

MARTIN RIOPEL

**POTENTIEL DE CROISSANCE DE LA HAUTE RÉGÉNÉRATION PRÉÉTABLIE DE
SAPIN BAUMIER: UNE ANALYSE DENDROMÉTRIQUE AU NIVEAU DE LA TIGE
ET DU PEUPEMENT**

Mémoire

présenté

à la Faculté des études supérieures

de l'Université Laval

pour l'obtention du grade de maître ès sciences (M. Sc.)

**Département des sciences du bois et de la forêt
FACULTÉ DE FORESTERIE ET DE GÉOMATIQUE
UNIVERSITÉ LAVAL**

JUILLET 1999



National Library
of Canada

Acquisitions and
Bibliographic Services

395 Wellington Street
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Bibliothèque nationale
du Canada

Acquisitions et
services bibliographiques

395, rue Wellington
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Your file Votre référence

Our file Notre référence

The author has granted a non-exclusive licence allowing the National Library of Canada to reproduce, loan, distribute or sell copies of this thesis in microform, paper or electronic formats.

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

L'auteur a accordé une licence non exclusive permettant à la Bibliothèque nationale du Canada de reproduire, prêter, distribuer ou vendre des copies de cette thèse sous la forme de microfiche/film, de reproduction sur papier ou sur format électronique.

L'auteur conserve la propriété du droit d'auteur qui protège cette thèse. Ni la thèse ni des extraits substantiels de celle-ci ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

0-612-44948-3

Canada

RÉSUMÉ

L'utilisation combinée de données d'inventaire et d'analyses de tiges a permis l'étude rétrospective d'une sapinière issue d'une coupe totale de 1944. Les résultats indiquent que les sapins protégés lors de la coupe ont généralement bien réagi, conservant ainsi leur supériorité sur les semis libres de croître. Une analyse des accroissements après coupe, à dimensions comparables, a permis de constater que les semis et les tiges de dimension supérieure croissent de façon similaire après une période d'adaptation pouvant durer jusqu'à 20 ans. Toutefois les caries sont plus fréquentes et plus volumineuses chez les plus grandes tiges lors de la coupe. Entre la 11^{ème} et la 47^{ème} année après la coupe, la haute régénération et les petites tiges marchandes présentent des taux de survie élevés, malgré leur âge biologique élevé. Leur présence dans le peuplement a contribué à augmenter la dimension moyenne des tiges, 47 ans après coupe, et à procurer des gains tangibles de productivité. La protection de hautes régénérations préétablies, en quantité suffisante, permettrait de réduire la longueur de la révolution d'au moins 10 ans. Une coupe avec protection des petites tiges marchandes (CPPTM) pourrait même être envisagée.

Martin Riopel, ing. f.

Jean Bégin, directeur

Jean-Claude Ruel, codirecteur

AVANT-PROPOS

Je tiens tout particulièrement à remercier mon directeur, M. Jean Bégin qui a contribué à faire de cette maîtrise, une expérience motivante, enrichissante et diversifiée ainsi que mon codirecteur, M. Jean-Claude Ruel.

La réalisation de ce projet a été rendue possible grâce à la participation financière du Ministère des Ressources naturelles du Québec et au prêt de données d'inventaire par le Centre de foresterie des Laurentides. Je remercie les fonds FCAR, F.K. Morrow et la compagnie Kruger pour les bourses d'étude octroyées lors de mon passage aux études supérieures.

J'aimerais souligner la contribution de toutes les personnes qui ont participé à la prise de données sur le terrain ainsi qu'à la préparation et à l'analyse des rondelles de bois au laboratoire. En particulier, je tiens à remercier M. Denis Thibault qui avait débuté le projet et qui m'a grandement aidé par son expérience et ses conseils. L'assistance de M. Gaétan Daigle, du service de consultations statistiques de l'Université Laval, m'a également grandement aidé dans l'analyse statistique des données. Enfin j'aimerais souligner la collaboration de Scierie Mitis inc. (Produits forestiers Alliance), de M. Gilbert Michaud de l'Unité de Gestion # 12, de M. René Lemieux du service du mesurage et de la facturation du MRNQ et finalement du personnel de la Réserve faunique de Matane.

Un dernier merci aux membres de ma famille qui m'ont toujours soutenu et encouragé durant mon cheminement.

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ	I
AVANT-PROPOS.....	II
TABLE DES MATIÈRES	III
LISTE DES TABLEAUX	VIII
LISTE DES FIGURES	VIII
INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	1
CHAPITRE 1. MATÉRIEL ET MÉTHODES.....	5
1.1. LOCALISATION ET DESCRIPTION DE LA RÉGION ÉTUDIÉE	5
1.2. APPROCHE MÉTHODOLOGIQUE	7
1.2.1. Volet I: Analyses comparatives au niveau des tiges individuelles libres de croître	8
1.2.2. Volet II: Analyses comparatives au niveau des placettes	8
1.3. CHOIX DES PLACETTES	9
1.4. ANALYSES COMPARATIVES AU NIVEAU DES TIGES INDIVIDUELLES LIBRES DE CROÎTRE ...	9
1.4.1. Récolte des données.....	9
1.4.2. Estimation de l'accroissement spécifique en volume	12
1.4.3. Détermination de la cime efficace	13
1.4.4. Formation des groupes.....	15
1.5. ANALYSES COMPARATIVES AU NIVEAU DES PLACETTES.....	17
1.5.1. Données d'inventaire disponibles.....	17
1.5.2. Analyses de tiges	17
1.5.3. Coupe des placettes	18
1.5.4. Estimation de l'indice de qualité de station (IQS).....	18
1.5.5. Évaluation de la relation entre le diamètre avec écorce et le diamètre mesuré	19

1.5.6.	Évaluation du volume à l'hectare	20
1.5.7.	Évaluation de la hauteur de la régénération lors de la coupe.....	20
CHAPITRE 2. CARACTÉRISTIQUES DES TIGES LORS DE LA COUPE ET		
ÉVOLUTION DES DIMENSIONS DENDROMÉTRIQUES		22
2.1.	INTRODUCTION.....	22
2.2.	MATÉRIEL ET MÉTHODES	23
2.2.1.	Calcul du coefficient de forme	23
2.2.2.	Analyses statistiques	23
2.3.	RÉSULTATS.....	24
2.3.1.	Caractéristiques des tiges lors de la coupe	24
2.3.2.	Évolution de la hauteur après la coupe	24
2.3.3.	Évolution du diamètre après la coupe.....	27
2.3.4.	Évolution du volume total après la coupe	28
2.3.5.	Évolution du pourcentage de cime efficace après la coupe	29
2.3.6.	Évolution de l'accroissement spécifique en volume	30
2.3.7.	Étude du coefficient de forme.....	31
2.4.	DISCUSSION	31
2.4.1.	Caractéristiques des tiges lors de la coupe	31
2.4.2.	Évolution des dimensions dendrométriques après coupe	33
2.4.2.1.	<i>Hauteur totale.....</i>	<i>33</i>
2.4.2.2.	<i>Diamètre à hauteur de poitrine</i>	<i>34</i>
2.4.2.3.	<i>Volume total.....</i>	<i>34</i>
2.4.2.4.	<i>Proportion de cime efficace.....</i>	<i>35</i>
2.4.2.5.	<i>Accroissement spécifique en volume</i>	<i>35</i>
2.4.2.6.	<i>Forme et coefficient d'élancement.....</i>	<i>36</i>
CHAPITRE 3. ACCROISSEMENTS DES TIGES INDIVIDUELLES		38
3.1.	INTRODUCTION.....	38
3.2.	MATÉRIEL ET MÉTHODES	39
3.2.1.	Modélisation de la croissance	40

3.2.2.	Évaluation du niveau d'oppression avant la coupe: proportion de l'accroissement libre de croître.....	42
3.2.3.	Évaluation des pertes de croissance causées par les défoliations	45
3.2.4.	Évaluation de la réaction des tiges après coupe.....	46
3.2.5.	Utilisation de la cime dans l'explication de l'accroissement.....	46
3.2.6.	Analyses statistiques	46
3.3.	RÉSULTATS.....	47
3.3.1.	Accroissement avant coupe et proportion de l'accroissement libre de croître	47
3.3.2.	Réaction des tiges après coupe	47
3.3.3.	Accroissement annuel courant en hauteur après coupe à dimensions comparables ...	49
3.3.4.	Accroissement annuel courant en diamètre après coupe à dimensions comparables .	51
3.3.5.	Accroissement annuel courant en volume après coupe à dimensions comparables ...	52
3.3.6.	Accroissement spécifique en volume après coupe à dimensions comparables	53
3.3.7.	Effet des défoliations causées par la tordeuse des bourgeons de l'épinette.....	54
3.4.	DISCUSSION	55
3.4.1.	Croissance et niveau d'oppression avant la coupe	55
3.4.2.	Réaction des tiges	56
3.4.3.	Accroissements et période d'adaptation	58
3.4.4.	Pertes de croissance causées par les défoliations.....	61
CHAPITRE 4. ANALYSE DE LA CARIE ET DE LA DÉCOLORATION		63
4.1.	INTRODUCTION.....	63
4.2.	MATÉRIEL ET MÉTHODE.....	64
4.2.1.	Analyse au niveau des tiges individuelles	64
4.2.2.	Analyse au niveau du peuplement	65
4.3.	RÉSULTATS.....	66
4.3.1.	Proportion de tiges cariées.....	66
4.3.2.	Proportion du volume marchand par tige affectée par la carie	66
4.3.3.	Volumes moyens altérés et marchands nets par tige	68
4.3.4.	Volume marchand net à l'hectare et proportion affectée par la carie	69
4.4.	DISCUSSION	71

CHAPITRE 5. TAUX DE SURVIE ET DIMENSION DE LA RÉGÉNÉRATION, 47 ANS APRÈS LA COUPE.....	75
5.1. INTRODUCTION.....	75
5.2. MATÉRIEL ET MÉTHODE.....	76
5.2.1. Évaluation du taux de survie	76
5.2.2. Dimension des tiges 47 ans après coupe.....	77
5.2.3. Contribution au volume du peuplement	78
5.3. RÉSULTATS.....	78
5.3.1. Caractéristiques moyennes des placettes étudiées	78
5.3.2. Taux de survie des tiges.....	79
5.3.3. Dimension des tiges en 1990	81
5.3.4. Contribution de la régénération préétablie au peuplement	83
5.4. DISCUSSION	84
5.4.1. Mortalité et dimension de la régénération.....	84
5.4.2. Dimension des tiges.....	86
5.4.3. Contribution de la régénération préétablie au volume du peuplement.....	87
CHAPITRE 6. IMPACT DE LA RÉGÉNÉRATION PRÉÉTABLIE SUR LA PRODUCTIVITÉ.....	88
6.1. INTRODUCTION.....	88
6.2. MATÉRIEL ET MÉTHODE.....	89
6.2.1. Dimension de la régénération préétablie lors de la coupe	89
6.2.2. Modélisation du volume	90
6.3. RÉSULTATS.....	92
6.3.1. Description des placettes lors de la coupe	92
6.3.2. Statistiques 47 ans après coupe	93
6.3.3. Modélisation du volume marchand	96
6.3.3.1. <i>Modèle à partir de variables binaires par placette</i>	96
6.3.3.2. <i>Modèle avec l'indice de hauteur</i>	98
6.4. DISCUSSION	100
6.4.1. Grandeurs dendrométriques 47 ans après coupe.....	100

