

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À CHICOUTIMI

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

**PAR
Élysabeth Viens
Bachelière ès Biologie**

**EFFETS DE L'ÉCLAIRCIE COMMERCIALE SUR
LA CROISSANCE ET LA FORME
DE LA TIGE DU PIN GRIS (*PINUS BANKSIANA* LAMB.)
EN ABITIBI, QUÉBEC**

12 JANVIER 2001



Mise en garde/Advice

Afin de rendre accessible au plus grand nombre le résultat des travaux de recherche menés par ses étudiants gradués et dans l'esprit des règles qui régissent le dépôt et la diffusion des mémoires et thèses produits dans cette Institution, **l'Université du Québec à Chicoutimi (UQAC)** est fière de rendre accessible une version complète et gratuite de cette œuvre.

Motivated by a desire to make the results of its graduate students' research accessible to all, and in accordance with the rules governing the acceptance and diffusion of dissertations and theses in this Institution, the **Université du Québec à Chicoutimi (UQAC)** is proud to make a complete version of this work available at no cost to the reader.

L'auteur conserve néanmoins la propriété du droit d'auteur qui protège ce mémoire ou cette thèse. Ni le mémoire ou la thèse ni des extraits substantiels de ceux-ci ne peuvent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

The author retains ownership of the copyright of this dissertation or thesis. Neither the dissertation or thesis, nor substantial extracts from it, may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

RÉSUMÉ

Au Québec, l'éclaircie commerciale est une pratique relativement récente qui consiste à récolter une fraction des tiges marchandes dans un peuplement qui n'a pas encore atteint l'âge d'exploitabilité. Cette opération vise ainsi à améliorer la croissance des tiges résiduelles et à augmenter la production ligneuse utile. Par la suppression de certains compétiteurs, l'éclaircie provoque en général une augmentation de l'accroissement en diamètre et en volume ainsi qu'une modification de la forme de la tige. Le défilement est l'un des indicateurs de qualité des billes destinées au sciage. Afin de maximiser la production de bois de sciage, la tige doit présenter une forme se rapprochant le plus possible d'un cylindre.

L'objectif de cette étude consiste à évaluer l'effet de l'éclaircie commerciale sur la croissance et la forme de la tige du pin gris (*Pinus banksiana* Lamb.) et d'interpréter les résultats obtenus en fonction de la qualité du bois produit pour le sciage. Pour ce faire, des analyses de tiges ont été effectuées sur des arbres provenant de trois peuplements témoins et de quatre peuplements éclaircis au cours des années 1970 à 1980, en Abitibi. L'accroissement en volume, la longueur du houppier, le coefficient de décroissance ainsi que le profil de ces tiges ont été comparés.

Selon les résultats, les arbres provenant de peuplements éclaircis présentaient en moyenne un accroissement en volume deux fois plus élevé que celui des témoins. Toutefois, les arbres ont réagi différemment selon leur taille et le site où ils ont été récoltés. En effet, les arbres traités de grande taille ont moins réagi au traitement que les subordonnés et une variation importante du gain en volume a été observée entre les quatre sites éclaircis. La longueur du houppier et le défilement des tiges n'ont été que légèrement augmentés par l'éclaircie. En absence de traitement, la croissance radiale était plus élevée au sommet de l'arbre. Suite à l'éclaircie, les arbres traités présentaient un accroissement radial supérieur dans le tiers inférieur de leur tige. L'éclaircie commerciale semble donc être une pratique sylvicole favorable à la production de bois. En effet, le volume et le diamètre ont augmenté sans que le défilement et la longueur du houppier ne soient modifiés de manière à réduire la qualité des tiges.

REMERCIEMENTS

Je désire remercier principalement Jean-Martin Lussier qui a agi à titre de directeur de ce projet. Je tiens à lui exprimer ma reconnaissance pour son inestimable aide d'ordre intellectuel et technique ainsi que pour ses nombreux conseils formateurs. Je voudrais spécialement remercier Valérie Levasseur pour sa grande compétence sur le logiciel *MapInfo* et pour son aide lors de l'interdatation, également menée à bien par Cornelia Krause et Pierre-Yves Plourde. Je tiens à souligner l'appui exceptionnel apporté par Denis Walsh et Jacques Allaire lors des analyses statistiques. Je tiens également à remercier Isabelle Bouchard et Steve Brassard pour leur indispensable assistance technique. Je veux aussi remercier Damien Côté, Claude Gagné, Patrice Desgagné et Claude Pelletier pour leurs précieuses informations. Je désire remercier tous les autres employés et étudiants des laboratoires d'écologie végétale et de télédétection qui ont contribué à l'achèvement de ce projet, particulièrement Germain Savard dont l'expertise est sans pareil. La réalisation de cette étude a été possible grâce au soutien financier de la Fondation de l'UQAT, du Conseil régional de développement de l'Abitibi-Témiscamingue, du Ministère des Ressources naturelles du Québec, des compagnies Tembec, Scierie Amos, Scierie Gallichan, Scierie Landrienne, Domtar, Donohue, Matériaux Blanchets et du Consortium de recherche sur la forêt boréale commerciale.

TABLE DES MATIÈRES

CHAPITRE I : INTRODUCTION.....	2
1.1. INTÉRÊT DE L'ÉCLAIRCIE COMMERCIALE POUR LA SYLVICULTURE DU PIN GRIS	2
1.2. EFFETS DE L'ÉCLAIRCIE SUR LA CROISSANCE DES ARBRES ET DES PEUPLEMENTS	4
1.3. OBJECTIFS ET DÉMARCHE MÉTHODOLOGIQUE	8
CHAPITRE II : MATÉRIEL ET MÉTHODES	11
2.1. LOCALISATION ET CARACTÉRISTIQUES ÉCOLOGIQUES DU TERRITOIRE D'ÉTUDE	11
2.2. CHOIX DES PEUPLEMENTS	12
2.3. DESCRIPTION DES SITES SÉLECTIONNÉS	14
2.4. ÉTABLISSEMENT DES PARCELLES D'ÉCHANTILLONNAGE	17
2.5. INVENTAIRE ET MESURES DES ARBRES	17
2.6. RÉCOLTE DES ÉCHANTILLONS	19
2.7. TRAVAUX DE LABORATOIRE	20
2.8. TRAITEMENT DES DONNÉES	21
2.8.1. <i>Interdatation</i>	21
2.8.2. <i>Analyses statistiques</i>	21
2.8.3. <i>Analyse de l'accroissement en volume</i>	22
2.8.4. <i>Analyse de la réponse du houppier</i>	25
2.8.5. <i>Analyse de la forme de la tige</i>	26
CHAPITRE III : RÉSULTATS.....	31
3.1. ACCROISSEMENT EN VOLUME.....	31
3.1.1. <i>Variation de la réponse par peuplement</i>	31
3.1.2. <i>Réponse en fonction de la taille relative des tiges</i>	35
3.2. RÉPONSE DU HOUPIER.....	37
3.2.1. <i>Longueur relative du houppier</i>	37
3.3. FORME DE LA TIGE.....	38
3.3.1. <i>Profil de tige</i>	38
3.3.2. <i>Coefficient de décroissance du premier billon</i>	40
CHAPITRE IV : DISCUSSION	44
4.1. ANALYSE DE L'ACCROISSEMENT EN VOLUME.....	44
4.2. ANALYSE DE LA RÉPONSE DU HOUPIER ET DE LA FORME DES TIGES.....	50
4.3. RÉPERCUSSIONS SUR LA PRODUCTION DE BOIS	54
CHAPITRE V : CONCLUSION	56
CHAPITRE VI : RÉFÉRENCES.....	60

LISTE DES FIGURES

Figure 1: <i>Peuplement de pin gris ayant subi une éclaircie commerciale, Louvicourt en Abitibi.....</i>	3
Figure 2: <i>Localisation des sites étudiés.....</i>	12
Figure 3: <i>Photographie aérienne du site 15 (1 : 15 000).....</i>	13
Figure 4: <i>Positionnement des parcelles échantillons et procédure de la localisation des arbres inventoriés</i>	18
Figure 5: <i>Hauteur des différents paramètres utilisés</i>	25
Figure 6 : <i>Estimation du coefficient de décroissance.....</i>	29
Figure 7: <i>Courbes moyennes de l'accroissement en volume (ACCVOL) des pins gris provenant des peuplements éclaircis et témoins.....</i>	32
Figure 8: <i>Courbe de l'accroissement relatif en volume (ARV) des pins gris provenant des peuplements éclaircis en comparaison à l'intervalle de confiance déterminé par les arbres témoins.....</i>	35
Figure 9 : <i>Indice de réponse relative (IRR) des pins gris traités et témoins en fonction de leur taille relative estimée par la cote Z de leur dhp.....</i>	37
Figure 10: <i>Répartition de l'accroissement radial décennal en fonction de la hauteur, avant et après traitement.....</i>	39
Figure 11: <i>Courbe moyenne du coefficient de décroissance (CD) des tiges provenant des peuplements éclaircis et témoins</i>	41

LISTE DES TABLEAUX

<i>Tableau 1: Description des sites sélectionnés.</i>	16
<i>Tableau 2: Code d'état établi selon les normes des placettes permanentes du Ministère des Ressources naturelles du Québec (1992).</i>	19
<i>Tableau 3: Résultats de l'analyse de variance à mesures répétées de l'accroissement relatif en volume de la décennie après l'éclaircie.</i>	33
<i>Tableau 4: Gain en volume pour les dix années après l'éclaircie des pins gris traités.</i> ..	33
<i>Tableau 5: Longueur relative du houppier des pins gris traités et témoins</i>	38
<i>Tableau 6: Résultats de l'analyse de variance à mesures répétées du coefficient de défilement de la décennie après l'éclaircie.</i>	42

CHAPITRE I

INTRODUCTION

1. Introduction

1.1. Intérêt de l'éclaircie commerciale pour la sylviculture du pin gris

Dans l'Est canadien, le pin gris (*Pinus banksiana* Lamb.) est l'une des espèces les plus importantes au point de vue économique de la forêt boréale (Janas et Brand 1988). Le bois de cette espèce commerciale est utilisé, entre autres, pour les industries de pâtes et papiers, la production de bois de construction, les traverses de voies ferrées et les poteaux (Hosie 1973 dans Janas et Brand 1988). Toutefois, cette essence est réputée comme étant intolérante à l'ombre et relativement sensible à la compétition (Vézina et Roberge 1981). Le pin gris peut vivre 150 ans, mais lorsqu'il dépasse l'âge de 60 ans son taux de croissance est considérablement réduit (Vézina et Roberge 1981). Les peuplements de pin gris atteignent rapidement une densité qui diminue leur croissance et qui engendre un taux sévère de mortalité (Day et Nanang 1997).

L'éclaircie commerciale est un traitement potentiellement très intéressant pour augmenter la production utile des peuplements. Cette pratique consiste à récolter une fraction des tiges marchandes, principalement celles de moindre valeur ou qui nuisent aux arbres de qualité, dans un peuplement équienne qui n'a pas atteint l'âge d'exploitabilité (figure 1). Au Québec, le prélèvement représente 30 % du volume marchand et s'effectue au moins 15 ans avant l'âge de maturité du peuplement (Ministère des ressources naturelles du Québec 1992). Les arbres récoltés peuvent servir à la fabrication de pâte à papiers ou de bois de sciage (Jozsa et Middleton 1997).

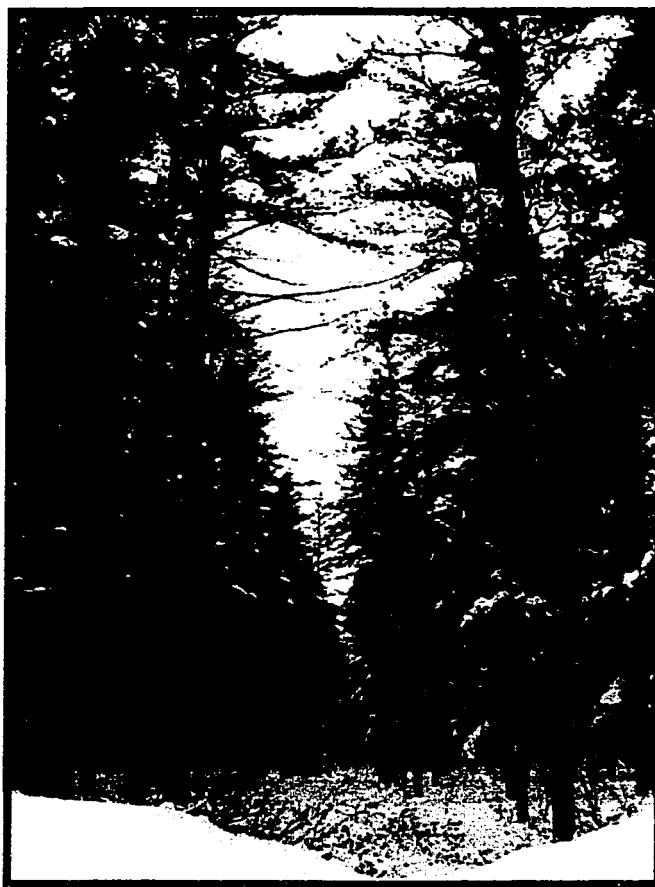


Figure 1: Peuplement de pin gris ayant subi une éclaircie commerciale, Louvicourt en Abitibi.

