frank, Jr., R.M., Stone, T.L., et Skratt, T.A. 1999. *Precommercial thinning in a northern conifer stand: 18-years results*. For. Chron. 75: 967-972.

- Burdon, R.D., Kibblewhite, R.P., Walker, J. C.F., Megraw, R.A., Evans, R. et Cown, D.J. 2004. *Juvenile versus mature wood: A new concept, orthogonal to corewood versus outerwood, with special reference to Pimus radiata and P. taeda*. Ann. For. Sci. 50 :399-415.
- Bustos, C. 2003. *Optimisation du procédé d'aboutage par entures multiples du bois d'épinette noire*. Thèse de doctorat, Université Laval, Québec, Canada. 133 p.
- Chui, Y.H., Zhang, S.Y., Price, J.C., et Chauret, G. 1997. *Early thinning of balsam fir and black spruce to precommercial thinning*. CTIA/IUFRO International wood quality workshop. Timber management toward wood quality and end-product value. V-15 to V-21.
- Cimon, A., et Labbé, P. 2006. *Lignes directrices visant à encadrer la pratique de l'éclaircie précommerciale afin d'assurer le maintien de la biodiversité*. Québec. Ministère des Ressources naturelles et de la Faune, Direction de l'environnement forestier. 13 p.
- Denne, M.P. 1989. *Definition of latewood according to Mork (1928)*. IAWA Bulletin 10: 59-62.
- Deslauriers, A. 1999. *Mise en place du cerne de croissance chez le sapin baumier (Abies balsamea (L.) Mill.) et relation avec le climat local*. Mémoire de maîtrise. Université du Québec à Chicoutimi. 71 p.
- Doucet, R., et Boily, J. 1996. *Accroissement quinquennal de peuplement d'épinette noire soumis au dépressage*. Note de recherche forestière n° 75. Direction de la recherche forestière, Ministère des Ressources naturelles du Québec, 12 p.
- Dutilleul, P., Herman, M., Avella-Shaw, T. 1998. *Growth rate effects on correlations among ring width, wood density, and mean tracheid length in Norway spruce (Picea abies)*. Can. J. For. Res. 28 : 56-68.
- Environnement Canada. 2006. *Normales et moyennes climatiques*. Adresse URL : http://www.climate.weatheroffice.ec.gc.ca/climate_normals/results_f.html.
- Ericson, B. 1966. *Effect of thinning on basic density and content of latewood and heartwood in Scots Pine and Norway Spruce*. Rapp Uppsats Instn Skogsprod. Skogshogsk. 10: 116.
- Fielding, J.M. 1967. *The influence of silvicultural practices on wood properties*. Int. Rev. For. Res. 95-126.
- Filion, L., et Cournoyer, L. 1995. *Variation in wood structure of eastern larch defoliated by the larch sawfly in subarctic Quebec*. Can. J. For. Res. 25: 1263-1268.

- Fillion, D. 2004. *Portrait et état de situation des forêts de la région du Saguenay-Lac-St-Jean et de leur gestion*. Commission d'étude sur la gestion de la forêt publique québécoise. 35 p.
- Gagnon, R. 1998. *Les bases écologiques de fonctionnement des forêts commerciales d'épinette noire du Saguenay-Lac-Saint-Jean – Chibougamau-Chapais (Québec) : vers un aménagement forestier durable*. Université du Québec à Chicoutimi. Laboratoire d'écologie végétale, Première version. 28 p.
- Gagnon, R., Morin, H. 2001. *Les forêts d'épinette noire du Québec: dynamique, perturbations et biodiversité*. Le naturaliste canadien. 26-35 p.
- Götz, K.O., Mattheck, C. 1999. *Studies in the Strength of Green Trees using the Fractometer III*. Model description and user's manual. Institut für Material forschung. FZKA 6158. 15 p.
- Guay, R., Gagnon, R., Morin, H. 1992. *A new automatic and interactive tree ring measurement system based on a line scan camera*. For. Chron. 69: 138 – 141.