6.4.2.	Gains sur l'âge de révolution.....	100
6.4.3.	Compatibilité du modèle	102
6.4.4.	Effet de la hauteur initiale sur l'âge des sapinières	102
CHAPITRE 7. CONSÉQUENCES POUR L'AMÉNAGEMENT DES SAPINIÈRES		104
7.1.	LES GAULES : UNE RICHESSE À PROTÉGER.....	104
7.2.	COUPE AVEC PROTECTION DES PETITES TIGES MARCHANDES (CPPTM).....	106
7.3.	CARIE ET QUALITÉ DU BOIS	108
7.4.	ÉLAGAGE NATUREL.....	109
7.5.	ÉVALUATION DE LA QUALITÉ DE STATION	110
CONCLUSION		112
BIBLIOGRAPHIE		116
ANNEXE A. ANALYSES DE TIGES UTILISÉES DANS L'ANALYSE COMPARATIVE DES TIGES INDIVIDUELLES LIBRES DE CROÎTRE		132
ANNEXE B. ANALYSES DE TIGES SUPPLÉMENTAIRES POUR ÉTABLIR LES TARIFS DE CUBAGE.....		134
ANNEXE C. ANALYSES DE TIGES RÉCOLTÉES EN 1990 ET 1992.....		136
ANNEXE D. RÉSULTATS DES MODÉLISATIONS, ARBRE PAR ARBRE, DES DIMENSIONS DENDROMÉTRIQUES APRÈS COUPE.....		137
ANNEXE E. ANALYSES DE COMPARAISONS MULTIPLES SUR LES ACCROISSEMENTS APRÈS COUPE À DIMENSIONS COMPARABLES.....		142
ANNEXE F. RÉSULTATS DE LA MODÉLISATION DU VOLUME MARCHAND À PARTIR DU MODÈLE PAR PLACETTE.....		148
ANNEXE G. RÉSULTATS DE LA MODÉLISATION DU VOLUME MARCHAND À PARTIR DU MODÈLE AVEC L'INDICE DE HAUTEUR.		149

LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU 1. CARACTÉRISTIQUES DES PLACETTES ÉCHANTILLONNÉES.	10
TABLEAU 2. PÉRIODES DE TORDEUSE AYANT AFFECTÉ LES VARIABLES DENDROMÉTRIQUES.	42
TABLEAU 3. AUGMENTATION DE L'ACCROISSEMENT APRÈS COUPE PAR RAPPORT À CELUI DES CINQ DERNIÈRES ANNÉES AVANT COUPE.	48
TABLEAU 4. DURÉE DE LA PÉRIODE D'ADAPTATION CHEZ LES GAULES ET LES TIGES RÉCOLTABLES.	50
TABLEAU 5. PERTES DE CROISSANCE LORS DES DEUX ÉPIDÉMIES DE TORDEUSE DES BOURGEONS DE L'ÉPINETTE.	55
TABLEAU 6. VOLUMES MOYENS DES TIGES DE 15,1 CM ET PLUS DE DHP EN 1990.	68
TABLEAU 7. STATISTIQUES SUR LES VOLUMES MARCHANDS ET CARIÉS DES PLACETTES EN 1990.	70
TABLEAU 8. ÂGES MOYENS EN 1943 DES TIGES VIVANTES RÉSINEUSES EN 1990.	79
TABLEAU 9. DESCRIPTION DES PLACETTES APRÈS LA COUPE SELON LES RONDELLES RÉCOLTÉES.	94
TABLEAU 10. DESCRIPTION DES PLACETTES EN 1990.	95
TABLEAU 11. ÉVALUATION DU GAIN SUR L'ÂGE EN FONCTION DES PLACETTES.	97

LISTE DES FIGURES

FIGURE 1. LOCALISATION DU SITE D'ÉTUDE.	6
FIGURE 2. ACCROISSEMENT EN DIAMÈTRE À HAUTEUR DE POITRINE D'UN VIEUX SAPIN BAUMIER.	7
FIGURE 3. SCHÉMA D'ÉCHANTILLONNAGE À PARTIR DES COINS DE PLACETTE.	11
FIGURE 4. SCHÉMATISATION DE LA CIME EFFICACE ET DE L'ACCROISSEMENT EN SURFACE.	14
FIGURE 5. ÉVALUATION DE LA BASE DE CIME À PARTIR DES PATRONS DE CROISSANCE.	16
FIGURE 6. CARACTÉRISTIQUES DES TIGES LORS DE LA COUPE.	25
FIGURE 7. ÉVOLUTION DE LA HAUTEUR TOTALE APRÈS COUPE.	26
FIGURE 8. RELATION ENTRE LA HAUTEUR 10, 30 ET 47 ANS APRÈS COUPE ET LA HAUTEUR INITIALE.	26
FIGURE 9. ÉVOLUTION DU DIAMÈTRE À HAUTEUR DE POITRINE AVEC ÉCORCE APRÈS COUPE.	27
FIGURE 10. ÉVOLUTION DU VOLUME TOTAL PAR TIGE APRÈS COUPE.	28
FIGURE 11. ÉVOLUTION DU POURCENTAGE DE CIME EFFICACE APRÈS COUPE.	29

FIGURE 12. ÉVOLUTION DE L'ACCROISSEMENT SPÉCIFIQUE EN VOLUME.....	30
FIGURE 13. EXEMPLE DE MODÉLISATION DU DIAMÈTRE CHEZ UN SEMIS.	43
FIGURE 14. EXEMPLE DE MODÉLISATION DE LA HAUTEUR CHEZ UNE GAULE.	43
FIGURE 15. ACCROISSEMENTS ANNUELS MOYENS EN HAUTEUR DES CINQ ANNÉES AVANT COUPE DE LA HAUTE RÉGÉNÉRATION PRÉÉTABLIE ET ACCROISSEMENTS DE SEMIS LIBRES DE CROÎTRE, EN FONCTION DE LA HAUTEUR.....	44
FIGURE 16. ACCROISSEMENTS ANNUELS MOYENS EN DIAMÈTRE DES CINQ ANNÉES AVANT COUPE DE LA HAUTE RÉGÉNÉRATION PRÉÉTABLIE ET ACCROISSEMENTS DE SEMIS LIBRES DE CROÎTRE, EN FONCTION DU DIAMÈTRE.	44
FIGURE 17. POURCENTAGE DE L'ACCROISSEMENT LIBRE DE CROÎTRE EN HAUTEUR ET EN DIAMÈTRE DES GAULES ET DES TIGES RÉCOLTABLES AVANT COUPE (1939-1943).	48
FIGURE 18. COMPARAISON DE L'ACCROISSEMENT ANNUEL EN HAUTEUR APRÈS COUPE À HAUTEURS COMPARABLES.....	50
FIGURE 19. COMPARAISON DE L'ACCROISSEMENT EN DIAMÈTRE APRÈS COUPE À HAUTEURS ET POURCENTAGES DE CIME COMPARABLES.....	52
FIGURE 20. COMPARAISON DE L'ACCROISSEMENT EN VOLUME APRÈS COUPE À VOLUMES ET POURCENTAGES DE CIME COMPARABLES.....	53
FIGURE 21. COMPARAISON DE L'ACCROISSEMENT SPÉCIFIQUE EN VOLUME APRÈS COUPE À HAUTEURS ET POURCENTAGES DE CIME COMPARABLES.	54
FIGURE 22. PROPORTION DES TIGES AFFECTÉES PAR LA CARIE.....	67
FIGURE 23. PROPORTION DU VOLUME MARCHAND CARIÉ DES TIGES AFFECTÉES PAR LA CARIE.....	67
FIGURE 24. PROPORTIONS DU VOLUME MARCHAND AFFECTÉES PAR LA CARIE ET LA DÉCOLORATION.....	69
FIGURE 25. RELATION, EN 1990, ENTRE LA PROPORTION DE CARIE DANS LES PLACETTES ET LA PRÉSENCE DE TIGES DE PLUS DE 5 M LORS DE LA COUPE.....	71
FIGURE 26. RELATION ENTRE LE DHP AVEC ÉCORCE EN 1954 ET CELUI LORS DE LA COUPE.....	80
FIGURE 27. SURVIE DES TIGES RÉSINEUSES DE 1954 À 1990 EN FONCTION DE LEUR DIMENSION 11 ANS APRÈS LA COUPE.	81
FIGURE 28. RÉPARTITION DES TIGES VIVANTES RÉSINEUSES SELON LES DIMENSIONS ATTEINTES EN 1990.	82
FIGURE 29. VOLUME MARCHAND MOYEN DES TIGES MARCHANDES VIVANTES EN 1990.	83

FIGURE 30. PARTS DU NOMBRE DE TIGES MARCHANDES ET DU VOLUME MARCHAND DU PEUPEMENT OCCUPÉES EN 1990 PAR LES DIFFÉRENTES CLASSES DE RÉGÉNÉRATION.	84
FIGURE 31. RELATION ENTRE LE GAIN EN TEMPS ET LA HAUTEUR MOYENNE AU MOMENT DE LA COUPE (OBTENUE À PARTIR DU MODÈLE AVEC VARIABLES BINAIRES).	98
FIGURE 32. COURBES DE PRODUCTION POUR UN INDICE DE QUALITÉ DE STATION DE 15 M À 50 ANS.	99

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Les vieilles sapinières boréales sont reconnues pour leur capacité à se régénérer abondamment sous couvert (Hatcher 1960, MacArthur 1963, Doucet 1988, Ruel 1989, Coté et Bélanger 1991). Une fois établi, le sapin baumier peut survivre longtemps puisqu'il est très tolérant à l'ombre (Frank 1990). Il en résulte l'établissement d'une régénération préétablie de dimension et d'âge biologique parfois très variables à l'intérieur d'un même peuplement. Morris (1948) indique, en effet, que le sapin peut survivre parfois jusqu'à 100 ans en oppression. Cette caractéristique fait en sorte que plusieurs sapinières matures sont déjà bien régénérées sous couvert.

Avec le "Projet de stratégie de protection des forêts" (Gouvernement du Québec 1994), la coupe avec protection de la régénération et des sols (CPRS) est devenue une pratique sylvicole privilégiée dans les sapinières. Avant 1994, seule la régénération préétablie de moins de 3 m était considérée comme viable après coupe (Gouvernement du Québec 1992). Aujourd'hui, on entend par régénération naturelle sur les terres publiques "toute tige vivante non blessée d'une essence commerciale désirée comprenant les stades de semis au gaulis [...] dont le pourcentage de cime vivante est d'au moins 50% de la hauteur totale de la tige" (MRNQ 1998a).

La croissance après coupe de la régénération préétablie de sapin baumier de grande taille est cependant mal connue. Un besoin se fait sentir notamment au niveau de la prédiction et de la modélisation des rendements des superficies sur lesquelles une partie non négligeable des tiges préétablies atteint déjà des dimensions considérables lors de la coupe. Compte tenu de l'importance qu'on leur accorde dans la stratégie de protection, il importe de vérifier si la haute régénération de sapin baumier possède le potentiel pour former le futur peuplement.

Au Québec, quelques études ont abordé cette question chez l'épinette noire, tant à l'échelle des tiges individuelles (Paquin et Doucet 1992b, Lussier et al. 1992, Morin et Gagnon 1992) qu'à l'échelle du peuplement (Paquin et Doucet 1992a, Morin et Gagnon 1991, 1992, Pothier et al. 1995). Il en ressort que la régénération préétablie de plus de 2-3 m (généralement

des marcottes d'épinette noire) est susceptible de former le nouveau peuplement et de produire des rendements aussi productifs, sinon supérieurs, à des peuplements issus uniquement de semis.

Une meilleure compréhension de ce phénomène chez le sapin baumier permettra de vérifier si l'orientation actuelle du Ministère, au niveau du projet de stratégie de protection des forêts, est compatible avec le potentiel des tiges protégées lors des CPRS réalisées dans les sapinières. Le potentiel des petites tiges marchandes suite à l'ouverture du couvert est aussi d'intérêt.