La raréfaction de peuplements matures constitue une cause de la popularité grandissante des éclaircies commerciales. Dans l'Est canadien, certaines compagnies forestières, parmi les plus avancées dans le domaine de la sylviculture, obtiennent jusqu'à 40 % de leur approvisionnement en bois par des éclaircies (Day et Nanang 1997).

L'éclaircie est utilisée afin d'augmenter la vitesse de croissance des arbres, dans le cas où cette dernière est réduite par la densité excessive du peuplement (Bella et De Franceschi 1974). Elle permet ainsi d'accroître la disponibilité régionale et la qualité du bois destiné au sciage en réduisant la période de production (Barbour *et al.* 1994 ; McLaughlin et Pulkki 1992). Les coûts de récolte et de façonnage sont alors diminués en raison des dimensions plus fortes des tiges résiduelles (Bella et De Franceschi 1974 ; Jozsa et Middleton 1997). L'amélioration de la santé des arbres ainsi que la réduction de la compétition intra-spécifique, du taux de mortalité et des infestations d'insectes sont d'autres avantages de l'utilisation de l'éclaircie (Johnstone 1997).

1.2. Effets de l'éclaircie sur la croissance des arbres et des peuplements

La suppression de certains compétiteurs par l'éclaircie provoque une augmentation de la croissance en diamètre (Bella et DeFranceschi 1974 ; Mayor et Rodà 1993). Sonderman et Rast (1988) ont démontré que le diamètre de la tige augmente en fonction de l'intensité de l'éclaircie. Généralement, les résultats de recherches antérieures indiquent que la croissance en hauteur ne présente pas de différence significative suite au traitement (Bella et DeFranceschi 1974).

Habituellement, lors d'une éclaircie commerciale, il se produit à l'échelle du peuplement une diminution du volume sur pied et une hausse du volume utile¹ (Pardé 1964). La production totale² est pour sa part diminuée ou demeure inchangée (Smith 1986).

¹ Le volume utile est le résultat de la somme du volume marchand sur pied et du volume des éclaircies.

² La production totale est le résultat de la somme du volume sur pied, du volume de la mortalité naturelle et du volume des éclaircies.

La croissance des arbres est fonction de l'assimilation par les feuilles et de l'absorption racinaire (Schaeffer 1945). Suite à l'éclaircie, la disponibilité de la lumière, de l'eau et des nutriments est accrue (Mayor et Rodà 1993). Il en résulte une augmentation de la croissance des arbres (Mayor et Rodà 1993). Une conséquence directe de l'élévation de la quantité de lumière est une hausse des produits de la photosynthèse (Aussenac *et al.* 1982 ; Day et Nanang 1997). En pénétrant plus facilement jusqu'au sol et en le réchauffant, la lumière favorise aussi la croissance des racines (Aussenac *et al.* 1982). La diminution du nombre d'arbres améliore la disponibilité en eau dans le sol en réduisant l'interception des précipitations et l'évapotranspiration (Aussenac *et al.* 1995). L'ouverture du couvert arborescent résulte donc en d'importantes modifications des conditions environnementales, qui influencent le fonctionnement écophysiologique des arbres résiduels (Aussenac *et al.* 1982).

On considère généralement que la longueur du houppier est un bon indicateur du potentiel des arbres à répondre à l'éclaircie (Short et Burkhart 1992 ; Sonderman et Rast 1988). L'éclaircie réduit la vitesse de récession du houppier, un phénomène qui est associé à la diminution rapide de la pénétration de la lumière dans les peuplements denses. Ainsi, les arbres des peuplements traités devraient posséder un houppier plus long que les arbres témoins (Short et Burkhart 1992). Selon l'hypothèse posée par Pressler, l'effet de l'éclaircie sur la forme de la tige peut s'expliquer de la manière suivante : la croissance d'un cerne annuel en un endroit donné sur la tige est proportionnelle à la quantité de feuillage situé au-dessus de ce point (Larson 1963). Ainsi, à l'intérieur du houppier vivant, la croissance diminue de la base au sommet de l'arbre ; en contre partie, et en tout point sur la tige claire (sans branche vivante), la croissance radiale demeure la même jusqu'à l'évasement du

contrepied de la tige (Larson 1963). Par conséquent, en milieu ouvert, les arbres présenteraient une tige de forme conique ou de néloïde puisque leur houppier s'étend jusqu'au niveau du sol (Newnham 1965). Le défilement est plus prononcé car les auxines, les hormones de croissance qui sont produites dans les bourgeons, sont distribuées dans toute la tige, réduisant le décalage entre la croissance au sommet et au pied de l'arbre (Jozsa et Middleton 1997 ; Larson 1963). En peuplement fermé, les arbres ont des houppiers plus courts et présentent une tige plus cylindrique. La répartition des auxines est plus lente puisqu'elles doivent parcourir toute la tige, réduisant ainsi le temps de production de bois à la base des arbres (Jozsa et Middleton 1997 ; Larson 1963).

La qualité du bois est définie différemment selon les études et le produit visé. Elle est souvent déterminée par la proportion de bois juvénile, le défilement de la tige ainsi que par le nombre et la taille des noeuds (Carter *et al.* 1986). À l'échelle de l'arbre, l'éclaircie peut affecter la qualité des tiges de manière négative puisqu'elle provoque normalement une hausse de ces paramètres (Carter *et al.* 1986). En règle générale, la qualité est meilleure dans un peuplement dense que dans un peuplement ouvert (Morris et Parker 1992). C'est pourquoi, plusieurs auteurs émettent des réserves quant aux effets positifs de l'éclaircie puisqu'elle peut provoquer une dégradation de la qualité du bois notamment en modifiant la forme de la tige (Barbour *et al.* 1994). Les usines de sciage recherchent des billes de bois résineux d'un fort diamètre et qui présentent un faible défilement, c'est-à-dire ayant une forme plus cylindrique que conique, afin d'éviter les pertes lors du découpage (Jozsa et Middleton 1997). Or, en général, plus le peuplement est dense, plus la tige présente une forme cylindrique (Farrar 1961 ; Janas et Brand 1988 ; Morris *et al.* 1994). Ainsi, des éclaircies fortes peuvent causer une détérioration de la forme de la tige en augmentant le défilement (Hilt 1979). En effet, chez la plupart des espèces, un grand espace-

augmente le défilement et la taille des branches, ce qui affecte négativement la qualité du bois produit pour le sciage (Magnussen et Yeatman 1987 ; Myers 1963).

La croissance et le rendement des différents peuplements suite à l'éclaircie dépendent principalement de l'espèce, de la productivité du site, de l'âge et de la densité du peuplement (Johnstone 1997 ; Larson 1963). En effet, la capacité des arbres à prendre avantage de l'espace additionnel dépend beaucoup de la vigueur des arbres et des conditions de leur houppier. Une espèce qui est tolérante à l'ombre et qui croît bien en milieu fermé aura normalement une plus faible réponse suite à l'éclaircie (Johnstone 1997). De plus, des arbres matures auront tendance à réagir moins au traitement puisque leur croissance est déjà très réduite. Les arbres de peuplement d'une grande densité initiale tendent à augmenter davantage leur croissance radiale à la base de leur tige afin de résister aux forces du vent, qui augmentent suite à l'ouverture du couvert (Johnstone 1997 ; Larson 1963). La nature, l'intensité et le moment de l'éclaircie sont des facteurs qui influencent également la réponse des arbres traités (Johnstone 1997 ; Larson 1963). En effet, la taille des tiges récoltées dépend du type de traitement et le défilement des arbres augmente avec l'intensité de l'éclaircie. De plus, une éclaircie tardive tend à allonger la période nécessaire pour atteindre la maturité requise lors de la récolte finale (Johnstone 1997 ; Larson 1963).

1.3. Objectifs et démarche méthodologique

Le pin gris a fait l'objet de nombreuses recherches, mais l'impact de l'éclaircie commerciale sur cette espèce demeure encore un sujet peu connu. Il était souhaitable que des études soient effectuées concernant l'éclaircie commerciale, en raison de l'importance croissante de la superficie traitée de cette manière au cours des dernières années et des attentes suscitées par ce traitement.

L'objectif général de la présente étude est donc d'évaluer l'effet de l'éclaircie commerciale sur la croissance et la forme de la tige du pin gris.

Plus spécifiquement, les objectifs de cette recherche sont de :

- a) Comparer l'accroissement relatif en volume des arbres traités à celui d'arbres non-traités provenant de peuplements comparables.
- b) Vérifier s'il existe une différence entre les arbres des peuplements traités et témoins concernant la longueur du houppier et le défilement.
- c) Comparer le patron de répartition du bois le long de la tige des arbres traités et témoins.
- d) Quantifier les gains en volume par tige associés à l'éclaircie commerciale.
- e) Interpréter les résultats obtenus en fonction de la qualité des bois produits pour le sciage.

Des analyses de tiges ont été effectuées sur des arbres issus de peuplements ayant subi une éclaircie commerciale au cours des années 1970 à 1980 ainsi que sur des arbres témoins. Ces mesures ont permis de comparer l'accroissement en volume et la forme des

tiges. La longueur du houppier a également été calculée pour les arbres traités et témoins. Les changements qui peuvent survenir suite à un tel traitement ont pu être vérifiés et une évaluation de leurs effets sur la production de bois a été réalisée.

CHAPITRE II

MATÉRIEL ET MÉTHODES

2. Matériel et méthodes

2.1. Localisation et caractéristiques écologiques du territoire d'étude

L'aire d'étude était localisée dans la région écologique des Basses-Terres de l'Abitibi, précédemment appelée les Basses-Terres d'Amos, du domaine bioclimatique de la sapinière à bouleau blanc (Ordre des ingénieurs forestiers du Québec 1996). Les coordonnées géographiques du territoire à l'étude étaient comprises entre les 48° et 50° de latitude nord ainsi qu'entre les 77° et 79° de longitude ouest (Figure 2). Le relief de cette région est représenté par des plaines et des coteaux et l'altitude varie entre 200 et 500 m. Les dépôts de surface sont en majorité de types glacio-lacustre argileux et sableux. Les sols sont caractérisés par des podzols et des luvisols (Ordre des ingénieurs forestiers du Québec 1996).

Selon les relevés météorologiques effectués de 1913 à 1980 à la station météo d'Amos (48°34'N, 78°08'O; 310 m), la température moyenne annuelle de la région est de 1,1°C avec des variations mensuelles de -22,9°C en janvier et de 23,1°C en juillet. Les précipitations sont caractérisées par des chutes de pluie dont la moyenne annuelle est de 678,3 mm et par des chutes de neige de 243,9 cm (Environnement Canada 1993).

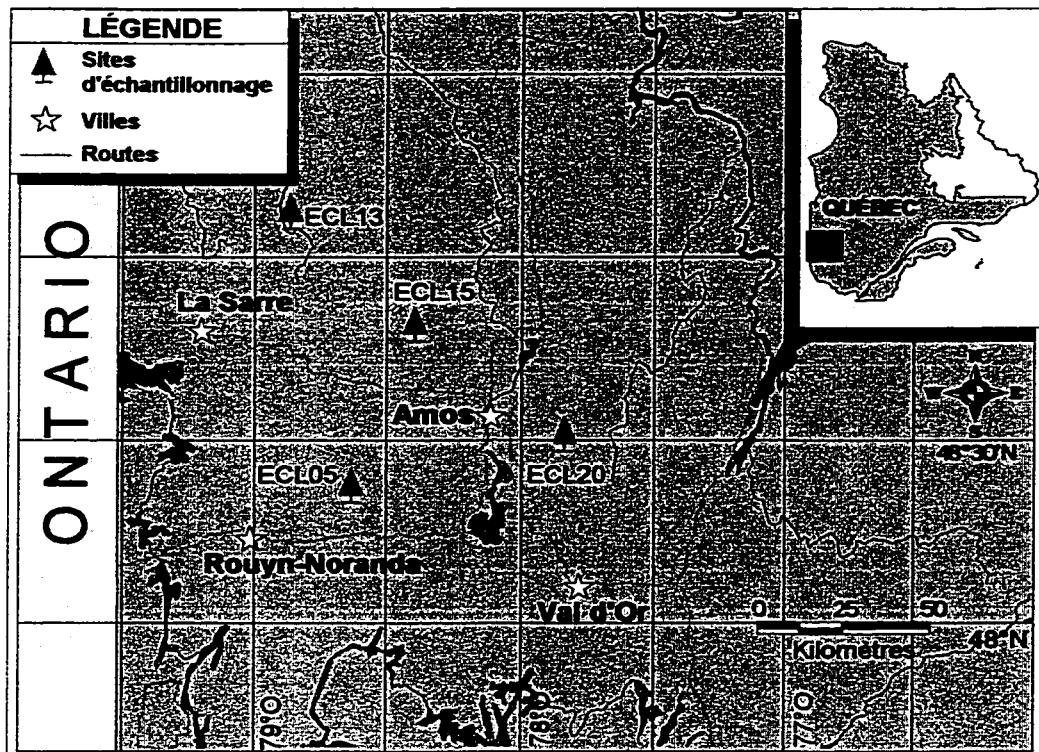


Figure 2: Localisation des sites étudiés.