- Hall, J. P. 1984. *The relationship between wood density and growth rate and the implications for the selection of black spruce trees*. Inf. Rep. N-X-224, Newfoundland For. Res. Cent., Can. For. Serv., Newfoundland
- Herman, M., Dutilleul, P., et Avella Shaw, T. 1998. *Growth rate effects on temporal trajectories of ring width, wood density, and mean tracheid length in Norway spruce (Picea abies (L.) Karst.)*. Wood Fiber Sci. 30 : 6-17.
- Holmes, R.L. 1983. *Computer assisted quality control in tree-ring dating and measurement*. Tree-Ring Bulletin. 43: 69-78.
- Jaakkola, T., Mäkinen, H., Saranpää, P. 2005a. *Wood density in Norway spruce : changes with thinning intensity and tree age*. Can. J. For. Res. 35 : 1767-1778.
- Jaakkola, T., Mäkinen, H., Sarén, M.-P., Saranpää, P. 2005b. *Does thinning intensity affect the tracheid dimensions of Norway spruce?* Can. J. For. Res. 35 : 2685-2697.
- Jaakkola T., Mäkinen, H., et Saranpää, P. 2006. *Wood density of Norway spruce: responses to timing and intensity of first commercial thinning and fertilisation*. For. Ecol. Manage. 237 : 513-521.
- Josza L.A., Brix H. 1989. *The effects of fertilization and thinning on wood quality of a 24-year-old Douglas-fir stand*. Can. J. For. Res. 19 : 1137-1145.
- Josza L.A. et Middleton G.R. 1994. *A discussion of wood quality attributes and their practical implications*. Forintek Canada Corp. No. SP-34. 42 p.

- Jozsa, L. A., Middleton, G. R. 1997. *Les caractéristiques déterminant la qualité du bois: nature et conséquences pratiques*. Forintek Canada Corp. 42 p.
- Juodvalkis, A., Kairiukstis, L., et Vasiliauskas, R. 2005. *Effects of thinning on growth of six tree species in north-temperate forests of Lithuania*. Eur. J. For. Res. 124: 187-192.
- Karsh, M.B., Lavigne, M.B., et Donnelly, J.G. 1994. *Growth responses of the balsam fir and black spruce spacing trials*. Serv. Newfoundland and Labrador Region. St-John's. Inf. Rep, Can. For. N-X-291.
- Koga S. et Zhang S.Y. 2002. *Relationships between wood density and annual growth rate components in Balsam fir (Abies balsamea)*. Wood Fiber Sci. 34: 146-157.
- Koubaa, A., Isabel, N., Zhang, S.Y., Beaulieu, J., Bousquet, J. 2005. *Transition from juvenile to mature wood in black spruce (Picea mariana (Mill.) BSP)*. Wood Fiber Sci. 37: 445-455.
- Koubaa, A., Zhang, S.Y., Isabel, N., Beaulieu, J., Bousquet, J. 2000. *Phenotypic correlations between juvenile-mature wood density and growth in black spruce*. Wood Fiber Sci. 32: 61-71.
- Larson P.R. 1962. *A biological approach to wood quality*. Tappi. 45 : 443-448.
- Larson P.R. 1969. *Wood formation and the concept of wood quality*. Yale Uniy. School of Forestry, New Haven, CT. Bulletin No. 74.
- Larson, P.R., Kretschmann, D.E., Clark, A.III, Isebrands, J.G. 2001. *Formation and properties of juvenile wood in southern pines: a synopsis*. Gen. Tech. Rep. FPL-GTR-129. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. 42 p.
- Law K.N. et Valade J.L. 1997. *Effect of wood quality on thermomechanical pulping: a case study on black spruce and jack pine*. CTIA/IUFRO international wood quality workshop, Quebec city, Canada. Timber management toward wood quality and end product value. Chapter VII p3-7.
- Legris, J., et Couture, G. 1999. *L'éclaircie précommerciale au Québec dans un cadre d'aménagement durable des forêts*. Ministère des Ressources naturelles du Québec, Direction de l'environnement forestier, Québec, ISBN : 2-550-35701-9. 79 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. 86 p.