Les buts de cette étude sont:

1. d'évaluer le potentiel des gaules et des petites tiges marchandes récoltables opprimées de sapin baumier (*Abies balsamea* (L) Mill.), suite à leur mise en lumière;
2. d'évaluer l'effet de la structure et de la dimension de la régénération préétablie sur la productivité des sapinières après coupe.

Les principaux objectifs poursuivis sont donc:

1. de vérifier si la haute régénération préétablie possède un bon potentiel de croissance suite à la coupe du couvert;
2. de comparer les semis, les gaules et les tiges récoltables quant à leur accroissement après la coupe;
3. de comparer les semis, les gaules et les tiges récoltables quant à la proportion de pourriture;
4. d'estimer les taux de survie entre les 11^{ème} et 47^{ème} années après la coupe et les dimensions atteintes 47 ans après coupe, par la régénération;
5. d'estimer de combien la présence de la haute régénération préétablie améliore la productivité.

Hypothèses

Les hypothèses à vérifier sont les suivantes:

1. Comparativement à des semis libres de croître, les tiges de dimension supérieure conservent leur dominance en terme de dimension après la coupe;

2. Les tiges protégées lors de la coupe réagissent positivement à l'ouverture du couvert à l'intérieur des cinq premières années après la coupe;
3. À dimensions comparables, les semis libres de croître, les gaules et les tiges récoltables ont des accroissements similaires après une période d'adaptation aux nouvelles conditions;
4. Les pertes de croissance causées par la tordeuse des bourgeons de l'épinette sont semblables, peu importe la dimension des tiges au moment de la coupe;
5. La fréquence et la proportion de pourriture et de décoloration chez le sapin sont fonctions de la dimension des tiges au moment de la coupe;
6. Entre la 11^e et la 47^e année après la coupe, le taux de mortalité de la haute régénération préétablie résineuse est semblable à celui des petites tiges, plus jeunes;
7. La haute régénération préétablie représente, malgré une faible part des tiges présentes lors de la coupe, une part prépondérante du volume marchand, 47 ans après la coupe. Leur dimension atteinte est supérieure à la régénération plus petite;
8. Au niveau du peuplement, l'impact de la haute régénération préétablie sur la productivité ligneuse se situe essentiellement sur la réduction de la période de révolution et sur l'augmentation de la dimension moyenne des tiges marchandes.

Approche méthodologique

Le dispositif de recherche a été installé dans une zone où la présence de gaules, après la coupe, avait été observée à partir d'un dispositif de placettes échantillons semi-permanentes provenant de l'Aire d'observation de la rivière Matane (Bertrand et al. 1992). Les travaux de terrain ont été divisés en deux volets: une analyse comparative au niveau de tiges individuelles libres de croître et une analyse comparative au niveau des placettes.

Le premier volet porte sur l'étude de tiges individuelles libres de croître depuis la coupe. L'analyse de tiges, qui permet une étude rétrospective de la croissance après oppression (Lussier et al. 1992, Gagnon 1985, Paquin et Doucet 1992b), a permis la comparaison de l'évolution des dimensions dendrométriques de tiges de différentes tailles au moment de la coupe sur une période de 47 ans après la coupe. Une modélisation des dimensions dendrométriques a été réalisée afin

de déterminer les accroissements en fonction de classes de hauteur ou de volume et de manière à soustraire les périodes affectées par des défoliations causées par la tordeuse des bourgeons de l'épinette.

Le deuxième volet est caractérisé par l'utilisation combinée de données d'inventaire et d'analyses de tiges effectuées sur des sapins et des épinettes provenant de tous les étages (prédominants à supprimés). La récolte de rondelles sur tous les arbres a permis de déterminer la structure de la régénération préétablie au moment de la coupe et d'estimer la part du volume reposant sur la présence de gaules et de tiges récoltables. Des mesures de pourriture et de décoloration du bois ont été recueillies afin d'évaluer l'importance de la carie dans les tiges et les placettes étudiées. La comparaison des données d'inventaire avec celles des rondelles a permis d'évaluer les taux de mortalité de la régénération. Les données d'inventaires successifs et la dimension moyenne des tiges protégées au moment de la coupe ont été utilisées pour proposer des lignes de conduite relatives à l'estimation de la productivité des sapinières issues de régénération préétablie.

Structure du manuscrit

Ce manuscrit est divisé en sept chapitres. Le premier décrit le dispositif de recherche et la méthodologie générale de prise de données. Le deuxième porte sur la caractérisation des tiges individuelles lors de la coupe et leur évolution après la coupe. Le troisième chapitre porte sur l'analyse comparative de l'accroissement après la coupe tandis que le quatrième chapitre consiste en l'analyse de la proportion de pourriture. Le cinquième décrit la dimension et la part du volume reposant sur la régénération préétablie de grande taille. L'impact de la régénération préétablie sur la productivité est abordé au chapitre six. Enfin, le dernier porte sur les conséquences pour l'aménagement des sapinières.

CHAPITRE 1. MATÉRIEL ET MÉTHODES

Ce chapitre présente le territoire d'étude, l'approche méthodologique, les données recueillies et les compilations des données touchant l'ensemble de l'étude. Les méthodologies spécifiques à chacune des analyses sont élaborées dans les chapitres respectifs.

1.1. Localisation et description de la région étudiée

Les travaux ont été réalisés dans la Réserve faunique de Matane (figure 1), à l'intérieur d'un dispositif d'inventaire semi-permanent implanté en 1954 par le gouvernement fédéral. Les données de l'aire d'étude ont déjà été mises à profit pour la réalisation de tables de production (Bertrand et al. 1992, Tremblay et al. 1997). Les placettes sont de forme carrée de 20,12 m de côté soit près de 0,04 hectare. Le dispositif se situe dans le sous-domaine de la sapinière à bouleau blanc de l'est, plus spécifiquement dans la région écologique du massif gaspésien (5h-T) (MRNQ 1998b). Selon le Groupe de travail sur les écorégions (1989), on y retrouve un climat bas-boréal perhumide. Les sapinières boréales de la région se développent sur des dépôts de surface dominés par des tills dérivés de schistes gréseux et argileux ou calcaires (Gerardin et al. 1984). Les sols sont réputés très fertiles car on y retrouve une prédominance de sites de qualité de station I de Vézina et Linteau (1968).

Les peuplements étudiés tirent leur origine d'une coupe à blanc réalisée en 1944 dans des sapinières vierges mûres ou surannées dans lesquelles la régénération préétablie était déjà abondante (MacArthur 1959). La coupe s'est déroulée de la fin mai au début juillet. Les arbres ont été abattus, tronçonnés et écorcés manuellement sur place tandis que le débusquage des billes a été réalisé en hiver. La méthode de coupe et l'état initial des peuplements exploités ont contribué à la protection d'une quantité appréciable de régénération résineuse préétablie (MacArthur 1963) dont des gaules et des tiges marchandes. Selon MacArthur (1959), les coupes ont permis de récolter 110 m³/ha dont un peu moins de 20% en épinettes.

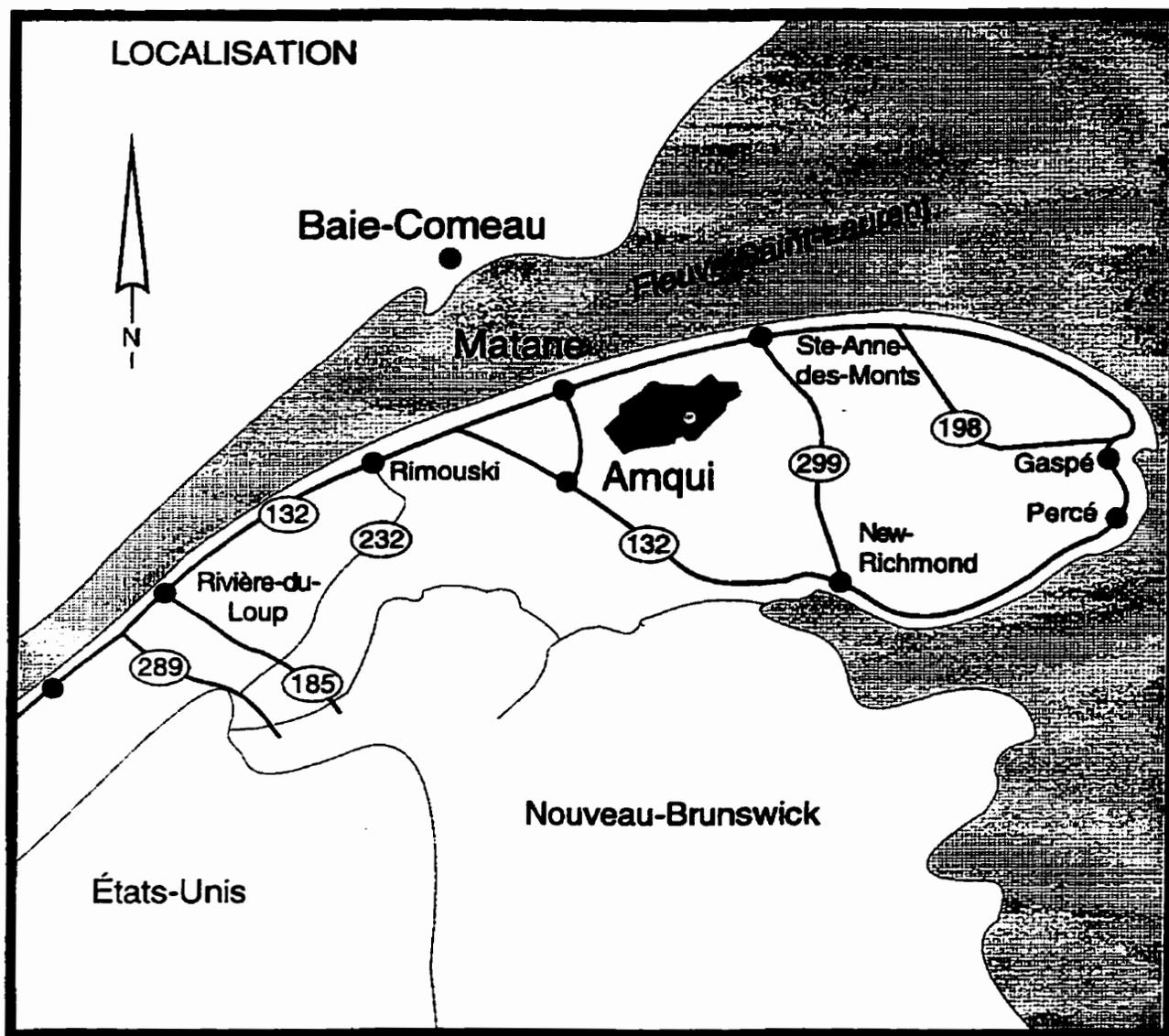


Figure 1. Localisation du site d'étude.

Avant la coupe, les peuplements étudiés se sont progressivement ouverts suite à différents événements d'origine naturelle. Selon le profil d'accroissement en diamètre des plus vieux arbres (figure 2), une ouverture du couvert, causée fort probablement par un chablis partiel, s'est produite à la fin du 19^{ième} siècle. Selon Blais (1961), la région a aussi été affectée par une épidémie de tordeuse des bourgeons de l'épinette (*Christoneura fumiferana* (Clem.)) dans les années '10. Dans les années '30, des sapins ont probablement profité de la mortalité d'épinettes causée par le diprion européen de l'épinette (*Diprion hercyniae* (Htg.)) (Gobeil 1938).

Depuis la coupe, le territoire a été affecté à deux reprises par des épidémies de tordeuse des bourgeons de l'épinette (*Choristoneura fumiferana* (Clem.)). La première, dans les années '50, n'a pas entraîné de mortalité et a été combattue efficacement au moyen d'insecticides tels que le D.D.T. (Hatcher 1966). La deuxième infestation, de 1975 à 1986, a touché les sapinières de façon modérée (Lachance et al. 1990). Bien que les pulvérisations aériennes aient permis d'éviter des mortalités à grande échelle, les pertes de croissance ont toutefois été appréciables. De plus, au printemps 1991, le dispositif a été affecté par un verglas sévère qui a renversé plusieurs arbres et a cassé des têtes (Tremblay et al. 1997). Dans le but d'éviter les données affectées par ce dernier événement, l'analyse des données se limite aux années 1990 et moins.