2.2. Choix des peuplements

Un répertoire des sites éclaircis a été établi suite à une consultation effectuée dans les documents archivés par le Ministère des Ressources naturelles. Des peuplements de pins gris mûrs ou presque mûrs ayant subi des coupes partielles au cours des années 1960 à 1990 étaient recherchés. Des photographies aériennes ont été utilisées pour valider la localisation et l'existence des peuplements. Les forêts ayant été éclaircies étaient identifiables par les sentiers de débardage (figure 3).

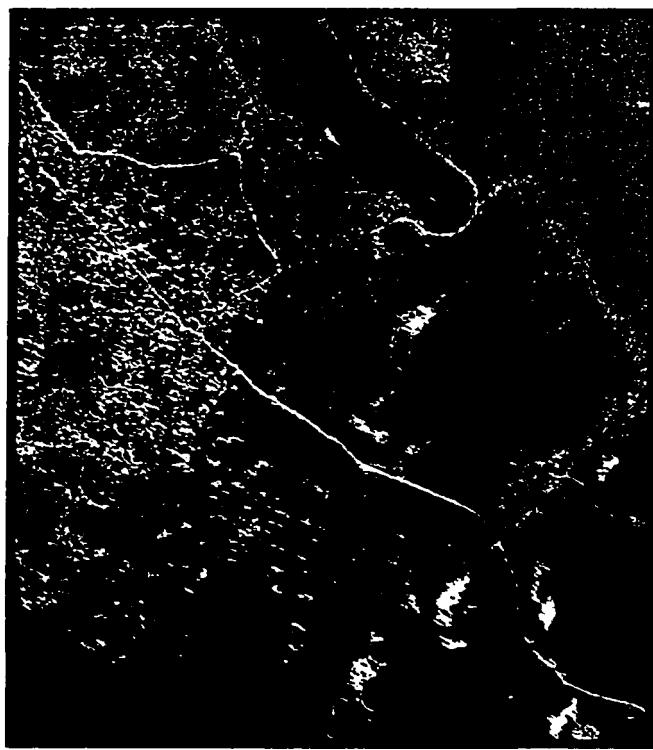


Figure 3: Photographie aérienne du site 15 (1 : 15 000).

L'analyse a porté sur quatre peuplements purs de pin gris ayant fait l'objet d'éclaircies commerciales au cours des années 1970 à 1980. À chaque peuplement traité était associé un peuplement témoin. Les sites étaient répartis dans différents cantons afin d'assurer la représentativité de l'ensemble du territoire étudié (tableau 1).

Pour le choix des peuplements, l'accessibilité des sites ainsi que la similarité des peuplements traités et témoins étaient des éléments considérés. Les peuplements témoins devaient présenter une densité égale ou supérieure à ceux traités ainsi qu'une composition et des classes d'âge et de hauteur identiques au peuplement traité (Gouvernement du

Québec 1984). Ils devaient être également situés à proximité, sur des territoires similaires de dépôt et de drainage.

2.3. Description des sites sélectionnés

Parmi les quatre sites sélectionnés, trois étaient localisés sur des stations sablonneuses dont la superficie variait entre 12 et 37 ha (tableau 1). L'autre station, d'une grandeur de 355 ha, étaient établie sur un dépôt d'argile glacio-lacustre (tableau 1).

Lors de l'échantillonnage, à l'été 1997, les peuplements traités et témoins étaient âgés entre 42 et 87 ans (tableau 1). La hauteur dominante de l'ensemble des arbres inventoriés se situait entre 15 et 20 m (tableau 1).

Au moment de l'éclaircie, les peuplements étaient âgés entre 40 et 60 ans (tableau 1). La majorité des sites à l'étude avaient, selon Plonski (1974), un indice de qualité de station (IQS) moyen ou supérieur. La surface terrière, qui était comprise entre 19 et 25 m²/ha (tableau 1), indiquait une densité moyenne à forte, selon Pothier et Savard (1998). Le pourcentage de prélèvement préconisé par le Ministère des Ressources naturelles du Québec (1997) pour l'exécution d'une éclaircie commerciale se situe entre 25 % et 35 % de la surface terrière marchande du peuplement initial. Lors du traitement, 28 % de la surface terrière du peuplement du site 05 a été prélevée, ce qui respectait la norme. Le prélèvement effectué sur le site 13, qui était de 20 %, était donc inférieur à la norme et celui du site 15, qui se situait à 42 %, était trop élevé (tableau 1). Aucune donnée était disponible pour le site numéro 20.

Suite à une éclaircie commerciale, la surface terrière marchande doit être égale ou supérieure à 15 m²/ha selon le Ministère des ressources naturelles du Québec (1997). Après le traitement, la surface terrière du site 05 était égale à 18 m²/ha et celle du site 13 se situait à 20 m²/ha (tableau 1), ce qui respectait la norme. Cependant, la valeur du site 15, qui était de 11 m²/ha, était inférieure à la surface terrière préconisée, ce qui signifie que l'éclaircie pratiquée était trop intense.

Il est possible, grâce au résultat du rapport diamètre final (df) sur le diamètre initial (di) présenté au tableau 1, de déduire si ce sont des arbres dominants qui ont été prélevés (résultat inférieur à la valeur unitaire), comme le peuplement du site 15 ou bien si c'est une partie des arbres des étages subordonnés qui a été supprimée (résultat supérieur à la valeur unitaire), comme c'est le cas du site 05. On peut de cette manière établir s'il s'agit d'une éclaircie par le bas, par le haut ou libre.

Tableau 1 : Description des sites sélectionnés

Site	Canton	Station		Superficie (ha)	Strate 2e inventaire décennal	Âge compté en 1997 (ans) ³	Hauteur dominante 1997 (m)	IQS Plonski	Traitement	Année	Âge (ans) ⁴	Peuplement initial		
												d _{moy} (cm)	N (tiges/ha)	G (m ² /ha)
05	La Pause	Sable	traité	12	Pg(Pg) C2 50 cp	63	20	18 sup	Prélèvement ⁵ = 28% Df/Dl = 1,09	1980	46	10,0 avant 10,9 après	3254 avant 1850 après	25 avant 18 après
			témoin		Pg(Pg) A3 50	60	19	17 sup						
13	Lavergne	Argile bien drainée	traité	355	Pg(Pg) C2 70 cb	75	19	16 moy	Prélèvement = 20% Df/Dl = 1,03	1972	50	13,6 avant 14,0 après	1705 avant ⁶ 1297 après	25 avant 20 après
			témoin		Pg(Pg) B2 70	72	20	17 sup						
15	Berry	Sable	traité	37	Pg(Pg) B2 70 cp	87	16	13 Inf	Prélèvement = 42% Df/Dl = 0,85	1973	63	14,0 avant 11,9 après	1322 avant 964 après	19 avant 11 après
			témoin		Pg(Pg) A3 70	87	20	16 moy						
20	Landrienne	Sable	traité	20	Pg(Pg) A2 70	76	18	15 moy	nd	1970	49	nd	nd	nd
			témoin		Pg(Pg) A2 50	42	15	17 sup						

³ Âge au niveau du sol

⁴ Âge au moment du traitement, établit selon l'année de traitement et l'âge compté en 1997

⁵ Selon des inventaires réalisés par le Ministère des Ressources naturelles lors de la réalisation des travaux d'éclaircie

⁶ Fraction marchande (dhp > 9cm)

2.4. Établissement des parcelles d'échantillonnage

Les parcelles d'échantillonnage, au nombre de une par site, avaient une superficie de 4 m de largeur par 150 ou 200 m de longueur, dépendamment de la densité du peuplement. Le nombre minimal de tiges était fixé à cent par parcelle. Les parcelles d'échantillonnage sur les sites éclaircis étaient positionnées perpendiculairement aux sentiers de débardage. Une extrémité de la parcelle était établie au centre du sentier de débardage, généralement à une distance de 25 m du chemin forestier (figure 4). Le positionnement des parcelles dans les peuplements témoins s'effectuait de façon aléatoire.

Les placettes étaient délimitées à l'aide d'une boussole, d'une chaîne de 50 m et de piquets de bois de 1,20 m de longueur. Un piquet était planté à tous les 50 m et identifié selon sa position (figure 4).

2.5. Inventaire et mesures des arbres

Toutes les tiges dont le diamètre à hauteur de poitrine (dhp) était supérieur à deux centimètres ont été inventoriées. Les coordonnées de chaque arbre étaient prises à l'aide de la chaîne, qui demeurait au sol au cours de l'inventaire, et d'une baguette graduée en décimètres. La coordonnée "X" était la distance entre le premier poteau de la placette de 50 m et l'arbre et la coordonnée "Y" était la plus courte distance entre le pied de l'arbre et la chaîne (figure 4).

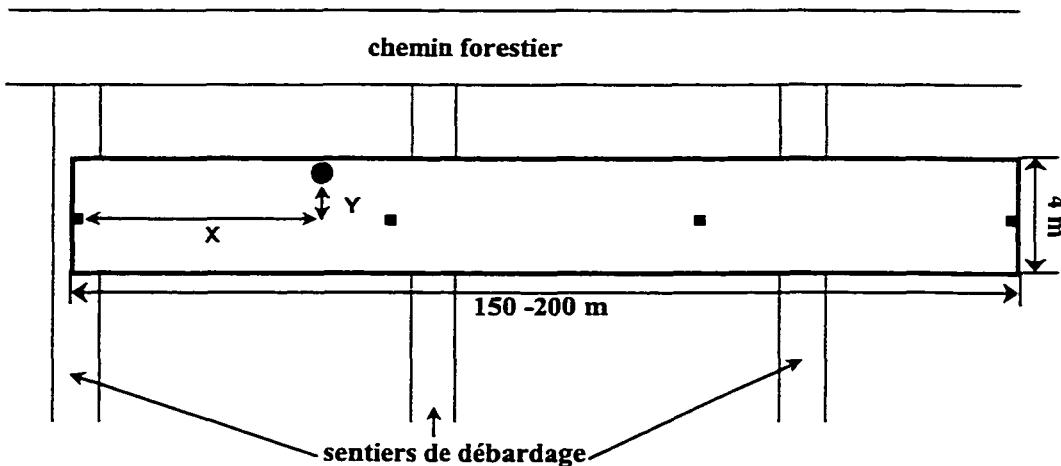


Figure 4: Positionnement des parcelles échantillons et procédure de la localisation des arbres inventoriés.

Chaque arbre inventorié était identifié à l'espèce et numéroté de façon séquentielle grâce à de la peinture fluorescente. Les arbres trop petits pour être peinturés étaient identifiés avec un ruban numéroté au feutre noir. Le dhp de chaque arbre était mesuré à l'aide d'un galon circonférenciel ou d'un pied à coulisse, au centimètre près.

Toutes les tiges inventoriées ont ensuite été classées selon un code décrivant leur état (tableau 2).

Tableau 2: Code d'état établi selon les normes des placettes permanentes du Ministère des Ressources naturelles du Québec (1992).

Code	État
10	vivant sur pied
12	vivant renversé
14	mort sur pied
24	chicot

La hauteur relative de chaque tige vivante sur pied était évaluée. Si l'arbre était d'une hauteur supérieure aux deux tiers de la hauteur dominante du peuplement, il était classé "S". Si l'arbre mesurait entre la moitié et le deux tiers de la hauteur dominante, il était classé "M". Si l'arbre était inférieur à la moitié de la hauteur dominante, il était classé "T". Cette classification s'inspire de celle adoptée par le Service de l'inventaire forestier du Ministère des Ressources naturelles du Québec (1992) sur l'étagement : la classe "S" comprend les étages dominants et codominants, "M" représente les intermédiaires et "T", les arbres opprimés.