- Mäkinen, H., Jaakkola, R., Piispanen, R., et Saranpää, P. 2007. *Predicting wood and tracheid properties of Norway spruce*. For. Ecol. Manage. 241: 175-188.
- Mäkinen, H., Nojd, P., et Isomaki, A. 2002. *Radial, height and volume increment variation in Picea abies (L.) Karst. Stands with varying thinning intensities*. Scan. J. For. Res. 17: 304-316.
- MapInfo Corporation. 2003. *MapInfo Professional Version 7.5*. MapInfo Corporation, Troy, USA.
- Mayor, X., et Rodà, F. 1993. *Growth response of holm oak (Quercus ilex L) to commercial thinning in the Montseny mountains (NE Spain)*. Ann. For. Sci. 50: 247-256.
- Metro, A. 1975. *Terminologie forestière : Science forestière, technologie, pratique et produits forestiers*. Association française des eaux et forêts. 433 p.
- Mork, E. 1928. *Die Qualität des Fichtenholzes unter besonderer Rücksichtnahme auf Schleif- und Papierholz*. Der Papier-Fabrikant 26: 741-747.
- Mörling T. 2002. *Evaluation of annual ring width and ring density development following fertilisation and thinning of Scots pine*. Ann. For. Sci. 59 : 29-40.
- MRN (Ministère des ressources naturelles). 1990. *Petite flore forestière du Québec*. 2^e éd. rev. et aug. Les publications du Québec. Québec. 251p.
- MRNF (Ministère des ressources naturelles et de la faune). 2007a. *Instructions relatives à l'application du règlement sur la valeur des traitements sylvicoles admissibles en paiement des droits*. Direction de l'aménagement des forêts publiques et privées. Gouvernement du Québec. 125 p.
- MRNF (Ministère des ressources naturelles et de la faune). 2007b. *Ressources et industries forestières – Portrait statistique (édition 2007)*. Direction du développement de l'industrie des produits forestiers. Gouvernement du Québec. 506 p.
- MRNFP (Ministère des Ressources naturelles, de la faune et des parcs du Québec). 2003a. *Manuel d'aménagement forestier (4e édition)*. Direction des programmes forestiers. ISBN : 2-550-41174-9. Pagination multiple.
- MRNFP (Ministère des Ressources naturelles, de la faune et des parcs du Québec). 2003b. *Zones de végétation et domaines bioclimatiques du Québec*. Direction des inventaires forestiers. Code de diffusion : 2003-3043, 2 p.
- Mullins E.J. et Mcknight T.S. 1981. *Canadian woods: their properties and uses*. University of Toronto Press. Toronto; Canada (Ed. 3). 389 p.

- OIFQ. 1996. *Manuel de foresterie*. Presses de l'Université Laval, Sainte-Foy. 1428 p.
- Pape, R. 1999. *Effects of thinning regime on the wood properties and stem quality of Picea abies*. Scan. J. For. Res. 14 : 38-50.
- Petras, R. 2002. *Age and diameter classes or growth stages as criteria for the implementation of thinning*. J. For. Sci. 48 (1): 8-15.
- Piene, H. 1978. *Effects of increased spacing on carbon mineralization rates and temperature in a stand of young balsam fir*. Can. J. For. Res. 8: 398-406.
- Pothier, D. 2002. *Twenty-years results of precommercial thinning in a balsam fir stand*. For. Ecol. Manag. 168 : 179-188.
- Reader, T.G. et Kurmes, E.A. 1996. *The influence of thinning to different stocking levels on compression wood development in Ponderosa pine*. For. Prod. J. 46: 92-100.
- Saranpää, P. 2003. *Wood density and growth. In wood quality and its biological basis*. Blackwell Publishing Ltd., CRC Press, Oxford, UK. p. 87-117.
- SAS Institute Inc. 1992-1998. *Statview, Version 5.0*. SAS institute inc., Cary, NC, 27513.