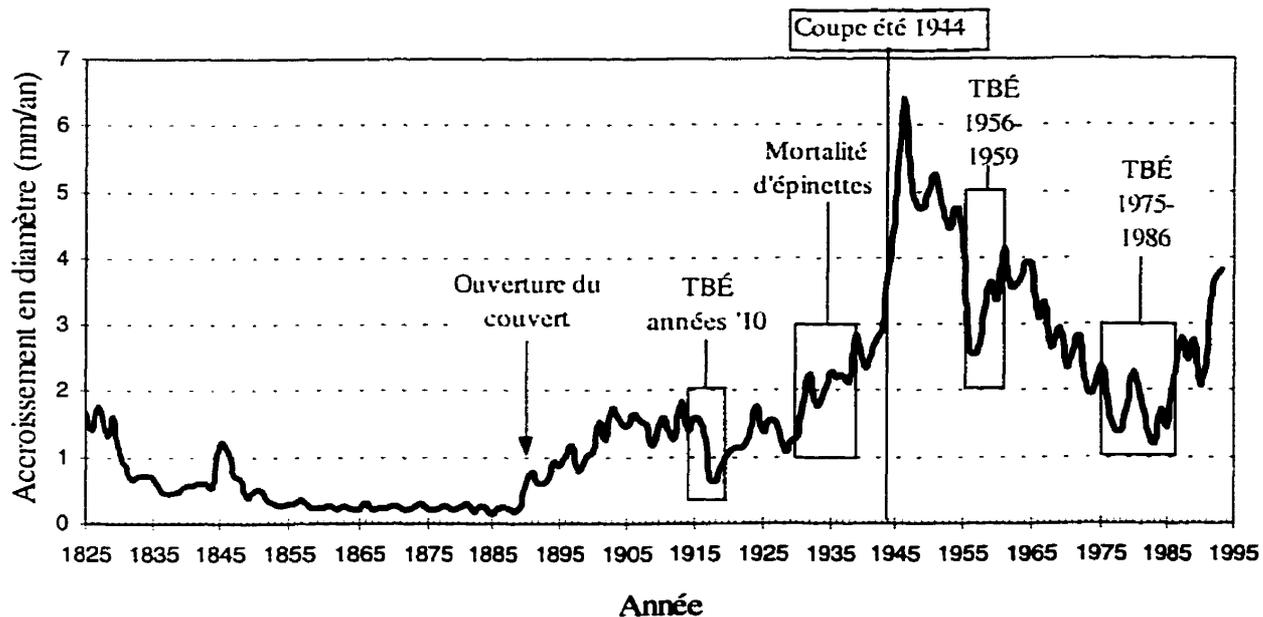


Figure 2. Accroissement en diamètre à hauteur de poitrine d'un vieux sapin baumier.

1.2. Approche méthodologique

L'étude a débuté en été 1994 par la récolte des données qui s'est étalée sur deux ans. Afin d'étudier la croissance des tiges et des placettes de façon rétrospective, nous avons procédé par

analyse de tiges. Les données d'inventaire ont aussi été mises à profit. L'approche méthodologique se divise en deux grands volets :

1.2.1. Volet I: Analyses comparatives au niveau des tiges individuelles libres de croître

Le premier volet porte sur l'analyse comparative de la croissance de semis libres de croître, de gaules et de tiges récoltables. L'approche utilisée consiste essentiellement en la comparaison de tiges de différentes tailles lors de la coupe et provenant des mêmes sites. Dans le but de comparer la croissance de la haute régénération avec celle de semis peu affectés par la présence de régénération préétablie de grande taille lors de la coupe, toutes les tiges échantillonnées faisaient partie du couvert codominant, dominant ou prédominant. Ce volet constitue les chapitres 2 et 3 de ce manuscrit.

1.2.2. Volet II: Analyses comparatives au niveau des placettes

Le volet II, réalisé au niveau du peuplement, porte essentiellement sur la comparaison de placettes de semis et de placettes constituées de gaules avec ou sans tiges récoltables lors de la coupe de 1944. Cette étude innove dans l'utilisation combinée de données d'inventaire et de rondelles récoltées à hauteur de souche et à hauteur de poitrine. Ainsi, comme le recommandent Doucet et Sheedy (1992), nous avons profité de la présence d'un vieux dispositif d'inventaire semi-permanent pour vérifier les hypothèses relatives à la coupe avec protection de la régénération. La prise de rondelles à hauteur de poitrine a permis de reconstituer l'état des placettes après la coupe de 1944. Des analyses de tiges ont servi à produire des courbes hauteur-diamètre. Les chapitres 4 et 5 consistent essentiellement en une analyse de tiges individuelles récoltées dans les placettes sans égard à leur statut. Le chapitre 6 est plutôt axé sur les données au niveau du peuplement.

1.3. Choix des placettes

La recherche de placettes a été réalisée de manière à obtenir des placettes initialement constituées de semis, de gaules et/ou de tiges récoltables et des placettes comportant uniquement des semis. L'utilisation des données d'inventaire, dix ans après coupe, ainsi que la vérification sur le terrain par carottage au moyen d'une sonde de Pressler, ont permis de déterminer les placettes susceptibles d'être utilisées. Les placettes retenues devaient être de qualité de station semblable et comporter une faible proportion en épinettes. Afin d'éviter les peuplements dont l'origine est le chablis total, la présence de quelques vieilles souches était nécessaire. Ce critère n'exclut cependant pas les placettes qui auraient pu être affectées par un chablis partiel d'intensité faible à modérée avant la coupe.

Au total, quinze placettes ont été sélectionnées pour l'élaboration de cette étude (tableau 1). Pour l'étude comparative entre les semis et les gaules, quatre placettes comportant uniquement des semis ainsi que quatre autres placettes contenant une bonne proportion de gaules ont servi de base pour la récolte d'analyses de tiges. Enfin, quatorze placettes ont été coupées pour fin d'analyse au niveau des placettes.

1.4. Analyses comparatives au niveau des tiges individuelles libres de croître

1.4.1. Récolte des données

Quatre placettes (# 1, 2, 3 et 4) de qualité de station semblable (entre 15,8 et 16,4 m à 50 ans) et comportant une quantité suffisante de semis et de gaules de sapin ont été sélectionnées. Quatre autres placettes (# 5, 6, 9 et 13), ne contenant que des semis, ont été choisies de manière à ce que l'on puisse comparer leur croissance avec celle des semis provenant des placettes de gaules (tableau 1). Cette comparaison vise à vérifier si la croissance des semis utilisés dans l'analyse comparative a été influencée par la présence des gaules.

Tableau 1. Caractéristiques des placettes échantillonnées.

Placette	Phase écologique ¹	Dimension de la régénération ²	Indice de qualité de station ³	Analyse au niveau	
				de la tige	du peuplement
1	shr/lsg 31	4	16,2	X	X
2	shr/8sg 31	2	15,9	X	X
3	shm/8sg 30	4	16,4	X	X
4	shm/8sg 30	3	15,8	X	X
5	shm/8sg 30	0	14,7	X	X
6	sh/lsg 30	0	15,3	X	X
7	shm/lsg 30	1	13,7		X
9	shm/8sg 30	0	12,6	X	X
10	shm/lsg 30	1	13,1		X
11	shr/8sg 31	3	15,3		X
12	shr/8sg 31	3	15,1		X
13	shr/8sg 31	0	17,2	X	
14	shr/lsg 21	1	15,0		X
15	sm/8sg 30	1	15,4		X
16	shm/8sg 30	2	13,5		X

¹ Les phases écologiques proviennent de Tremblay et al. (1997).

Stations mésiques riches:

shr/lsg 31: sapinière à herbacées riche sur till épais avec drainage modéré et seepage;

shr/lsg 21: sapinière à herbacées riche sur till épais avec bon drainage et seepage;

shr/8sg 31: sapinière à herbacées riche sur altération épaisse avec drainage modéré et seepage.

Stations mésiques:

sh/lsg 30: sapinière à herbacées sur till épais avec drainage modéré;

shm/lsg 30: sapinière à herbacées et mousses sur till épais avec drainage modéré;

shm/8sg 30: sapinière à herbacées riche sur altération épaisse avec drainage modéré;

sm/8sg 30: sapinière à mousses sur altération épaisse avec drainage modéré.

² Les placettes ont été classées selon la dimension de la régénération lors de la coupe.

0: semis seulement;

1: semis avec une faible proportion de haute régénération;

2: forte proportion de gaules;

3: 10 à 20% de haute régénération avec diversité de dimension initiale;

4: forte proportion de haute régénération avec une diversité de dimension initiale.

³ L'indice de qualité de station (IQS) représente la hauteur à 50 ans à 1,3 m du sol.

Les tiges ont été récoltées en se basant sur un échantillonnage systématique illustré par la figure 3. À l'intérieur de chaque placette, 16 points ont été identifiés. Pour chacun des points, l'âge et le diamètre en 1943 étaient évalués sur le terrain pour le sapin dominant le plus près. Des carottages à 1,3 m du sol ont donc été réalisés avec une sonde de Pressler. Si les 16 arbres choisis se regroupaient en quatre semis et douze gaules en 1943, chaque tige était coupée pour analyse de tiges. Sinon, des points supplémentaires étaient ajoutés autour de la placette, de manière à atteindre, le plus possible, le nombre requis d'individus par groupe. Par la suite, 16 arbres étaient choisis aléatoirement pour analyse de tiges. Pour les quatre placettes de semis, quatre individus dominants étaient choisis au hasard à l'intérieur de la placette.

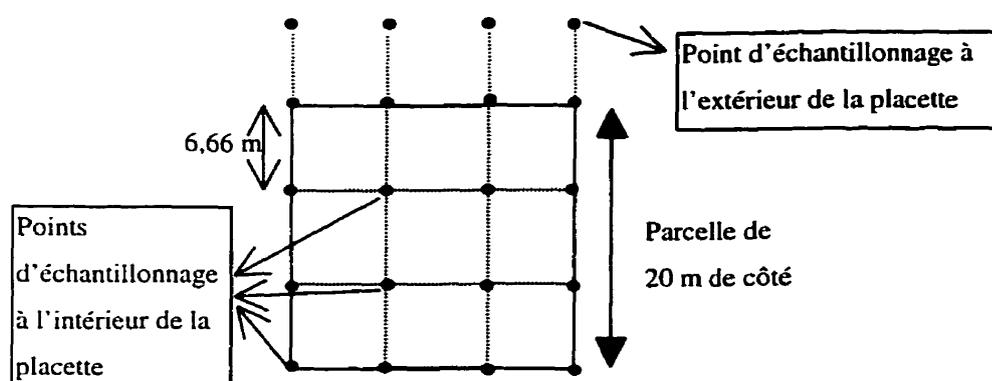


Figure 3. Schéma d'échantillonnage à partir des coins de placette.

La récolte des données a été effectuée en 1994 et en 1995 à partir de prélèvements de rondelles de bois sur des tiges de sapins baumiers. Lors de l'abattage des arbres étudiés, des rondelles ont été prélevées à la souche (0,2 m du sol), à 0,7 m, à 1,3 m, à 2,0 m et par la suite, à tous les mètres jusqu'à 9 m. À partir de cette hauteur, une rondelle était prélevée à tout les demi-mètres jusqu'à la pousse terminale. Cette procédure permet d'avoir une meilleure précision dans l'évaluation de la croissance en hauteur des 30 dernières années incluant la dernière période d'infestation de la tordeuse des bourgeons de l'épinette.