2.6. Récolte des échantillons

Pour chaque parcelle, l'ensemble des tiges inventoriées était divisé en trois classes de dhp tenant compte des valeurs minimale et maximale observées. Dans chacune des classes, trois tiges étaient choisies de façon aléatoire. Sur chacun des sites à l'étude, les neuf arbres ont été abattus à l'aide d'une scie mécanique.

Une fois l'arbre abattu, la hauteur de la base du houppier ainsi que la hauteur totale de l'arbre étaient mesurées au décimètre près à l'aide d'une tige graduée fixée à la scie mécanique. La hauteur de la base du houppier était définie comme la hauteur du verticille dont au moins la moitié des branches étaient porteuses d'aiguilles vertes. Une section transversale de la tige était prélevée à tous les 30 cm à partir du niveau du sol jusqu'à 1,3 m et, par la suite, à tous les mètres jusqu'à un diamètre d'environ deux centimètres. Chacune des sections recueillies était numérotée selon le site, l'arbre et la hauteur de la coupe. Tous les échantillons étaient transportés et entreposés dans des poches de jute.

2.7. Travaux de laboratoire

L'analyse de tige est la méthode la plus directe et précise pour étudier la croissance et le développement des arbres (Zarnovican 1985). Elle permet notamment de distinguer l'effet des éclaircies sur l'accroissement en volume et la forme de la tige des arbres traités.

Les sections récoltées étaient séchées et finement poncées de manière à rendre les cernes de croissance visibles. Les cernes annuels étaient dénombrés sous une loupe binoculaire suivant deux rayons opposés. Lorsque l'excentricité ou l'asymétrie de la rondelle exigeait quatre rayons, ces derniers étaient disposés sous forme de croix, dont le premier axe était décalé de 22,5 degrés par rapport au plus grand diamètre (Siostrzonek 1958 dans Zarnovican 1985). La largeur des cernes était mesurée à l'aide du système *WinDENDRO™* avec une précision de $\pm 0,01$ mm (Guay *et al.* 1992).

Certaines tiges faisant partie de l'échantillonnage initial ont été exclues de l'analyse. Ainsi, les arbres 29 et 44 du site Tem-13 et le numéro 14 du site Ecl-13 ont été

malencontreusement égarés. Les épinettes (*Picea sp.*), qui étaient en nombre insuffisant, et le peuplement témoin numéro 20, qui s'est avéré plus jeune que le peuplement traité auquel il était associé, n'ont pas été considérés lors du traitement des données.

2.8. Traitement des données

2.8.1. Interdatation

Afin de détecter les erreurs éventuelles de synchronisation entre les cernes de croissance mesurés sur les différentes sections de la tige, une interdatation visuelle des courbes d'accroissement radial a été effectuée sur table lumineuse (Schweingruber 1988), puis vérifiée à l'aide du logiciel *Cofecha* (Holmes 1983). Cette analyse statistique a permis de vérifier si chaque échantillon démontrait une corrélation acceptable avec la courbe moyenne.

Le rayon, le diamètre, la surface terrière, la hauteur, le volume total et le dhp ont ensuite été calculés à l'aide du logiciel *WINGTIGEST™* (Guay *et al.* 1992).

2.8.2. Analyses statistiques

Les analyses statistiques ont été effectuées à l'aide du logiciel *SYSTAT* avec un seuil d'erreur de type I se situant à $\alpha = 0,05$ (SYSTAT 1992).

2.8.3. Analyse de l'accroissement en volume

Accroissement relatif en volume (ARV)

Pour permettre une analyse statistique, les accroissements en volume ont dû être transformés en valeurs relatives afin que les tiges de tailles différentes soient comparables. En effet, d'importantes différences d'accroissement ont été observées entre les échantillons avant l'éclaircie, ce qui rendait difficile la comparaison de la réponse des arbres au traitement. L'accroissement relatif en volume a été calculé pour les dix années qui ont précédé et suivi le traitement en utilisant la formule suivante :

$$ARV_t = \frac{Accvol_{t=i}}{Accvol_{t=0}}$$

Où *Accvol = accroissement en volume*
t = année exprimée par rapport à l'année du traitement (-9 ≤ i ≤ 10)

Une analyse de variance à mesures répétées (ANOVAR) a été effectuée sur la moyenne de l'ARV des arbres par site, avant et après traitement (Moser *et al.* 1990). Cette manière de procéder élimine le problème d'absence d'indépendance des erreurs entre les tiges d'un même site.

Un graphique comprenant la moyenne des ARV par peuplement éclairci et un intervalle de confiance associé à la moyenne de l'ensemble des tiges témoins en fonction du

temps a été réalisé afin de voir les différences de comportement entre les peuplements suite à l'éclaircie.

Estimation des gains

Pour traduire les gains d'accroissement relatif en accroissement en volume total (dm³/tige), la procédure suivante a été effectuée pour chaque peuplement éclairci:

- 1) La moyenne des accroissements relatifs en volume de chaque site traité (ACCRELmoy) a été calculée pour la décennie suivant l'éclaircie.
- 2) La moyenne des accroissements en volume de toutes les tiges et le volume moyen par tige ont aussi été calculés au moment de l'éclaircie (ACCt = 0).
- 3) Les ACCRELmoy ont ensuite été multipliés par les ACCt = 0 afin d'obtenir les accroissements en volume de chaque site pour chacune des dix années suivant l'éclaircie (ACCt = t).
- 4) Les ACCt = t ont été additionnés au volume moyen au moment de l'éclaircie pour donner le volume total (VTecl).
- 5) Les étapes 1 à 4 ont été répétées en utilisant les valeurs de la moyenne des accroissements relatifs en volume de l'ensemble des témoins. Cette étape a permis de simuler une absence de traitement et d'obtenir des volumes finaux pour les mêmes peuplements (VTtem).
- 6) L'ampleur des gains a été évaluée pour chaque site éclairci selon la formule suivante:

$$\text{Gain (\%)} = \frac{VTecl - VTtem}{VTtem}$$

Indice de réponse relative (IRR)

Un indice de réponse relative (IRR) a été défini de la manière suivante :

$$IRR = \frac{ARV_{\text{après}}}{ARV_{\text{avant}}}$$

Où $ARV_{\text{après}} = \text{accroissement décennal en volume après éclaircie}$
 $ARV_{\text{avant}} = \text{accroissement décennal en volume avant éclaircie}$

L'IRR est un indice simple pour synthétiser la réponse des tiges à l'éclaircie. Plus l'IRR est élevé, plus la réponse est forte. Une valeur unitaire indique une absence de réaction à l'éclaircie.

Cote Z

La cote Z a été utilisée comme mesure relative de la taille des individus issus de populations d'amplitude différente. La cote Z du dhp des tiges au moment de l'échantillonnage se calcule comme suit :

$$Z = \frac{x - \text{moy}}{s}$$

Où $x = \text{dhp de l'arbre}$
 $\text{moy} = \text{moyenne des dhp du site}$
 $s = \text{écart-type des dhp du site}$

Un graphique de l'IRR en fonction de la cote Z a été réalisé pour les arbres traités et témoins afin de voir la réaction des arbres en fonction de leur taille relative. La signification des différentes courbes de régression de ce graphique a été vérifiée afin

d'ajuster le meilleur modèle, soient constant, linéaire ou quadratique. Pour comparer les régressions entre les tiges traitées et témoins et vérifier si les différences observées sont significatives, un test de F a été effectué en utilisant la méthode décrite par Mead et Curnow (1983). Les résultats obtenus ont été comparés aux valeurs critiques de la Table F dans Scherrer (1984).

2.8.4. Analyse de la réponse du houppier

Longueur relative du houppier (LRH)

La longueur relative du houppier au moment de l'échantillonnage a été calculée à l'aide de la formule qui suit :

$$LRH (\%) = \frac{H_{totale} - H_{houppier}}{H_{totale}}$$

Où H_{totale} = Hauteur totale de l'arbre (mètres) (figure 5)
 $H_{houppier}$ = Hauteur de la base du houppier (mètres) (figure 5)

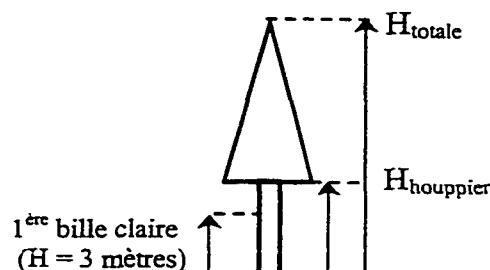


Figure 5: Hauteur des différents paramètres utilisés.

Une moyenne de l'ensemble des arbres traités et des témoins a été effectuée, suivie d'une analyse de variance (Moser *et al.* 1990).

2.8.5. Analyse de la forme de la tige

Profil de tige

Les répartitions de l'accroissement radial décennal avant et après traitement en fonction de la hauteur relative ont été comparées pour les tiges traitées et témoins. Pour permettre la comparaison d'arbres de taille différente, les valeurs de hauteurs et d'accroissement ont été exprimées de manière relative, suivant la procédure employée par Assman (1970, p.61).

La hauteur relative moyenne (H_{rel}) de tous les arbres traités et témoins a été calculée pour la décennie qui a précédé et suivi l'éclaircie selon la formule suivante :

$$H_{rel_{avant}} = \frac{H_j}{H_{totale\ t=0}}$$

$$H_{rel_{après}} = \frac{H_j}{H_{totale\ t=10}}$$

Où H_j = hauteur de la section j
 $H_{totale\ t=10}$ = hauteur totale de la tige 10 ans après l'éclaircie

L'accroissement relatif moyen en diamètre (ADREL) des arbres traités et des témoins a été calculé pour la décennie avant et après le traitement, comme suit :

$$ADREL_{avant_H} = \frac{\sum_{t=-9}^0 ADdavant_h}{\sum_{t=-9}^0 ADdavant_{1,3}}$$

$$ADREL_{après_H} = \frac{\sum_{t=1}^{10} ADdaprèst_h}{\sum_{t=-9}^0 ADdavant_{1,3}}$$

Où $ADdavant_h$ = Accroissement décennal en diamètre à la hauteur h avant éclaircie
 $ADdaprèst_h$ = Accroissement décennal en diamètre à la hauteur h après éclaircie
 $ADdavant_{1,3}$ = Accroissement décennal en diamètre à 1,3m avant éclaircie

Coefficient de décroissance(CD)

Le coefficient de décroissance du premier billon (situé entre 0,3 et 3 m sur la tige) pour les dix années qui ont précédé et suivi l'éclaircie a été calculé en utilisant la formule suivante (Rondeux 1993) :

$$CD = \frac{Diamètre à H=3 \text{ mètres}}{Diamètre à H=0,3 \text{ mètre}}$$

Le diamètre à trois mètres a été utilisé pour ce calcul puisque la première bille claire a été fixée arbitrairement à cette hauteur (figure 5). Si le résultat obtenu est près de la

valeur 1, alors les arbres présentent une forme cylindrique, ayant un faible défilement. Si les valeurs obtenues sont inférieures à la valeur unitaire alors la tige présente la forme d'un néloïde ou d'un tronc de cône.

Afin de voir la réponse des arbres traités et témoins, un graphique de la moyenne du CD en fonction du temps a été réalisé. Une analyse de variance à mesures répétées a été effectuée sur la moyenne du CD des arbres par site, avant et après éclaircie (Moser *et al.* 1990).

Approximation du rendement en volume de sciage

Une approximation du rendement en volume de sciage dix ans après éclaircie a été effectuée en utilisant le coefficient de décroissance. On a supposé que le volume en bois de sciage correspondait au volume d'un cylindre de trois mètres de long ayant un diamètre égal au diamètre au fin bout, et que le volume marchand de la tige était celui d'un tronc de cône de même longueur (figure 6). Voici le ratio qui a été utilisé pour réaliser cette comparaison :

$$\text{Rendement sciage} = \frac{\text{Volume sciage}}{\text{Volume marchand}}$$

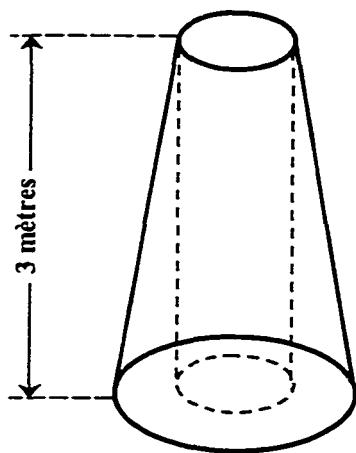


Figure 6 : Estimation du coefficient de décroissance.