- SAS Institute Inc. 2003. *Statistics and Graphics Guide, Version 5.1*. SAS institute inc., Cary, NC, USA.
- Scheiner, S.M., et Gurevitch, J. 1993. *Design and analysis of ecological experiments*. Chapman & Hall Inc., New York, Londres. Pagination multiple.
- Stokes, M. A., et Smiley, T.L. 1968. *An introduction to tree-ring dating*. University of Chicago Press, Chicago, London. 73 p.
- Tasissa, G. et Burkhart, H.E. 1997. *Modeling thinning effects on ring specific gravity of loblolly pine (Pinus taeda L.)*. For. Sci. 44: 212-223.
- Thibodeau, L., Raymond, P., Camiré, C., et Munson, A.D. 2000. *Impact of precommercial thinning in balsam fir stands on soil nitrogen dynamics, microbial biomass, decomposition, and foliar nutrition*. Can. J. For. Res. 30: 229-238.
- Tremblay, M. 2006. *Effets d'éclaircies précommerciales et de la dernière épidémie de la tordeuse des bourgeons de l'épinette (Choristoneura fumiferana (Clem.)) sur la croissance d'épinettes et de sapins dans la région du Saguenay-Lac-St-Jean*. Mémoire de maîtrise. Université du Québec à Chicoutimi. 52 p.
- Valinger, E. Elfving, B. et Morling, T., 2000. *Twelve-year growth response of Scots pine to thinning and nitrogen fertilisation*. For. Ecol. Manage. 134 : 45-53.

- Vaganov, E.A. 1990. *The tracheidogram method in tree-ring analysis and its application. Method of dendrochronology*. Kluwer Academy. 63-76 p.
- Verkasalo, E. 1992. *Relationships of the modulus of elasticity and the structure of finnish 10 Scots pine wood*. Silva Fenn. 26: 155-168.
- Viens, E. 2001. *Effets de l'éclaircie commerciale sur la croissance et la forme de la tige du pin gris (Pinus banksiana Lamb)*. Mémoire de maîtrise. Université du Québec à Chicoutimi. 63 p.
- Wang, L., Payette, S., et Bégin, Y. 2002. *Relationships between anatomical and densitometric 14 characteristics of black spruce and summer temperature at tree line in northern Quebec*. Can. J. For. Res. 78: 477-486.
- Zhang, S.Y. 1997. *Wood quality: its definition, impact, and implications for value-added timber management and end uses*. CITA/IUFRO, Quebec. Timber management toward wood quality and end-product value. August 18-22, pp I.17-I.39.
- Zhang, S. Y. 1998. *Effect of age on the variation, correlations and inheritance of selected wood characteristics in black spruce (Picea mariana)*. Wood Science and Technology. 32 : 197-204.
- Zhang, S.Y. et Chauret G. 2001. *Impact of initial spacing on tree and wood characteristics, product quality and value recovery in black spruce (Picea mariana)*. Canadian Forest Service Report. No. 35, Forintek Canada Corp. p.47.
- Zhang, S.Y., Corneau, Y., et Chauret, G. 1998. *Impact of precommercial thinning on tree and wood characteristics, and product quality and value in balsam fir*. Forintek Canada Corp., Eastern Division, Sainte-Foy, Québec, Project No 1108. 74 p.
- Zhang, S.Y., Fujiwara S., et Baas P. 1992. *Hardwood density in relation to fibre morphology and tissue proportions*. IAWA Bull. 13: 266-267.
- Zhang, S. Y., et Morgenstern, E.K. 1995. *Genetic variation and inheritance of wood density in black spruce (Picea mariana) and its relationship with growth: Implications for tree breeding*. Wood Sci. Technol. 30 : 63-75
- Zhang S.Y., Simpson D. et Morgenstern E.K. 1996. *Variation in the relationship of wood density with growth in 40 black spruce (Picea mariana) families grown in New Brunswick*. Wood Fiber Sci. 28: 91-99.