Les rondelles ont été séchées et sablées pour ensuite être analysées au moyen du logiciel Windendro™ (Guay et al. 1992). Les largeurs des cernes annuels ont été mesurées sur quatre rayons: les deux premiers passant par le plus grand diamètre et les deux autres à 90°. Le programme

Anatige (Bégin 1996) a été utilisé pour la compilation des données. Ce programme utilise la formule de Smalian pour calculer les volumes au-dessus de 20 cm du sol et la méthode de Carmean (1972) pour l'interpolation des hauteurs. Le volume marchand des tiges a été évalué en considérant un diamètre minimum d'utilisation de 9,1 cm sans écorce. Les mesures de volume étant prises à l'état sec, les données ont été transformées en valeurs humides en considérant un retrait radial de 2% (Thibault 1993). Quant aux mesures de diamètre, elles ont été modifiées pour obtenir des diamètres à l'état frais avec écorce.

Dans le but de vérifier les erreurs susceptibles de se produire lors du précomptage et de la numérisation des rondelles, le profil de croissance en diamètre de chacun des échantillons a été vérifié avec le profil généralement obtenu. Les creux et les pics devaient correspondre avec une courbe de référence. Sur chacune des rondelles, les surfaces affectées de carie et de décoloration ont été mesurées en utilisant les critères en vigueur au Québec dans les instructions de mesurage des bois abattus (MRNQ 1994).

Puisqu'on compare les semis avec la régénération de plus grande taille, il importe que les semis sélectionnés n'aient pas été affectés par celle-ci. Pour ce faire, une analyse graphique des courbes de croissance en hauteur ainsi qu'une comparaison statistique avec les semis provenant des placettes de semis ont été réalisées. À la suite de cette vérification, une tige a été rejetée. Les caractéristiques des analyses de tiges utilisées dans l'analyse comparative des tiges individuelles sont présentées à l'annexe A.

1.4.2. Estimation de l'accroissement spécifique en volume

L'accroissement spécifique en volume (ASV) est utile lorsque l'on veut comparer la croissance en volume d'individus de taille différente (Duff et Nolan 1957, Fayle et MacDonald 1977, Lussier et al. 1992, Morin et Gagnon 1992). Shea et Armson (1972) considèrent cette mesure comme étant le reflet de l'activité métabolique de l'arbre. L'ASV (cm^3/cm^2) se calcule en divisant l'accroissement annuel en volume (cm^3/an) par la surface cambiale moyenne (cm^2) de la tige durant l'année de croissance. C'est une mesure de la quantité de bois qui s'est ajoutée par

unité de surface de cambium, génératrice de cellules. Elle représente donc la moyenne des accroissements en rayon, tout le long de la tige, pondérée par le diamètre de la tige à une hauteur donnée. Le volume étant calculé selon la formule de Smalian, la surface cambiale a été évaluée selon la forme d'un parabolöide (Hamilton 1975).

1.4.3. Détermination de la cime efficace

Il est depuis longtemps reconnu que la cime a une influence sur la distribution des couches d'accroissement qui s'ajoutent en fonction de la hauteur. La loi de Pressler (1864) propose que l'accroissement en surface à un point donné dans la tige est proportionnelle à la quantité de feuillage au-dessus de ce point. Ainsi dans la cime, l'accroissement en surface à un point donné dépend de l'importance du flux au-dessus de ce point (figure 4). On observe aussi un maximum au niveau de la souche associé à l'effort supplémentaire apporté par les racines pour favoriser le maintien de la tige sur pied.

La position où l'accroissement en surface transversale est maximal dans la tige, à l'intérieur de la cime, coïncide généralement avec la zone où il y a le maximum de production photosynthétique (Larson 1963). Elle est donc située au-dessus de la base de la cime vivante et généralement associée à la portion du tronc où il y a le plus de branches vivantes. Sa localisation permet donc une évaluation de la dimension de la cime de l'arbre. Fayle et MacIver (1986) l'appellent la base de cime efficace et estiment la hauteur de cette dernière en examinant les patrons de croissance de chaque arbre. Ils soulignent également qu'une certaine discrétion est requise dans l'interprétation des profils de croissance.

À partir de rondelles récoltées à différentes hauteurs sur les analyses de tiges, des patrons ont été confectionnés pour chaque période et chaque arbre. Les critères pour déterminer la position de la base de cime étaient approximativement les mêmes que ceux de Fayle et Bentley (1989). Lorsque le maximum semblait être situé entre deux hauteurs, la mi-hauteur était utilisée. L'évaluation de la hauteur de base de cime efficace a été effectuée à partir de la moyenne de l'accroissement en surface transversale de trois années de croissance.

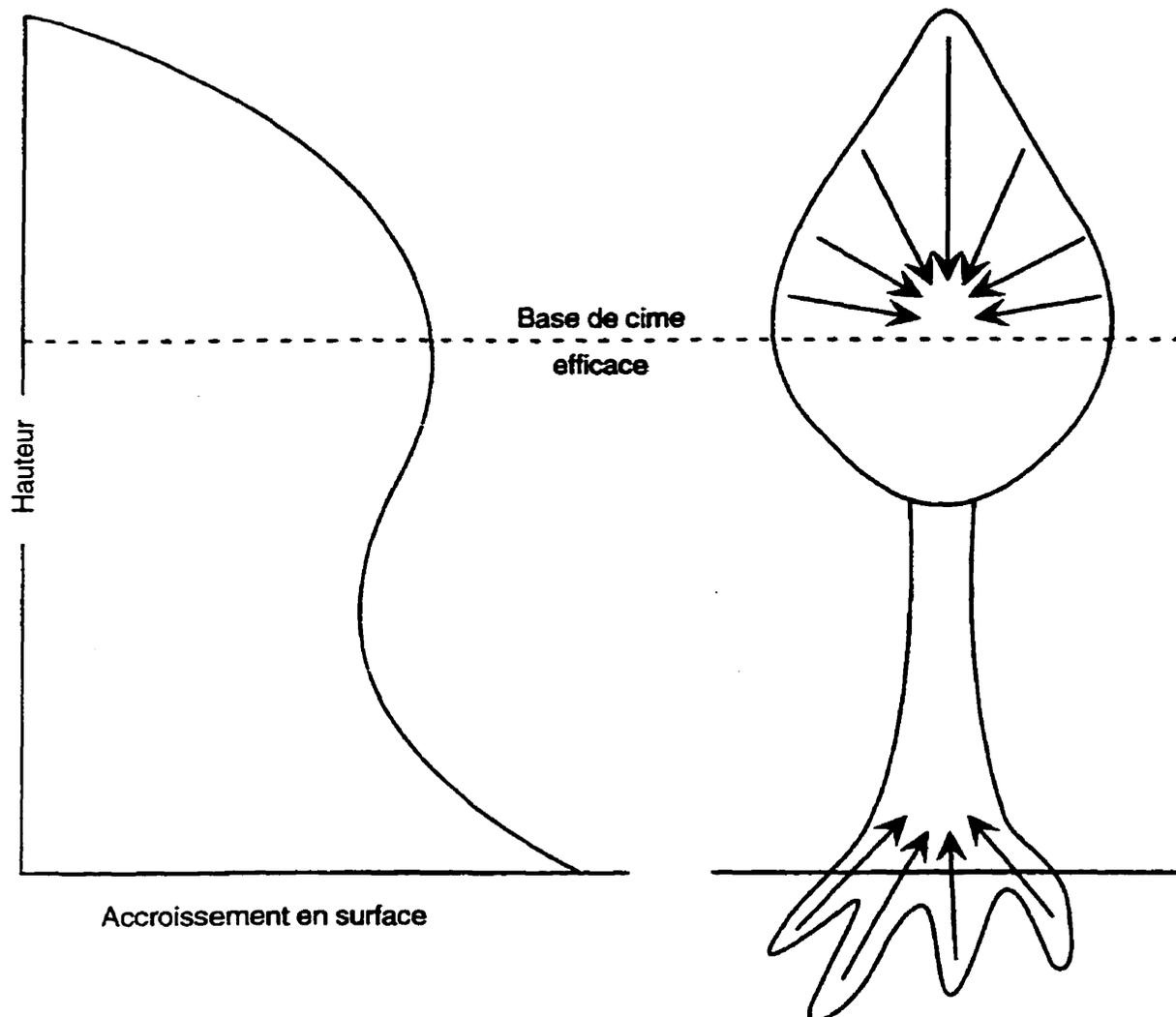


Figure 4. Schématisation de la cime efficace et de l'accroissement en surface.

Le choix des années a été effectué de manière à éviter les années de défoliations causées par la tordeuse des bourgeons de l'épinette. Les années centrales étaient donc : 1942, 1945, 1948, 1951, 1954, 1962, 1965, 1968, 1971, 1974 et 1990. L'interpolation linéaire entre les années a été utilisée pour évaluer la hauteur de la base de cime efficace à chaque année. La figure 5 montre un exemple d'interprétation. La proportion de cime efficace a été utilisée afin de caractériser la régénération préétablie lors de la coupe et d'expliquer l'accroissement après la coupe.

1.4.4. Formation des groupes

Une classification des tiges a été réalisée sur la base de leur dimension au moment de la coupe. On retrouve donc les semis, les gaules et les tiges récoltables. La hauteur initiale étant un facteur clef pour évaluer la réponse d'un arbre à l'ouverture du couvert (Hatcher 1964, Ferguson et Adams 1980, Lussier et al. 1992, Paquin et Doucet 1992b, Pothier et al. 1995), les gaules ont été subdivisées en trois catégories de hauteur. Afin de bien distribuer le nombre d'observations dans chacune des classes, les tiges récoltables ne représentent que les tiges marchandes des classes de diamètre à hauteur de poitrine (DHP) de 12 cm et plus. On considère donc les tiges de 10 cm comme étant des gaules. Notons que cette définition fait référence aux normes de matière ligneuse non-utilisée en vigueur en 1998 au Québec qui considèrent que, pour les tiges sur pied, seules celles possédant au moins une longueur marchande doivent être considérées comme résidus de coupe en infraction. Sur cette base, chez les sapins et les épinettes, on pourrait tolérer la protection des tiges de classe de 10 cm de DHP dans les CPRS (M. Jean-Claude Claveau, comm. pers.). Les critères de classification sont donc les suivants:

Semis:	$D_{t_0} < 11 \text{ mm}$
Petites gaules:	$D_{t_0} \geq 11 \text{ mm}$ et $H_{t_0} < 3 \text{ m}$
Moyennes gaules:	H_{t_0} entre 3 et 5 m
Grandes gaules:	$H_{t_0} \geq 5 \text{ m}$ et $D_{t_0} < 111 \text{ mm}$
Tiges récoltables:	$D_{t_0} \geq 111 \text{ mm}$

où D_{t_0} = DHP avec écorce en 1943;

H_{t_0} = hauteur totale en 1943.