CHAPITRE III

RÉSULTATS

3. Résultats

3.1. Accroissement en volume

3.1.1. Variation de la réponse par peuplement

La figure 7 présente la moyenne de l'accroissement en volume des tiges traitées et témoins au cours des décennies précédant et suivant l'éclaircie. La transformation des données en accroissement relatif en volume a permis de ramener les tiges traitées et témoins à des niveaux comparables avant traitement. L'analyse de variance n'a pas permis de déceler de différences significatives entre les peuplements éclaircis et témoins au cours de la décennie qui a précédé l'éclaircie, le niveau de probabilité d'erreur étant de $p = 0,4793$. L'analyse de variance a cependant démontré que, pendant les dix années qui suivirent l'éclaircie, les tiges traitées avaient en moyenne un accroissement relatif en volume significativement plus élevé que les tiges témoins ($p = 0,0341$; tableau 3). L'analyse indique aussi que les courbes d'accroissement ont une tendance linéaire presque significative ($p = 0,0584$) et que le contraste quadratique et les niveaux supérieurs ne sont pas significatifs (tableau 3).

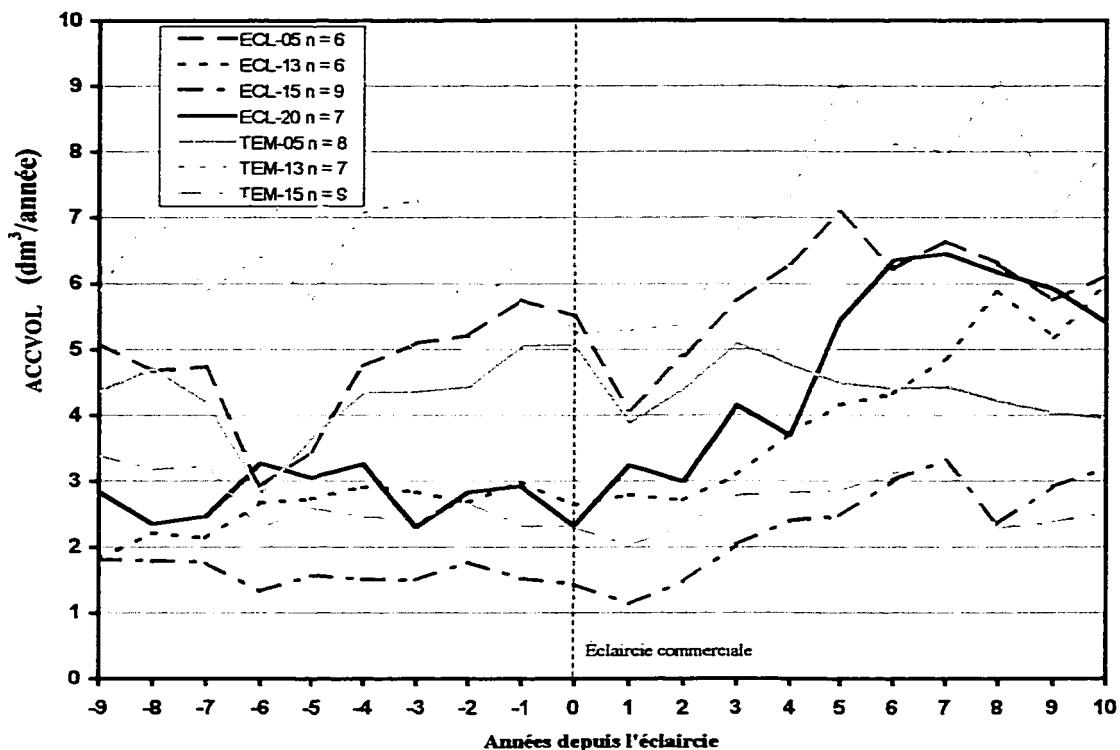


Figure 7: Courbes moyennes de l'accroissement en volume (ACCVOL) des pins gris provenant des peuplements éclaircis et témoins.

Tableau 3: Résultats de l'analyse de variance à mesures répétées de l'accroissement relatif en volume de la décennie après l'éclaircie.

Source	d.l.	S.C.E.	S.C.M.	F	P	P _{H-F}
Analyse intergroupe						
trait	1	6,8780	6,8780	2,9490	0,1466	
erreur	5	11,6615	2,3323			
Analyse intragroupe						
temps	9	5,2143	0,5794	6,5065	0,0028	
temps x trait	9	2,7656	0,3073	3,4509	0,0341	
contrastes						
linéaire		2,5643	2,5643	5,9717	0,0584	
quadratique		0,0391	0,0391	0,4279	0,5419	
erreur	45	4,0070	0,0890			

d.l. : degré de liberté

S.C.E. : somme des carrés d'écart

S.C.M. : somme des carrés moyens

P_{H-F} : probabilité corrigée selon Huynh-Feldt (Moser *et al.* 1990)

Lorsque les différences observées sont traduites en différences en volume absolu, on obtient un gain moyen par tige de 10 %. Il faut cependant noter que cette valeur varie grandement entre les peuplements, les valeurs oscillant de 0,27 % à 26,4 % (tableau 4).

Tableau 4: Gain en volume pour les dix années après l'éclaircie des tiges de pins gris traités.

Site	Ecl-05	Ecl-13	Ecl-15	Ecl-20
Gain (%)	0,27	9,37	11,62	26,40

Afin d'être en mesure d'observer le comportement des différents peuplements, les courbes d'accroissement en volume de chaque site éclairci ont été comparées à l'intervalle de confiance associé à la courbe moyenne de toutes les tiges témoins (figure 8). Avant traitement, toutes les courbes représentant les peuplements traités se situaient dans l'intervalle de confiance des témoins. Suite à l'éclaircie, il est possible de distinguer trois patrons de croissance. Un premier comportement est l'absence de réaction suite au traitement : c'est le cas du peuplement Ecl-05. Un second patron correspond à un délai de deux à cinq ans sans réponse significative des arbres, suivi d'une période où l'accroissement en volume augmente de manière plus ou moins linéaire, comme chez les arbres des sites Ecl-13 et Ecl-15. Finalement, le peuplement Ecl-20 réagit immédiatement et fortement à l'éclaircie : l'augmentation de l'accroissement en volume culmine environ sept ans après traitement, pour ensuite diminuer au cours des trois années suivantes.

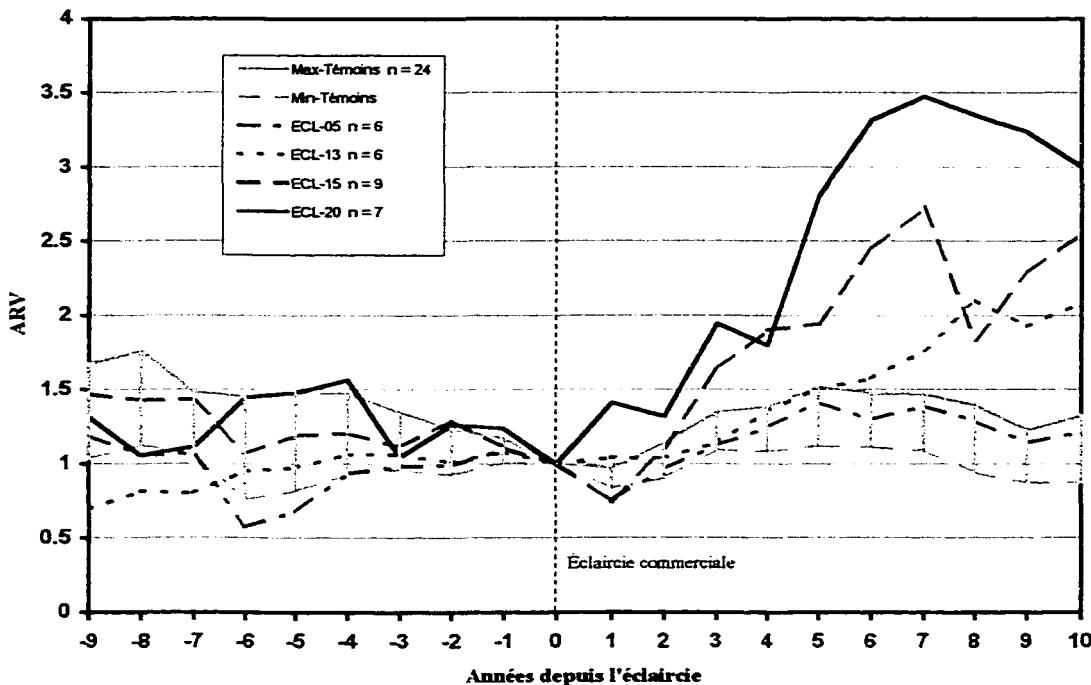


Figure 8: Courbe de l'accroissement relatif en volume (ARV) des pins gris provenant des peuplements éclaircis en comparaison à l'intervalle de confiance déterminé par les arbres témoins.

3.1.2. Réponse en fonction de la taille relative des tiges

La figure 9 présente l'intensité de la réponse relative (IRR) de tous les arbres traités et témoins selon leur taille relative, exprimée par la cote Z. On considère que les petites tiges ont une cote Z inférieure à -0,5, celles de taille moyenne sont incluses dans l'intervalle entre -0,5 et 0,5 et que les grandes tiges présentent une cote Z supérieure à 0,5.

Après vérification de la signification des paramètres des courbes de régression, le modèle quadratique (polynomiale du deuxième degré) a été retenu. La comparaison des courbes de régression a révélé que le rapport F obtenu, qui est égal à 10,09, est supérieur à la valeur de $F_{(3, 46; 0,01)} = 4,31$. On conclut donc que les courbes sont très significativement différentes.

Au moment de l'éclaircie, les arbres ont présenté des réactions différentes selon le traitement et leur taille relative (figure 9). De façon générale, l'IRR des témoins oscille autour de la valeur unitaire, ce qui indique une absence de réaction. Les tiges de grande taille semblent croître davantage que celles de moyenne et de petite dimension. Tous les arbres de taille inférieure à la moyenne présentent une réponse négative, tandis qu'au-dessus de la moyenne, la réponse s'accentue en fonction de la taille des individus. Ceci indique qu'au cours des dix années qui ont suivi l'éclaircie, les tiges témoins de petite et moyenne taille ont subi une diminution de l'accroissement en volume, tandis que les grands individus ont accusé une augmentation de l'accroissement. Les arbres provenant des peuplements éclaircis démontrent un indice de réponse relative égal ou supérieur à 1, ce qui confirme que les tiges ont réagi au traitement (figure 9). En moyenne, la valeur de l'IRR des arbres traités est pratiquement le double de celle observée chez les témoins. Les arbres traités de grandes dimensions semblent être moins affectés par le traitement que les tiges de taille inférieure à la moyenne. L'éclaircie semble avoir provoqué une augmentation à la fois de la moyenne et de la variance de l'IRR pour les petites tiges (figure 9).

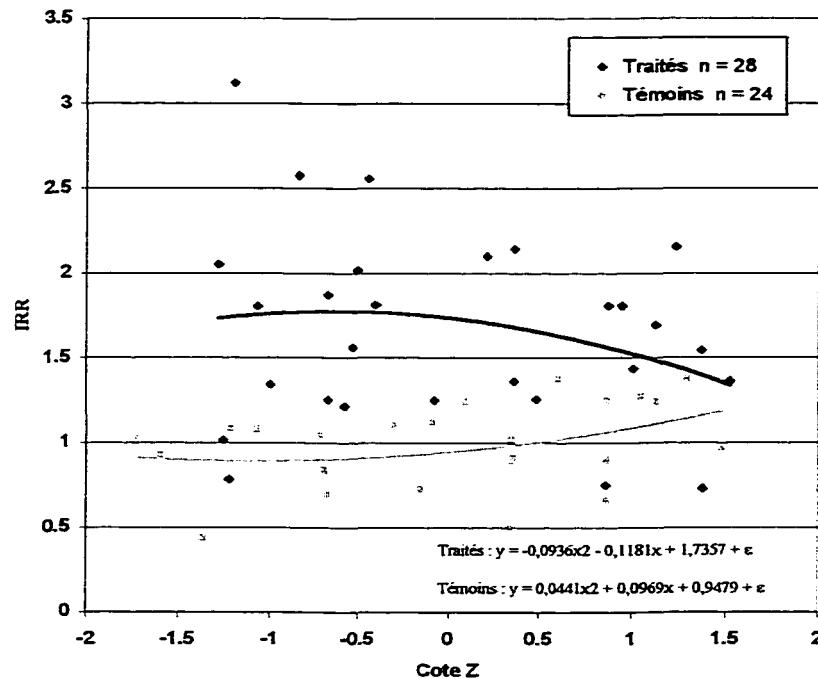


Figure 9 : Indice de réponse relative (IRR) des pins gris traités et témoins en fonction de leur taille relative estimée par la cote Z de leur dhp (y = valeur estimée).

3.2. Réponse du houppier

3.2.1. Longueur relative du houppier

La longueur relative du houppier de l'ensemble des arbres provenant des peuplements traités a été comparée à celle des peuplements témoins (tableau 5). Le houppier des arbres traités est en moyenne plus long que celui des témoins, mais cette

différence n'est que de 7 %. Elle a malgré tout été jugée significative par l'analyse de variance ($F = 6,8330$; $p = 0,0119$).