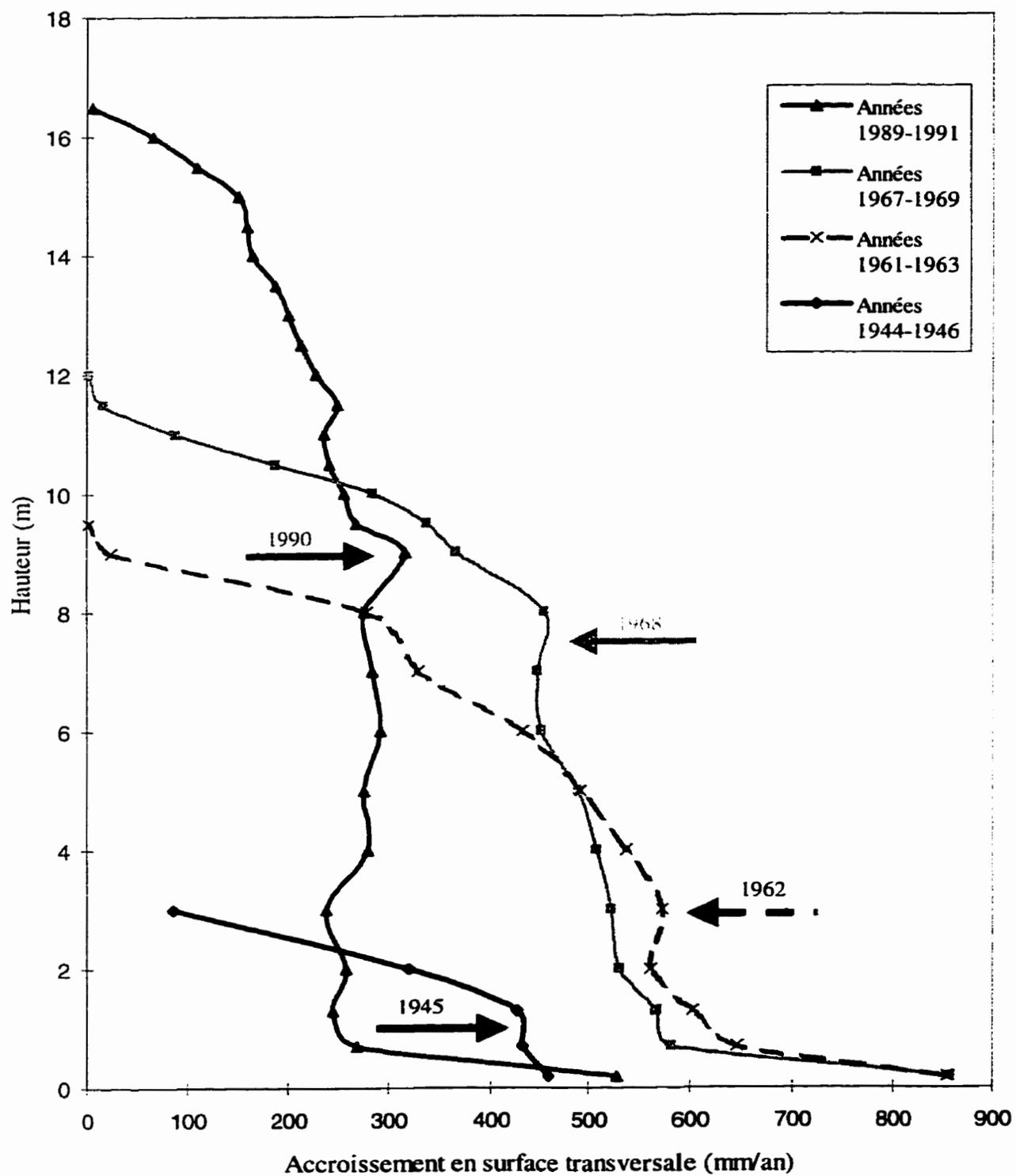


Figure 5. Évaluation de la base de cime à partir des patrons de croissance.

Les flèches indiquent la hauteur de la base de cime efficace pour l'année correspondante.

1.5. Analyses comparatives au niveau des placettes

1.5.1. Données d'inventaire disponibles

Le dispositif a été inventorié à quatre reprises depuis son établissement, soit en 1954, 1964, 1978 et 1990-91. Les diamètres ont été mesurés par classe d'un pouce. Dans les inventaires de 1954 et 1964, seuls le nombre de tiges, la surface terrière et le volume subdivisés en trois grandes classes de DHP étaient disponibles. En l'absence de données concernant le nombre de tiges par classe de diamètre, un programme d'itérations a été développé à partir des informations disponibles pour obtenir la distribution du nombre de tiges par classe de diamètre. L'obtention de ces données supplémentaires a donc permis de calculer les volumes marchands bruts à partir d'un tarif de cubage local. La comparaison entre les distributions de diamètre obtenues avec les rondelles prélevées à 1,3 m du sol et celles obtenues par l'inventaire de 1954 a permis une évaluation du taux de survie. Pour chacune des placettes, les volumes total et marchand ont aussi été recalculés de manière à utiliser les relations hauteur-diamètre obtenues à partir des analyses de tiges.

1.5.2. Analyses de tiges

Le prélèvement de rondelles de bois sur des tiges de sapins baumiers et d'épinettes a été effectué en 1994 et 1995. Les tiges servant à établir le tarif de cubage (annexe B) étaient choisies au hasard à l'intérieur des placettes assujetties à l'analyse au niveau du peuplement. Notons que toutes les analyses de tiges disponibles ont été utilisées pour le tarif de cubage, incluant des tiges récoltées en 1990 et 1992 dans le cadre d'une étude exploratoire réalisée dans certaines placettes (voir annexe C). Les tiges supplémentaires à échantillonner étaient déterminées à partir de la distribution du nombre de tiges par classes de 2 cm de DHP présentes dans la placette lors du dernier inventaire. Au moins une analyse de tige devait être présente par classe de diamètre et une supplémentaire pour chacune des trois classes les mieux représentées quant au nombre de tiges. Si la placette contenait suffisamment d'épinettes, des analyses de tiges supplémentaires

étaient récoltées. Au total, 269 tiges ont été analysées et débitées selon la méthode décrite à la section 1.4.1. En moyenne, 19 tiges par placette ont été sélectionnées pour fins d'analyse de tiges.

1.5.3. Coupe des placettes

À l'intérieur des quatorze placettes destinées à l'analyse au niveau du peuplement, toutes les tiges résineuses (vivantes et mortes) dont le DHP était supérieur à 11 mm étaient coupées pour prélever les rondelles de souche (20 cm du sol) et de hauteur de poitrine (1,3 m du sol). L'état et l'essence étaient notés ainsi que la hauteur totale des tiges vivantes. Les rondelles prises à 1,3 m du sol ont toutes été précomptées et numérisées selon la même procédure que celle établie pour les analyses de tiges. Dans le cas des arbres morts et des tiges fortement opprimées, le précomptage a été réalisé en se basant sur des années repères caractérisées par des cernes de faibles croissances ou de bois final mince. Quant aux rondelles de souche, l'année d'établissement (premier cerne) et le diamètre en 1944 ont été notés. De plus, les diamètres de carie et de décoloration étaient mesurés pour toutes les rondelles selon les mêmes critères utilisées pour les analyses de tiges.

1.5.4. Estimation de l'indice de qualité de station (IOS)

L'indice de qualité de station (IOS) est souvent considéré comme l'un des principaux critères pouvant exprimer la fertilité des stations (Assman 1970, Bégin 1992, Rondeux 1993, Spurr et Barnes 1980). Pour chacune des placettes échantillonnées, la qualité de station a donc été évaluée. Le modèle utilisé est celui de Ker et Bowling (1991) qui utilise l'âge à hauteur de poitrine (A) et la hauteur totale (H). L'indice (IOS) ainsi obtenu correspond à la hauteur totale à l'âge de 50 ans à 1,3 m du sol.

$$[1] \quad H = 1,3 + (IOS - 1,3)[1 - \exp(-b_2 50)]^{b_3 IOS^{b_4}} [1 - \exp(-b_2 A)]^{b_3 IOS^{b_4}}$$

b_2, b_3, b_4 = paramètres

L'utilisation de l'âge à hauteur de poitrine plutôt qu'à la souche présente plusieurs avantages. Celui-ci permet d'exclure, dans certains cas, les effets de l'oppression, de la carie (Boudoux 1978, Ker et Bowling 1991) ainsi que la croissance juvénile affectée par des facteurs extrinsèques à la qualité de station (Carnean 1978, Curtis 1964).

L'IQS a été établi à partir de sapins n'ayant jamais subi de période d'oppression et faisant partie du couvert dominant. Pour bien évaluer cet indice, deux critères ont été déterminés pour le choix des tiges à utiliser dans le calcul. Premièrement, seules les tiges ayant un DHP inférieur ou égal à 10 mm lors de la coupe étaient considérées. Deuxièmement, les tiges devaient faire partie du couvert dominant. Nous avons donc évalué la hauteur moyenne dominante, c'est-à-dire la moyenne des 100 plus grandes tiges à l'hectare (Smith et al. 1997). Étant donné que les placettes avaient une superficie de 1/25 hectare, cette valeur correspondait à la moyenne des quatre plus grandes tiges présentes à l'intérieur de la placette. Puisque l'étage dominant se termine approximativement au 5/6 de la hauteur des dominants (MRNQ 1995), nous avons considéré toutes les tiges supérieures à ce niveau. Toutes les tiges vivantes dont on connaissait la hauteur et l'âge étaient susceptibles d'être utilisées.

1.5.5. Évaluation de la relation entre le diamètre avec écorce et le diamètre mesuré

Lors de la récolte des analyses de tiges, le diamètre avec écorce à hauteur de poitrine (D_f en cm) a été mesuré afin de le comparer avec la valeur obtenue lors de la numérisation c'est-à-dire le diamètre sans écorce après séchage (D_s en cm). Il en résulte une relation linéaire très étroite ($R^2= 99,9\%$ et C.V.= 2,8%) passant par l'origine (équation 2). Cette équation a été utilisée afin de convertir les mesures de diamètre prises sur les rondelles, en diamètre à l'état frais avec écorce.

$$[2] \quad D_f = 1,109827 * D_s$$

1.5.6. Évaluation du volume à l'hectare

Pour évaluer le volume ligneux présent dans chacune des placettes, des relations entre la hauteur (H en m) et le diamètre à hauteur de poitrine (D en cm) ont été établies en utilisant les données d'analyse de tiges présentes à l'intérieur des placettes. Le modèle utilisé pour les sapins en est un paramétré qui exprime la hauteur (H) en fonction du diamètre moyen à hauteur de poitrine (D_m en cm) et de la hauteur moyenne (H_m en m) des analyses de tiges présentes à l'intérieur des placettes (Bégin et Raulier 1995). À partir de la régression non-linéaire, le coefficient b_1 (voir équation 3) a été évalué pour chacune des placettes et pour chaque année d'inventaire.

$$[3] \quad H = 1,3 + [D / (b_1 + ((D / D_m) (D_m / (H_m - 1,3)^{1/2}) - b_1))]^2$$

Pour ce qui est des épinettes, la hauteur a été évaluée à partir du même modèle utilisé pour l'évaluation de la hauteur de la régénération lors de la coupe. Les volumes marchands bruts ont été calculés à partir des tarifs de cubage de Perron (1985).

1.5.7. Évaluation de la hauteur de la régénération lors de la coupe

Afin d'évaluer la hauteur initiale (en 1943) des tiges auxquelles seules les rondelles à 0,2 et 1,3 m du sol ont été récoltées, une relation hauteur-diamètre a été établie. À partir des analyses de tiges disponibles, une équation exprimant la hauteur (H en m) en fonction du diamètre avec écorce à hauteur de poitrine (D en cm) a été générée. Le modèle 3 de Bégin et Raulier (1995) a donc été utilisé pour évaluer la hauteur en 1943 des tiges possédant un DHP. L'équation obtenue est une courbe non-linéaire ayant un pseudo- R^2 égal à 96,8%.

$$[4] \quad H = 1,3 + (D^2 / (2,058 + 0,187 D)^2)$$

Pour les tiges n'ayant pas atteint 1,3 m de hauteur lors de la coupe, la hauteur a été évaluée à partir du diamètre sans écorce mesuré sur la rondelle de souche (D_s en cm). La relation est linéaire avec un coefficient de détermination de 86,5%.

$$[5] \quad H = 0,57 D_s + 0,21$$

CHAPITRE 2. CARACTÉRISTIQUES DES TIGES LORS DE LA COUPE ET ÉVOLUTION DES DIMENSIONS DENDROMÉTRIQUES

2.1. Introduction

Quelques chercheurs (Morris 1948, Hatcher 1960, 1964, Gagnon 1985) ont étudié la question de l'oppression du sapin baumier. Ils démontrent généralement qu'une fois le couvert dominant éliminé, l'accroissement des semis paraît non influencé par la durée de l'oppression. D'autres études ont démontré la capacité de semis de sapin baumier à réagir positivement suite à la mise en lumière soudaine (Ghent 1958, Fye et Thomas 1963, Pominville 1993, Ruel et Huot 1993).

De ces études, seule celle de Morris (1948) précise que des gaules (tiges possédant un DHP lors de la coupe) affichent une croissance radiale similaire à celle des semis. Dans l'état de New York, McCarthy (1918) rapporte que des tiges, âgées jusqu'à 60 ans avant la coupe (maximum de 10 cm de diamètre à la souche), ont obtenu des hauteurs et des diamètres semblables à ceux des semis, cinquante ans plus tard. Pour sa part, McGraw (1948) souligne que des tiges, possédant un diamètre à hauteur de souche jusqu'à 24 cm lors d'une coupe à diamètre limite, ont su maintenir leur supériorité au niveau du diamètre.

Malgré ces études, les forestiers ont généralement considéré ces tiges comme étant inaptes à réagir après coupe à cause de leur âge élevé. Cependant, au Québec, suite à quelques études démontrant le bon potentiel de réaction des marcottes d'épinettes noires après ouverture du couvert (Lussier et al. 1992, Morin et Gagnon 1991, 1992, Paquin et Doucet 1992a, 1992b, Pothier et al. 1995), la valeur des tiges préétablies de forte dimension a été reconsidérée.

Chez le sapin baumier encore beaucoup de questions se posent quant à la valeur de ces tiges. Quelles sont les caractéristiques d'une tige ayant le potentiel de survivre et de prospérer

suite à la coupe ? Comment réagira-t-elle à la mise en lumière ? Maintiendra-t-elle sa supériorité face aux semis préétablis de petite taille et aux tiges post-établies ?

Les objectifs poursuivis dans le présent chapitre sont :

1. de caractériser les tiges au moment de la coupe;
2. de comparer l'évolution des semis libres de croître, des gaules et des tiges récoltables après la coupe en termes de hauteur, de diamètre, de volume total, de proportion de cime efficace, d'accroissement spécifique en volume et de coefficient de forme.

2.2. Matériel et méthodes

2.2.1. Calcul du coefficient de forme

Pour vérifier l'effet de la hauteur initiale sur la forme de l'arbre, le coefficient de forme (CF) a été calculé à partir de l'équation [6].

$$[6] \quad CF = V / (3,1415 * D^2 * H / 40\ 000)$$

V = Volume total (m³)

D = Diamètre à hauteur de poitrine (cm)

H = Hauteur totale (m)

2.2.2. Analyses statistiques

Toutes les analyses statistiques ont été réalisées à partir du logiciel SAS. Les analyses de comparaison multiple ont été effectuées avec le test LSMEANS, une composante de la procédure GLM. Une différence entre deux groupes est déclarée significative si la probabilité est inférieure au seuil de 5% divisé par le nombre de groupes dans le modèle. Cette méthode, développée par Rice (1989), est considérée comme étant plus conservatrice que le test de Bonferroni. Les régressions linéaires ont été réalisées à partir de la procédure REG.

2.3. Résultats

2.3.1. Caractéristiques des tiges lors de la coupe

La figure 6 représente l'apparence des semis et de la haute régénération en 1943, telle qu'établie par analyse de tiges. D'une façon générale, ceux-ci possédaient une proportion de cime efficace variant de 40% à 85% de la hauteur totale. Les grandes gaules et les tiges récoltables possédaient les plus faibles pourcentages de cime (54%) alors que les petites gaules avaient des pourcentages de cime efficace autour de 80%. L'âge des tiges à la souche montre que les gaules ont généralement vécu plus de 30 ans sous couvert. Certaines tiges récoltables avaient plus de 80 ans lors de la coupe de 1944. Quant aux semis étudiés, la plupart étaient déjà établis sous couvert depuis 10 ans.

L'analyse de la hauteur des tiges étudiées révèle la présence d'un large éventail de dimension de sapins baumiers protégés lors de la coupe. Certaines tiges avaient plus de 10 m de hauteur. La tige la plus grosse avait un DHP de 17 cm. Le coefficient d'élancement (rapport entre la hauteur et le DHP) de la haute régénération préétablie de plus de 3 m s'élevait à 0,8 m de hauteur par centimètre de DHP.

2.3.2. Évolution de la hauteur après la coupe

Malgré un accroissement en hauteur inférieur à celui des semis, les tiges de dimension supérieure maintiennent leur supériorité tout au long de la révolution (figure 7). Cependant, 47 ans après la coupe, seules les tiges de plus de 5 m en 1943 sont encore significativement plus grandes que les semis. Pour leur part, les semis, les petites et les moyennes gaules, bien qu'ils ne se distinguent plus significativement en termes de hauteur, occupent encore l'espace vertical suivant leur ordre initial. La figure 8 indique que la relation entre la hauteur 10, 30 et 47 ans après la coupe et la hauteur initiale est fortement linéaire ($P > F=0,0001$). La pente de la droite, ainsi que le coefficient de détermination tendent à diminuer à mesure que l'on s'éloigne de

l'année de coupe. Ainsi, avec le temps, les différences entre les tiges de fortes dimensions initiales et celles de plus petites tailles s'atténuent. Comme on peut le constater, l'accroissement moyen après coupe des plus grandes tiges en 1943 est deux fois plus faible que celui des semis.

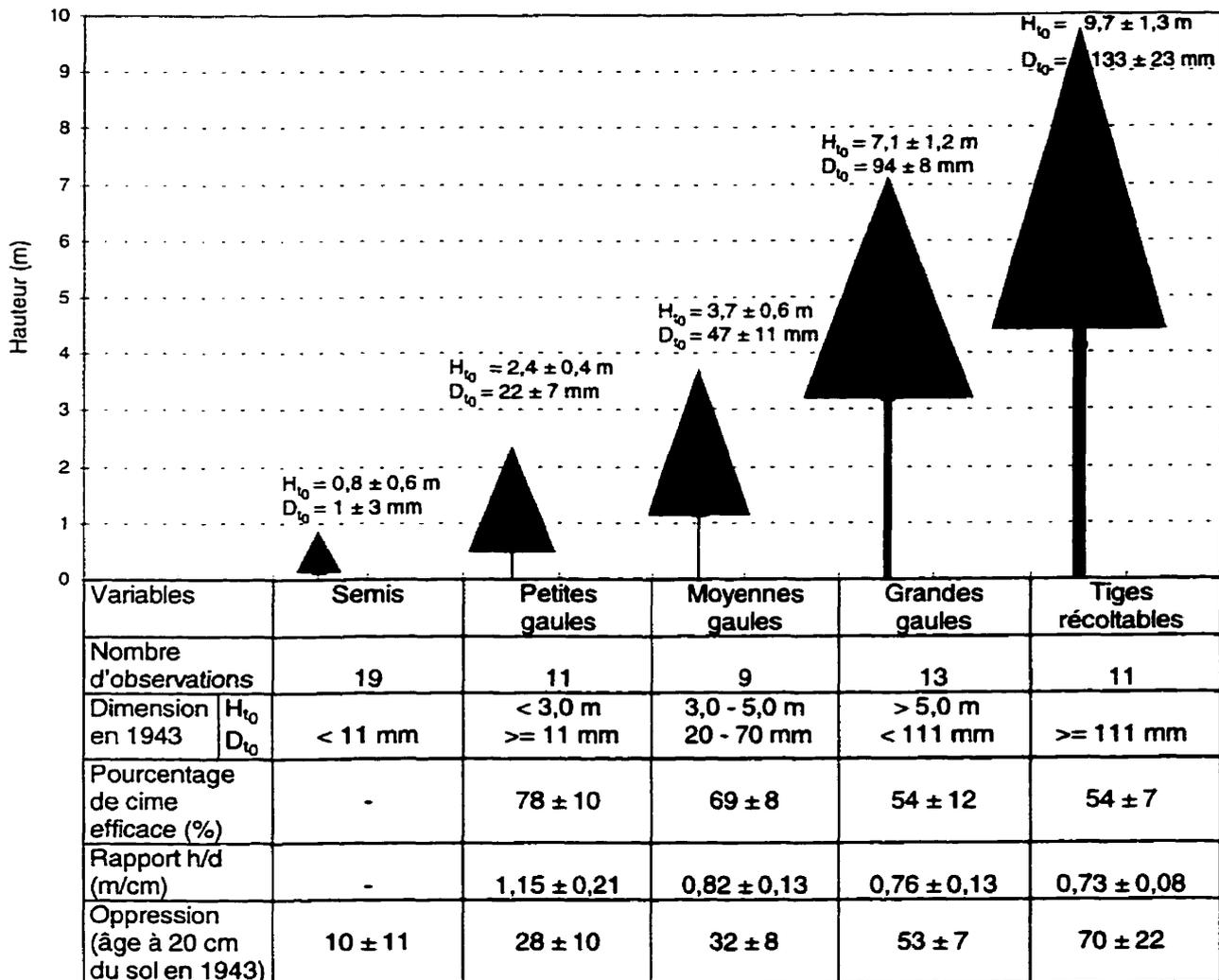


Figure 6. Caractéristiques des tiges lors de la coupe.

H_{10} : Hauteur totale au moment de la coupe;

D_{10} : Diamètre avec écorce à hauteur de poitrine au moment de la coupe.

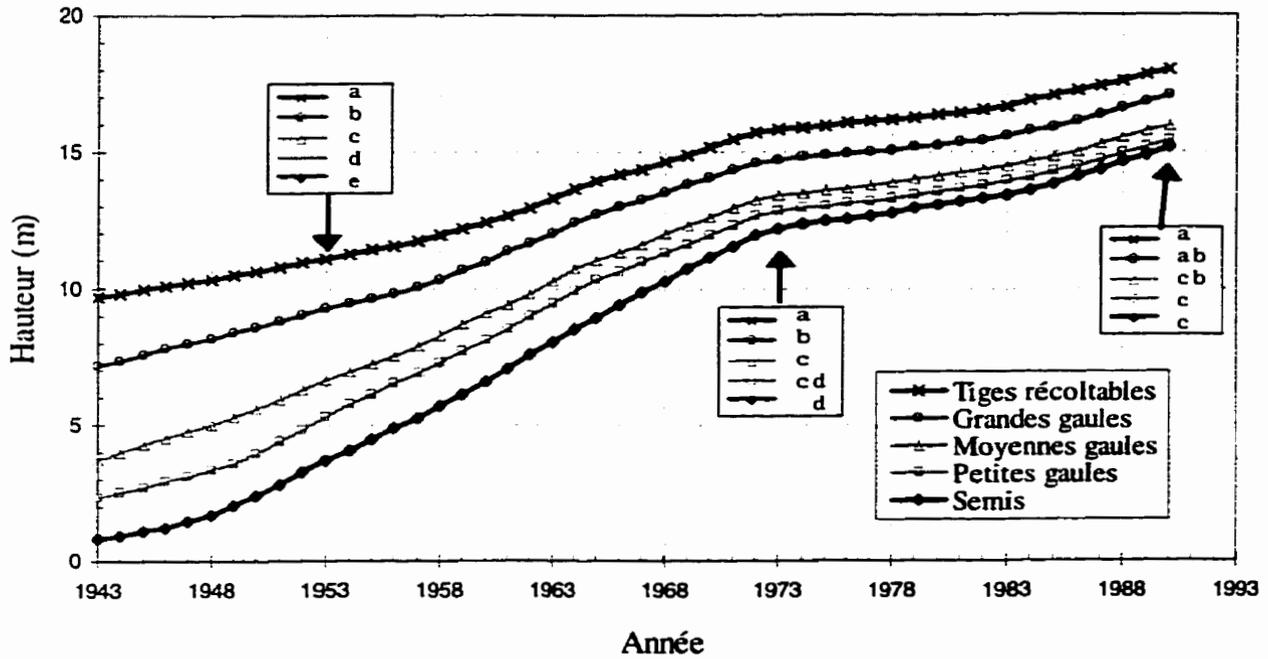


Figure 7. Évolution de la hauteur totale après coupe.