Tableau 5: Longueur relative du houppier des pins gris traités et témoins

	Arbres traités	Arbres témoins
Effectif (n)	28	23
Moyenne (%)	34,36	27,43
Écart-type	10,00	8,21

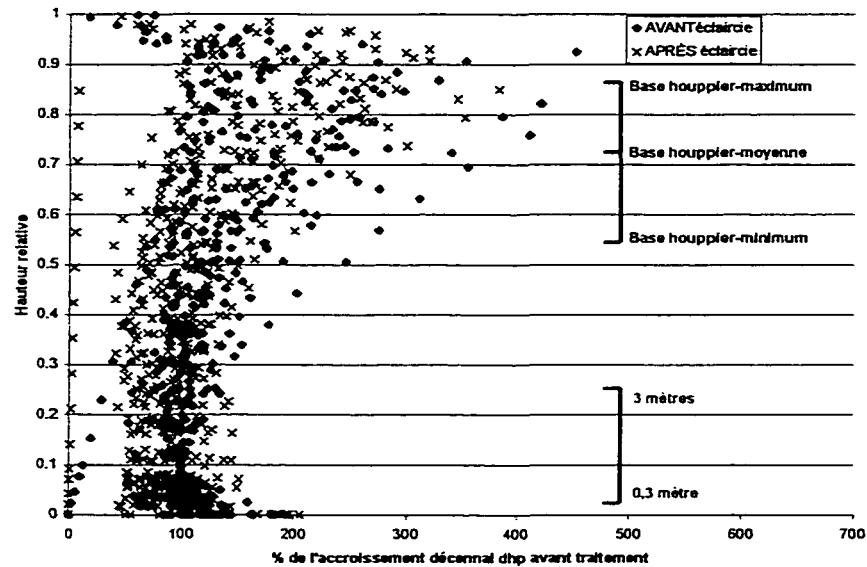
3.3. Forme de la tige

3.3.1. Profil de tige

Les figures 10a et 10b présentent la distribution de l'accroissement radial décennal avant et après éclaircie des arbres témoins et traités. À titre indicatif, les valeurs minimales, moyennes et maximales de la base du houppier mesurées en 1997 ont été situées par rapport à la hauteur relative des tiges. Les hauteurs 0,3 et 3 m, qui ont été utilisées pour calculer le coefficient de décroissance, ont aussi été identifiées sur ces figures.

En absence de traitement, les arbres présentaient une meilleure croissance dans la partie supérieure de leur tige, l'accroissement augmentant progressivement avec la hauteur relative à partir de 0,1 (figure 10a). Après éclaircie, la croissance de plusieurs arbres traités était plus élevée et plus variable dans le tiers inférieur de leur tige (figure 10b).

a) arbres témoins



b) arbres traités

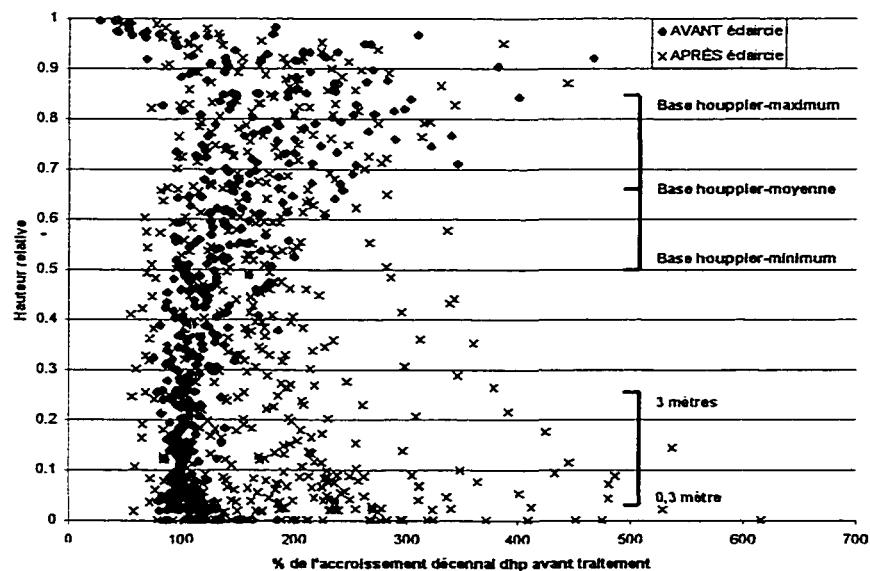


Figure 10: Répartition de l'accroissement radial décennal en fonction de la hauteur, avant et après traitement.

3.3.2. Coefficient de décroissance du premier billon

La figure 11 présente le résultat de la moyenne du coefficient de décroissance de tous les arbres des sites analysés. Rappelons que des valeurs unitaires signifient que la tige est cylindrique et, en deçà de ce seuil, qu'elle tend à avoir la forme d'un néloïde ou d'un tronc de cône. Une échelle variant entre 0,76 et 0,98 a été utilisée pour la réalisation de ce graphique, ce qui correspond à l'amplitude des valeurs observées.

On peut constater que pendant la décennie qui a précédé le traitement, les arbres traités et témoins présentaient sensiblement le même coefficient de décroissance (figure 11). Cette observation a été vérifiée par l'analyse statistique qui n'a révélé aucune différence significative dans le temps et selon le traitement ($p = 0,3701$).

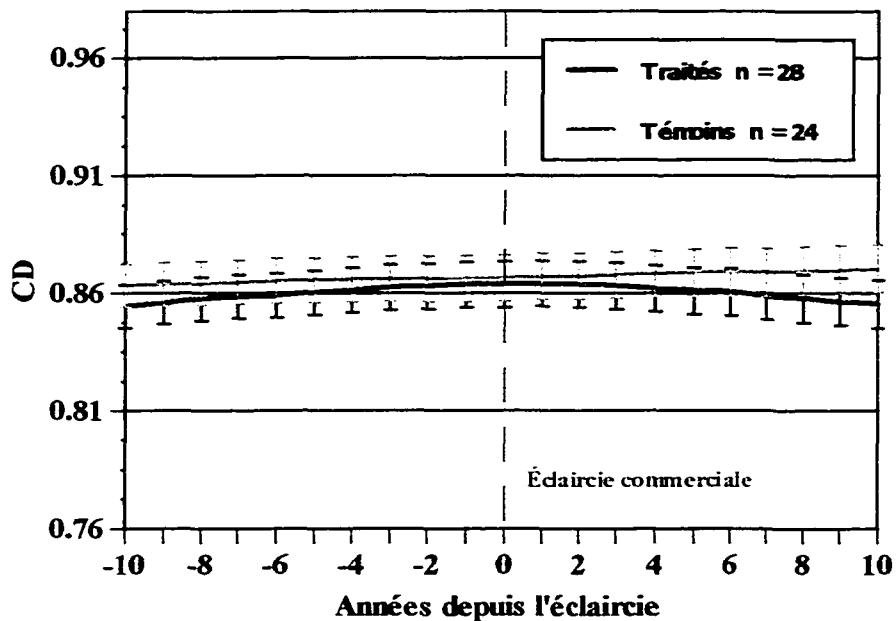


Figure 11: Courbe moyenne du coefficient de décroissance (CD) des tiges provenant des peuplements éclaircis et témoins (Les barres verticales sur les courbes représentent les erreurs-types).

On remarque qu'en absence de traitement, les tiges ont tendance à devenir légèrement plus cylindrique, comme le montre l'augmentation du coefficient de décroissance avec le temps (figure 11).

Après éclaircie, les arbres traités tendent à prendre davantage la forme d'un néoïde ou d'un tronc de cône (figure 11). La différence de décroissance observée entre les tiges témoins et traitées a été jugée significative selon l'analyse de variance dont $p = 0,0079$ (tableau 6). L'analyse de variance intragroupe après éclaircie a également démontré que le contraste linéaire est le seul qui soit significatif ($p = 0,0381$; tableau 6). Cette différence est

cependant relativement faible, puisqu'après dix ans, le coefficient de décroissance utilisant le diamètre au fin bout est en moyenne de 0,855 pour les arbres traités et de 0,870 pour les témoins. Cette faible différence n'affecte pas de manière sensible le rendement de bois sciage, ce dernier étant évalué à 85 %.

Tableau 6: Résultats de l'analyse de variance à mesures répétées du coefficient de défilement de la décennie après l'éclaircie.

Source	d.l.	S.C.E.	S.C.M.	F	P	P_{H-F}
Analyse intergroupe						
trait	1	0,0016	0,0016	0,1914	0,6800	
erreur	5	0,0411	0,0082			
Analyse intragroupe						
temps	10	0,0001	0,0000	1,4152	0,2773	
temps x trait	10	0,0003	0,0000	5,7574	0,0079	
contrastes						
linéaire		0,0003	0,0003	7,8258	0,0381	
quadratique		0,0000	0,0000	0,5179	0,5039	
erreur	50	0,0003	0,0000			

d.l. : degré de liberté

S.C.E. : somme des carrés d'écart

S.C.M. : somme des carrés moyens

P_{H-F} : probabilité corrigée selon Huynh-Feldt (Moser *et al.* 1990)

CHAPITRE IV

DISCUSSION

4. Discussion

4.1. Analyse de l'accroissement en volume

De façon générale, les résultats démontrent que l'éclaircie commerciale a produit une accélération significative de la croissance des tiges de pin gris. La comparaison de la moyenne de l'accroissement décennal en volume avant et après traitement a permis de constater que l'éclaircie avait presque doublé l'accroissement en volume au cours des dix premières années suivant le traitement.

On constate cependant une grande variabilité du gain en volume chez les arbres traités (tableau 5). En effet, les tiges du site Ecl-05 affichaient un gain en volume pratiquement nul, celles provenant des sites Ecl-13 et Ecl-15 avaient une moyenne de 10 %, tandis que les arbres du peuplement Ecl-20 présentaient un gain moyen d'environ 26 %. La moyenne du gain en volume pour l'ensemble des tiges traitées était donc équivalente à 10 %. Des résultats similaires ont été obtenus par Smith et Oerlemans (1988) lors de leur étude sur la croissance de pins gris âgés de 45 ans au moment d'une éclaircie commerciale en bandes, où 45 % de la surface terrière a été récoltée. Dix ans après le traitement, les arbres traités avaient un gain en volume marchand se situant à environ 11 %. D'autres recherches ont été effectuées sur les effets des éclaircies commerciales, mais les résultats différaient de ceux obtenus. Ainsi, Groot *et al.* (1984) ont réalisé une étude portant sur les effets d'une éclaircie par le bas de faible intensité (20 % de la surface terrière) sur un

peuplement de pin gris âgé de 45 ans. Aucune différence significative de l'accroissement en volume entre les arbres traités et témoins n'a été constatée. Lors de leur expérimentation portant sur les effets des éclaircies par le haut et par le bas sur des pins gris âgés de 40 ans, Bella et DeFranceschi (1974) ont obtenus des données d'accroissement en dhp. Un gain de 29 % en moyenne a été observé pour des éclaircies par le bas de forte intensité et un gain de 61 % pour de fortes éclaircies par le haut.

La comparaison de l'accroissement relatif en volume des tiges traitées à l'intervalle de confiance associé aux arbres témoins a permis de constater que le patron de réponse à l'éclaircie varie d'un peuplement à l'autre (Figure 9). En effet, il a été possible d'observer trois patrons de croissance entre les peuplements. Le comportement des arbres du site Ecl-20 s'est traduit par une réaction immédiate et très forte au traitement, suivant une tendance quadratique. Les peuplements Ecl-15 et Ecl-13 ont réagi moyennement de façon plus ou moins linéaire, après un délai respectif de deux et cinq ans. Aucun changement ne s'est manifesté chez les arbres du site Ecl-05.

Il est toutefois important de conserver une certaine prudence face à la portée des résultats puisque l'effectif était faible ($N = 4$), l'information disponible sur les conditions initiales des peuplements était partielle et il manquait un témoin associé au site ECL-20. De plus, le site ECL 20 présentait, après l'éclaircie, un comportement très différent des autres peuplements, ce qui a sûrement eu un impact marqué sur la moyenne et l'analyse statistique (ANOVAR). Le site ECL-20 a néanmoins été retenu pour l'analyse puisque son

comportement avant l'éclaircie était comparable à celui des autres peuplements (figures 6 et 7). De plus, son âge et son IQS au moment du traitement étaient similaires (tableau 1).

Quelques hypothèses ont été posées pour tenter d'expliquer la diversité des réponses face au traitement. On a supposé que ces variations étaient liées à des âges différents lors de l'éclaircie, à la productivité ou à l'intensité du prélèvement. Après vérification et comparaison des peuplements, aucune de ces hypothèses n'a pu être retenue. En effet, au moment du traitement, tous les peuplements à l'étude avaient environ une cinquantaine d'années (tableau 1), ce qui correspond à l'âge préconisé par le Ministère des Ressources naturelles du Québec (1997) pour exécuter une éclaircie commerciale. Ensuite, la vigueur des arbres, qui était estimée à l'aide de l'indice de qualité du site (IQS ; tableau 1), ne semble pas avoir influencé leur réaction. En effet, même si la valeur de l'IQS pour les différents peuplements à l'âge de 50 ans variait entre 13 et 18 m, aucune corrélation ne peut être établi avec l'intensité de leur réponse. On constate notamment que le peuplement Ecl-05, qui avait l'IQS le plus élevé, n'a pas réagi au traitement. Finalement, il n'y a pas de relation claire entre le pourcentage de prélèvement (tableau 1), qui était différent pour chaque peuplement, et la réponse des tiges. En effet, les arbres des peuplements Ecl-13 et Ecl-15, qui ont subi différentes intensités d'éclaircies, ont réagi moyennement suite au traitement.

La réaction des tiges a varié en fonction de leur taille relative. De façon générale, les tiges témoins ont un indice de réponse relative égal ou inférieur à la valeur unitaire, ce

qui indique que l'accroissement en volume s'est maintenu dans le temps (figure 9). Les arbres de forte taille relative ont un indice plus élevé que les arbres de dimension inférieure, ce qui montre que l'accroissement augmente avec le temps pour ces arbres. Par contre, l'éclaircie semble modifier ce patron. En effet, la plupart des arbres traités ont un indice de réponse relative égal ou supérieur à 1, ce qui indique que les tiges ont réagi au traitement (figure 8). Les arbres de petite et de moyenne taille relative réagiraient davantage à l'éclaircie que les grosses tiges. Les résultats retrouvés dans la littérature diffèrent d'une étude à l'autre. Entre autres, les réponses obtenues par Bella et De Franceschi (1974) semblent confirmer ces résultats. En effet, les arbres de diamètre moyen présentent un accroissement en diamètre plus élevé que les tiges de taille supérieure. Tandis que dans Smith et Oerlemans (1988), les arbres de toutes les classes de dhp ont réagi avec sensiblement la même intensité au traitement. Groot *et al.* (1984) n'ont obtenu aucune réponse significative d'accroissement en volume parmi l'ensemble des classes de diamètre. Ces variations d'accroissement sont peut-être dues au type ou aux différentes intensités d'éclaircie pratiquées. Ainsi, dans l'étude de Bella et De Franceschi (1974) des éclaircies fortes par le bas et par le haut ont été réalisées comme dans le cas présents. Smith et Oerlemans (1988) ont effectué une éclaircie de forte intensité, mais en bandes, alors que Groot *et al.* (1984) ont réalisé une éclaircie par le bas, mais de faible intensité.

Le patron de réponse obtenu pour les tiges traitées de moyenne et de grande taille relative s'apparente à celui observé par Aussénac *et al.* (1982). Ils ont démontré que le gain d'accroissement après une éclaircie systématique dépend de la classe de circonférence des

arbres. Les intermédiaires traités ont présenté un plus grand accroissement en circonférence que les témoins, tandis que chez les arbres dominants, cet écart du gain d'accroissement entre les traités et les témoins était moindre. La structure du houppier pourrait expliquer en grande partie ces différences d'accroissement. Ainsi, la masse foliaire des arbres dominants, qui est déjà presque entièrement exposée à la lumière, n'est que faiblement affectée par l'ouverture du couvert. Tandis que les intermédiaires, qui ont un houppier bien développé mais en majorité caché de l'éclairement, sont en mesure suite à l'éclaircie d'augmenter davantage leur production photosynthétique. Selon Aussénac *et al.* (1982), les arbres opprimés, qui devraient être très favorisés par l'ouverture du couvert forestier, ont une masse foliaire trop faible pour qu'une différence en accroissement soit présente dès la première année, ce qui expliquerait leur faible réponse à l'éclaircie. À première vue, les observations de la présente étude ne semblent toutefois pas appuyer cette hypothèse, puisqu'une réponse positive et significative a été obtenue de la part des arbres de petite taille relative. Si l'éclaircie réalisée est une éclaircie par le bas, il est possible que les arbres opprimés aient été éliminés. Dans ce cas, les sujets les plus petits de la présente étude seraient majoritairement des sujets intermédiaires (avec une certaine proportion d'opprimés), possiblement capables de réagir à l'éclaircie. Il est possible que cette différence dans les résultats obtenus soit aussi d'ordre spécifique puisque l'étude de Aussénac *et al.* (1982) a été réalisée sur des tiges de sapin de Douglas (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco). Un biais dans la méthodologie de la présente étude est une autre cause possible des différents résultats obtenus concernant les arbres de petite taille. En effet, la représentation des opprimés a peut-être été faussée puisque la majorité des arbres

de petite taille inventoriés étaient des épinettes noires, tandis que l'analyse complète a été effectuée seulement sur des pin gris. Par conséquent, les tiges de petite taille relative sont peut-être suffisamment grosses pour être comparées aux arbres intermédiaires dont Aussénac *et al.* (1982) font mention.

L'analyse de la variation des réponses des tiges en fonction de leur taille relative (figure 9) suggère que les peuplements sont dans une situation de compétition asymétrique où les grands individus ont un accès prioritaire et disproportionné aux ressources (Weiner et Thomas 1986). Ainsi, les différentes réactions des tiges s'expliqueraient par le fait que, après éclaircie, les arbres subordonnés tiraient un plus grand profit de la disponibilité accrue de la lumière, des nutriments et de l'eau du sol. Les grosses tiges réagissaient moins puisqu'elles avaient déjà la possibilité de se procurer les ressources nécessaires à une bonne croissance. Le type d'éclaircie pratiquée aurait par conséquent une influence sur la réponse moyenne des arbres. En effet, l'analyse du diamètre moyen avant et après coupe laisse entendre que le type de traitement effectué n'était pas le même pour tous les sites. Ainsi, le site Ecl-05 aurait subi une éclaircie qui augmente le dhp moyen puisque son rapport Df/Di est supérieur à la valeur unitaire, tandis que le site Ecl-15 aurait subi une éclaircie qui diminue le dhp moyen étant donné que son rapport Df/Di indique un résultat inférieur à un (tableau 1). Alors, les traitements qui tendent à préserver les arbres dominants susciteraient probablement moins de réaction chez les arbres résiduels qu'une éclaircie qui effectue une récolte dans l'ensemble des classes de diamètre.

4.2. Analyse de la réponse du houppier et de la forme des tiges

L'éclaircie commerciale semble modifier le profil des tiges puisque plusieurs arbres traités présentaient une croissance en diamètre plus accentuée à leur base comparativement aux témoins, dont la croissance maximale était située, pour la plupart des sujets, au sommet de leur tige (figures 10a et 10b).

Ces résultats concordent avec ceux de certaines études déjà publiées. En effet, Guttenberg a démontré que la distribution de l'accroissement en diamètre sur la tige de vieilles épinettes de Norvège (*Picea abies* L.), suite à une éclaircie de forte intensité, s'est déplacée vers la partie inférieure de la tige (Assman 1970). De plus, selon l'étude de Thomson et Barclay (1984) réalisée en Colombie-Britannique, l'éclaircie commerciale a modifié la distribution de la croissance le long de la tige des sapins de Douglas (*Pseudotsuga menziesii* Mirb.) en augmentant l'évasement de la souche chez les arbres de petite taille. Une autre étude réalisée en Suède a révélé que, après la première année suivant une éclaircie commerciale chez *Pinus sylvestris* L., l'accroissement annuel radial était plus élevé pour le premier tiers à la base de la tige (Valinger 1992). Toutefois, la largeur des cernes chez le pin à encens (*Pinus taeda* L.) ayant subi une éclaircie a augmentée pratiquement partout à l'intérieur de la tige, cette hausse ayant perduré pendant 12 ans (Tasissa et Burkhart 1997).

Les résultats de recherches concernant des éclaircies pré-commerciales et commerciales ont démontré la relation qui existe entre la longueur du houppier (tableau 5) et le défilement de la tige (figure 11). En effet, Barbour *et al.* (1992) ont observé chez les épinettes rouges (*Picea rubens* Sarg.), suite à une éclaircie pré-commerciale effectuée en Nouvelle-Écosse quinze ans auparavant, que le houppier était plus long et le défilement supérieur chez les tiges des peuplements éclaircis. Selon Thomson et Barclay (1984), une éclaircie commerciale forte diminue l'élagage naturel à la base du houppier. Après traitement, la lumière peut davantage pénétrer dans le peuplement et les branches inférieures demeurent actives pour la photosynthèse. Il en résulte une récession du houppier moins rapide chez les individus des peuplements éclaircis. La croissance radiale dans la partie inférieure de la tige est par conséquent augmentée, puisque les auxines se répartissent plus rapidement dans l'ensemble de la tige, ce qui entraîne un défilement plus important (Jozsa et Middleton 1997). Newnham (1965) a lui aussi observé que, lorsque le couvert est dégagé, les tiges ont une forme qui se rapproche davantage d'un cône ou d'un néloïde dû à une extension plus prononcée du houppier. Le pourcentage de différence dans la longueur du houppier entre les individus traités et témoins n'était pas spécifié dans la littérature. Il aurait été intéressant de pouvoir comparer ce résultat avec celui obtenu dans la présente recherche afin de vérifier si le faible changement, qui a été constaté dans la longueur du houppier après traitement, a pu avoir une influence sur le défilement, dont la différence était également infime.

Quatre autres hypothèses tentent d'expliquer les différences de forme et de distribution de la croissance sur la tige. Une première hypothèse, qui est reliée à une compensation d'ordre mécanique, a été décrite dans Larson (1963). Elle stipule que les stress mécaniques externes tendent à altérer et à modifier la forme des tiges. Metzger reconnaît deux forces mécaniques qui influencent la rectitude d'une tige (Larson 1963). La première est la force verticale, qui consiste au poids de la tige elle-même additionné au poids de la neige et de la glace. La seconde est la force horizontale, imposée par le vent. Par conséquent, la plus grande croissance observée à la base de la tige des arbres provenant de peuplements éclaircis pourraient être attribuable à l'augmentation de la pénétration du vent au sein de la canopée et à la diminution du support mutuel des tiges, qui entraîne la formation de bois de réaction.

Une seconde hypothèse a trait à la conductivité de l'eau (Larson 1963 ; Shinozaki *et al.* 1964). En supposant que la forme de la tige soit une réponse aux besoins hydrauliques de l'arbre, l'éclaircie provoquerait une hausse de la surface de conduction de l'eau dans la partie non feuillée de la tige due à une augmentation de l'activité photosynthétique et de la transpiration. Cependant, aucune donnée n'a été prise sur la largeur du houppier, ni sur l'épaisseur de l'enveloppe foliaire, ni sur le bilan hydrique avant et après l'éclaircie. Il est donc difficile d'établir dans quelle mesure l'augmentation de l'activité photosynthétique est causée par une augmentation du volume foliaire ou de la production photosynthétique (gramme de carbone/unité de surface foliaire).

La troisième hypothèse, posée par Pressler, propose une autre explication des changements de forme causée par l'éclaircie (Larson 1963). Il mentionne que l'accroissement radial à un endroit sur la tige est fonction de la biomasse foliaire présente au-dessus de ce point. Ainsi, le point où l'accroissement radial est maximal serait situé plus bas sur la tige des arbres traités puisque l'éclaircie induit une diminution de la hauteur de la base du houppier. Cette hypothèse est basée seulement sur le fait que la croissance radiale serait reliée à la biomasse foliaire. Or, cette explication ne peut être retenue puisque la répartition de la croissance qu'il décrit n'est pas conforme à celle obtenue pour les tiges traitées, dont l'accroissement radial maximal se situait, chez la majorité des sujets, près de l'apex. Dans le cas présent, la croissance radiale serait plutôt fonction de la production photosynthétique qui dépend de la biomasse foliaire et de sa production unitaire. À ce sujet, des recherches supplémentaires devraient être effectuées pour le pin gris.

Finalement, les changements de forme suite à l'éclaircie ne seraient pas nécessairement dus à une modification de la croissance des arbres, mais pourraient être provoqués par la morphologie des arbres résiduels. Par exemple, lors d'une éclaircie par le bas, les arbres dominants sont conservés, ce qui augmente artificiellement le défilement moyen des tiges (Larson 1963). Une forte éclaircie par le bas va par conséquent sélectionner des arbres avec un défilement plus grand que des éclaircies plus faibles (Larson 1963).

4.3. Répercussions sur la production de bois

Les résultats de la présente étude laissent entendre que l'éclaircie commerciale est une opération sylvicole positive pour la production de bois puisqu'elle induit une importante hausse de l'accroissement en diamètre chez les tiges traitées. De plus, la longueur du houppier vivant n'a été que légèrement modifiée suite à l'éclaircie. Par conséquent, le nombre de nœuds ne devrait pas être augmenté, n'affectant pas la nodosité du bois. Finalement, malgré des changements dans la répartition de l'accroissement radial le long de la tige, le volume de sciage ne semble pas être affecté négativement, étant donné que l'éclaircie a causé peu de changements en défilement de la première bille claire. Toutefois, il serait intéressant de confirmer cette évaluation à partir de barèmes de cubage de bois scié ou de simulation de débitage afin de vérifier les conséquences de l'élargissement de la base de la tige causé par l'éclaircie. On suppose que, compte tenu de la faible différence du coefficient de décroissance du premier billon des tiges traitées comparativement aux témoins, peu de changements seraient observés sur le rendement en sciage.

CHAPITRE V

CONCLUSION

5. Conclusion

Une analyse de tige a été effectuée sur vingt-huit pins gris issus de peuplements éclaircis ainsi que sur vingt-quatre tiges témoins. L'accroissement en volume, la longueur relative du houppier, le coefficient de décroissance ainsi que le profil de tige ont été examinés.

Les résultats démontrent que l'éclaircie commerciale a produit en général une accélération de la croissance des tiges résiduelles. La comparaison de l'accroissement en volume par tige avant et après traitement a permis de constater que le traitement avait doublé l'accroissement en volume au cours de la décennie suivant l'éclaircie. D'importantes variations ont cependant été notées entre les peuplements : par conséquent, le gain en volume par tige est très variable d'un peuplement à l'autre, variant de 0 à 26% dix ans après traitement. L'examen des données n'a pas permis de relier ces variations à l'âge, à la productivité des peuplements ou à l'intensité du prélèvement. On s'interroge toutefois à savoir si le site Ecl-20 était vraiment plus productif que les autres peuplements ou si le fait qu'aucun témoin n'était associé à ce site a pu influencé les résultats.

L'analyse de la longueur relative du houppier a permis de constater que les tiges issues de peuplements éclaircis avaient des houppiers légèrement plus longs que les témoins, mais cette différence n'était que de 7 %. Par conséquent, il est difficile d'établir dans quelle mesure l'accélération de la croissance en volume est causée par une

augmentation de l'importance de l'appareil photosynthétique ou par une augmentation de l'efficacité de la croissance.

L'analyse de la variation des réponses des tiges en fonction de leur taille suggère que les peuplements sont dans une situation de compétition asymétrique. Après éclaircie, les arbres de petites et moyennes dimensions ont tiré un plus grand profit de la disponibilité accrue des ressources. Les grosses tiges ont moins réagi puisqu'elles avaient déjà un accès prioritaire et disproportionnée aux éléments minéraux, à l'eau ainsi qu'à la lumière. Le type d'éclaircie pratiquée aurait par conséquent une influence sur l'intensité de la réaction des arbres. Ainsi, les traitements qui tendent à préserver les arbres dominants susciteraient moins de réaction chez les arbres résiduels qu'une éclaircie qui effectue une récolte dans l'ensemble des classes de diamètre.

Le profil des tiges semble être modifié suite à l'éclaircie. La plupart des arbres traités présentent une croissance en diamètre plus élevée à leur base comparativement aux témoins, dont la croissance est davantage située au sommet de l'arbre.

Les stress externes tendent à altérer et à modifier la forme des arbres. Ainsi, le vent serait le facteur premier déterminant la forme et la distribution de la croissance sur la tige. En réduisant la densité du peuplement, le soutien mutuel est diminué et les arbres deviendraient plus exposés aux forces du vent, accélérant leur croissance radiale à la base

de leur tige afin de compenser ces effets. Il est cependant difficile de se prononcer en absence de données plus détaillées sur la physiologie des arbres.

La qualité du bois ne semble pas être affectée par l'éclaircie commerciale puisque la longueur du houppier et le défilement de la tige sont demeurés comparables entre les arbres traités et témoins. Toutefois, il serait important d'effectuer une évaluation à partir de barèmes de cubage de bois scié ou de simulation de débitage. Il serait intéressant aussi de reprendre le même genre d'étude avec un effectif plus élevé, entre autres, pour obtenir une moyenne du gain en volume plus juste, et de vérifier également les effets de différents types d'éclaircies commerciales sur la production de bois.

Les résultats de cette étude permettront donc de faire le bilan de la production des peuplements (rendement en volume à l'hectare) compte tenu de la structure des peuplements résiduels.

CHAPITRE VI

RÉFÉRENCES

6. Références

- Aussenac, G., Granier, A., et Bréda, N. 1995. Effets des modifications de la structure du couvert forestier sur le bilan hydrique, l'état hydrique des arbres et la croissance. Rev. For. Fr. 1: 54-62.
- Aussenac, G., Granier A., et Naud, R. 1982. Influence d'une éclaircie sur la croissance et le bilan hydrique d'un jeune peuplement de Douglas (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco). Can J. For. Res. 12: 222-231.
- Assman, E. 1970. The principles of yield study ; Studies in the organic production, structure, increment and yield of forest stands. Oxford Pergamon Press.
- Barbour, R.J., Bailey, R.E., et Cook, J.A. 1992. Evaluation of relative density, diameter growth, and stem form in 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., et 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.
- Bella, I.E. et DeFranceschi, J.P. 1974. Analysis of jack pine thinning experiments, Manitoba and Saskatchewan. Dept. Environment, Canadian forestry service, publication no 1338.
- Carter, R.E., Miller, I.M., et Klinka, K. 1986. Relationships between growth form and stand density in immature Douglas-fir. For. Chron. 440-445.
- Day, R.J., et Nanang, D.M. 1997. Principles of thinning for improved growth, yield and economic profitability of lodgepole and jack pine. Proceedings of a commercial thinning workshop, Whitecourt, Alberta, October 17-18.
- Environnement Canada. 1993. Normales climatiques au Canada : 1961-1990, Québec. Environnement Canada, Service de l'environnement atmosphérique, Ottawa.
- Farrar, J.L. 1961. Longitudinal variation in the thickness of the annual ring. For. Chron. 323-330.
- Gouvernement du Québec. 1984. Normes d'inventaire forestier (2e programme d'inventaire décennal). Ministère de l'Énergie et des Ressources du Québec.

- Groot, A., Brown, K.M., Morrison, I.K., Barker, J.E. 1984. A 10-year tree and stand response of jack pine to urea fertilization and low thinning. Can. J. For. Res. 14: 44-50.
- Guay, R., Gagnon, R., et Morin, H. 1992. A new automatic and interactive tree ring measurement system based on line scan camera. For. Chron. 68: 138-141.
- Hilt, D.E. 1979. Stem form changes in upland oaks after thinning. Research paper, northeastern forest experiment station, USDA forest service. NE-433. 7 p.
- Holmes, R.L. 1983. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. Tree-Ring Bull. 43 : 69-78.
- Janas, P.S., et Brand, D.G. 1988. Comparative growth and development of planted and natural stands of jack pine. For. Chron. 320-328.
- Johnstone, W.D. 1997. The effect of commercial thinning on the growth and yield of lodgepole pine. In proceedings of a commercial thinning workshop. FERIC, Vancouver, B.C., Special Report SR-122: 13-23.
- Jozsa, L.A., et Middleton, G.R. 1997. Les caractéristiques déterminant la qualité du bois : nature et conséquences pratiques. Forintek Canada Corp. 42 p.
- Larson, P.R. 1963. Stem form development of forest trees. Forest Science. Monograph 5. 42 p.
- Magnussen, S., et Yeatman, C.W. 1987. Early testing of jack pine. II. Variance and repeatability of stem and branch characters. Can. J. For. Res. 17: 460-465.
- Mayor, X., et Rodà, F. 1993. Growth response of holm oak (*Quercus ilex* L) to commercial thinning in the Montseny mountains (NE spain). Ann. Sci. For. 50:247-256.
- McLaughlin, J.A., et Pulkki, R.E. 1992. Assessment of wounding at two commercially thinned jack pine sites. North. J. Appl. For. 9(2): 43-46.
- Mead, R., et Cornow, R.N. 1983. Statistical methods in agriculture and experimental sciences. Chapman and Hall, New York.
- Ministère des ressources naturelles du Québec. 1992. Normes d'inventaire forestier—les placettes-échantillons permanentes. Édition provisoire 1992. Gouvernement du Québec, Service de l'inventaire forestier.
- Ministère des ressources naturelles du Québec. 1997. Manuel d'aménagement forestier (Version révisée, Document préliminaire). Québec.

- Morris, D.M., Bowling, C., et Hills, S.C. 1994. Growth and form responses to pre-commercial thinning regimes in aerially seeded jack pine stands: 5th year results. *For. Chron.* 70(6): 780-787.
- Morris, D.M., et Parker, W.H. 1992. Variable-quality form in mature jack pine stands: quantification and relationship with environmental factors. *Can. J. For. Res.* 22: 279-289.
- Moser, E.B., Saxton, A.M., et Pezeshki, S.R. 1990. Repeated measures analysis of variance: application to tree research. *Can. J. For. Res.* 20: 524-535.
- Myers, C.A. 1963. Vertical distribution of annual increment in thinned ponderosa pine. *Forest Science* 9(4): 394-404.
- Newnham, R.M. 1965. Stem form and the variation of taper with age and thinning regime. *Forestry* 38: 218-224.
- Ordre des ingénieurs forestiers du Québec. 1996. *Manuel de foresterie*. Sainte-Foy, Presses de l'Université Laval. 1428 p.
- Pardé, J. 1964. Intensité des éclaircies et production ligneuse. *Rev. For. Fr.* 16(2): 936-945.
- Plonski, W.L. 1974. Normal yield tables (metric). *Ont. Min. Nat. Resour., Div. For.*, Toronto. 40 p.
- Pothier, D., et Savard, F. 1998. Actualisation des tables de productions pour les principales espèces forestières du Québec. Gouvernement du Québec. Ministère des Ressources Naturelles du Québec.
- Rondeux, J. 1993. La mesure des arbres et des peuplements forestiers. Presses agronomiques de Gembloux, Belgique. 522 p.
- Schaeffer, L. 1945. Le mouvement forestier à l'étranger: cime et accroissement. *Rev. Eaux For.* 83: 147-159.
- Scherrer, B. 1984. Biostatistique. Gaétan Morin Éditeur. Montréal. 850 p.
- Shinozaki, K., Yoda, K., Hozowi, K., et Kira, T. 1964. A quantitative analysis of form-The pipe model theory I-Basic analysis. *Jpn. J. Ecol.* 14: 97-105.
- Schweingruber, F.H. 1988. Tree rings. Kluwer academic publishers. Holland. 276 p.

- Short, E.A., et Burkhart, H.E. 1992. Predicting crown-height increment for thinned and unthinned loblolly pine plantations. *For. Sci.* 38(3): 594-610.
- Smith, D.M. 1986. The practice of silviculture. Ed. 8. Wiley, New York. 527 p.
- Smith, C.R. et Oerlemans, W.J.A.M. 1988. Ten-year growth response and financial evaluation of commercial strip thinning of jack pine: a case study. Great lake forestry centre, Canadian forestry service government of Canada. Information report O-X-396. 26 p.
- Sonderman, D.L., et Rast, E.D. 1988. Effect of thinning on mixed-oak stem quality. Research paper northeastern forest experiment station vol. NE-618. 6 p.
- SYSTAT. 1992. Statistics, Version 5.2. Edition, Evanston, IL: SYSTAT, Inc.
- Tasissa, G., et Burkhart, H.E. 1997. Modeling thinning effects on ring width distribution in loblolly pine (*Pinus taeda*). *Can. J. For. Res.* 27: 1291-1301.
- Thomson, A.J., et Barclay, H.J. 1984. Effects of thinning and urea fertilization on the distribution of the area increment along the boles of Douglas-fir at Shawnigan Lake, British Columbia. *Can. J. For. Res.* 14: 879-884.
- Valinger, E. 1992. Effects of thinning and nitrogen fertilization on stem growth and stem form of *Pinus sylvestris* trees. *Scand. J. For. Res.* 7: 219-228.
- Vézina, P.-E., et Roberge, M.-R. 1981. Comment aménager nos forêts. Les Presses de l'Université Laval, Québec. 273 p.
- Weiner, J., et Thomas, S.C. 1986. Size variability and competition in plant monocultures. *Oikos* 47: 211-222.
- Zarnovican, R. 1985. Analyse de tige: une méthode à redécouvrir. *Nat. Can.* 112: 253-260.