L'absence de différence significative (LSMEANS, $\alpha=0,05$) entre deux moyennes est indiquée par des lettres identiques.

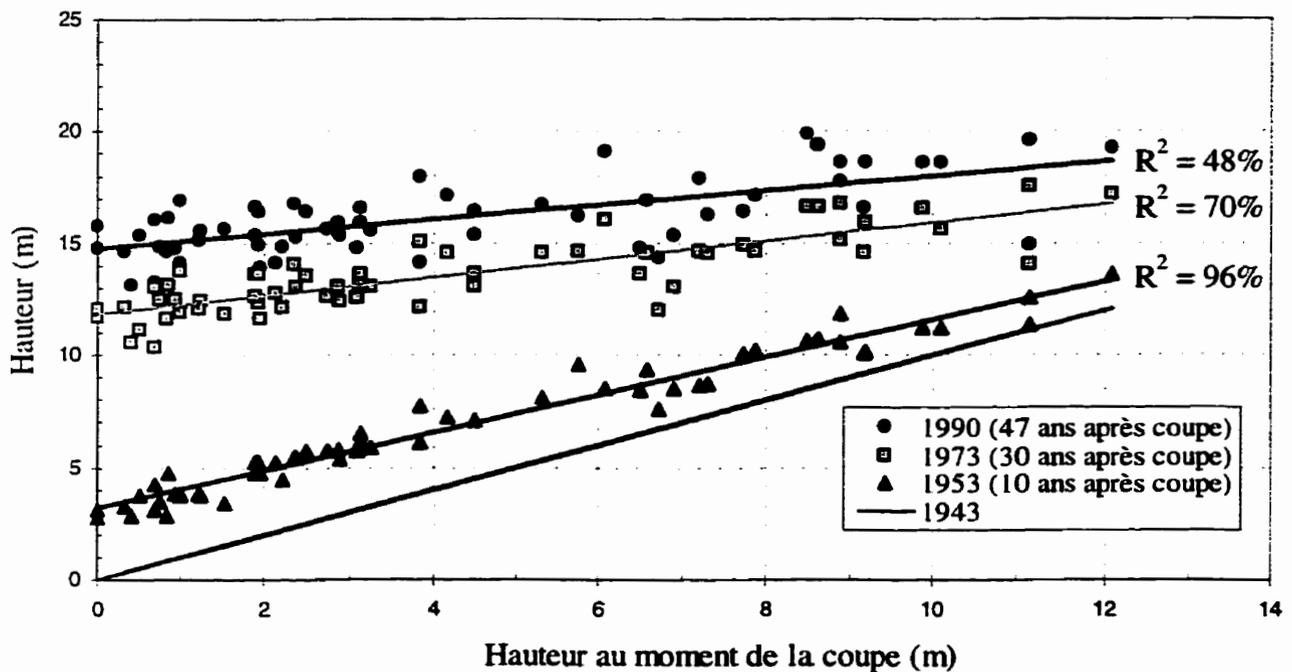


Figure 8. Relation entre la hauteur 10, 30 et 47 ans après coupe et la hauteur initiale.

2.3.3. Évolution du diamètre après la coupe

En terme de diamètre à hauteur de poitrine, les grandes gaules et les tiges récoltables conservent un avantage marqué par rapport aux autres tiges (figure 9). Tout au long de la période étudiée, elles possèdent des diamètres significativement supérieurs à ceux des autres groupes. En moyenne, pour les tiges récoltables, il faut 21 ans après coupe pour obtenir des diamètres de 20 cm à 1,3 m du sol alors que les semis ne possèdent pas tout à fait ces dimensions presque 50 ans après la coupe. Quant à elles, les gaules de moins de 5 m lors de la coupe perdent leur avantage sur les semis. La croissance juvénile des semis, beaucoup plus vigoureuse, fait en sorte qu'il n'y a plus de différence avec les petites et moyennes gaules à la trentième année suivant la coupe. Les moyennes gaules sont celles qui ont le moins bien évolué car elles sont les plus petites à la fin de la période étudiée. À noter le parallélisme marqué des courbes d'évolution du diamètre des tiges récoltables et des grandes gaules. Ces deux groupes ont donc sensiblement le même rythme de croissance après la coupe.

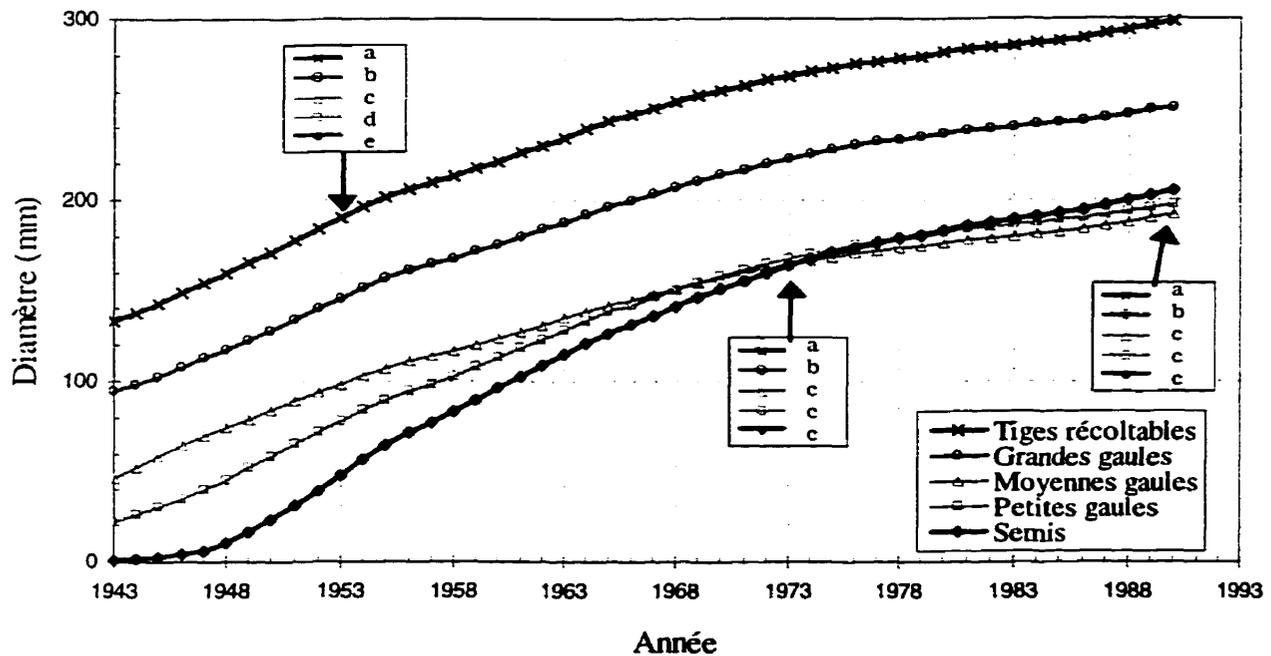


Figure 9. Évolution du diamètre à hauteur de poitrine avec écorce après coupe.

L'absence de différence significative (LSMEANS, $\alpha=0,05$) entre deux moyennes est indiquée par des lettres identiques.

2.3.4. Évolution du volume total après la coupe

Les courbes d'évolution du volume total démontrent un net avantage des tiges de plus de 5 m de hauteur en 1943 sur les tiges plus petites (figure 10). Elles atteignent des volumes de près de 0,5 m³, comparativement à 200 dm³ chez les tiges de moins de 5 m lors de la coupe. À l'opposé de l'accroissement en hauteur, l'accroissement moyen en volume des plus grandes tiges après coupe est deux fois plus élevé que celui des semis. Quant aux gaules de moins de 5 m, leur différence avec les semis n'est plus significative à partir de la trentième année suivant la coupe. Les semis sont même légèrement plus volumineux que les petites et moyennes gaules à la fin de la période étudiée. Il ne semble donc pas que leur dimension initiale leur ait procuré une avance suffisante pour se démarquer des semis libres de croître.

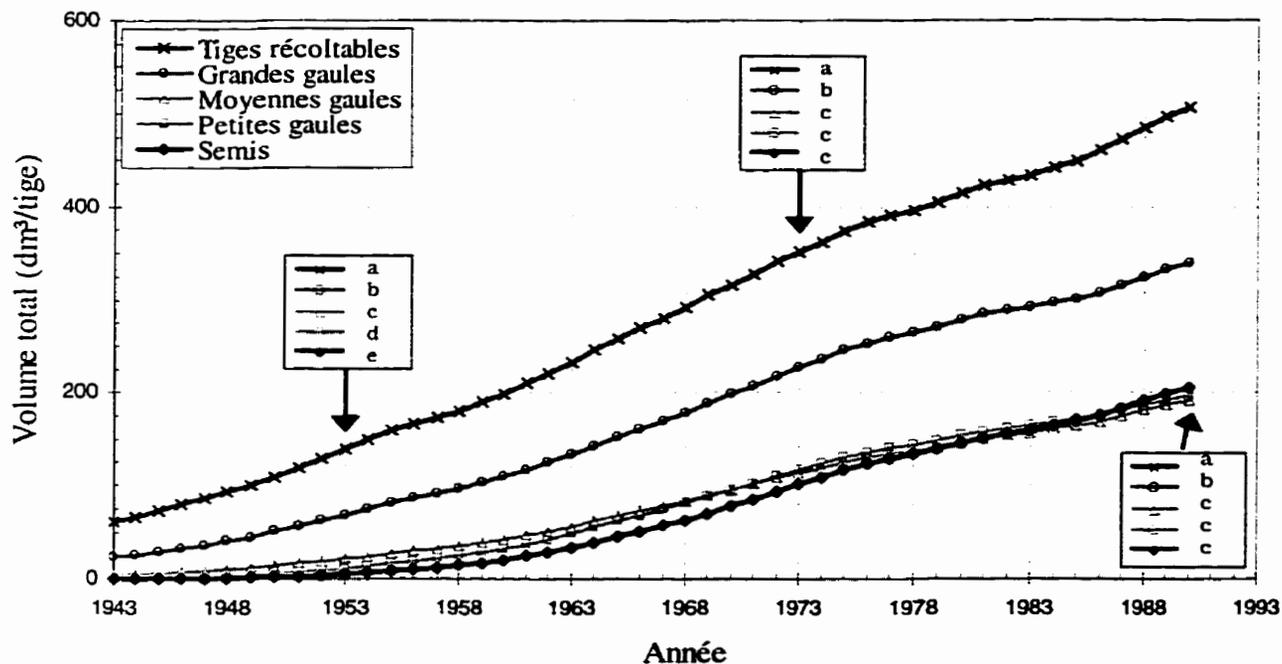


Figure 10. Évolution du volume total par tige après coupe.

L'absence de différence significative (LSMEANS, $\alpha=0,05$) entre deux moyennes est indiquée par des lettres identiques.

2.3.5. Évolution du pourcentage de cime efficace après la coupe

Lors des premières décennies après la coupe, les semis possèdent les pourcentages de cime les plus élevés (figure 11). En général, les tiges qui avaient une cime limitée par l'oppression du couvert et qui ont survécu, ont généralement réussi à s'adapter aux nouvelles conditions de lumière. Ainsi, les grandes gaules et les tiges récoltables, qui possédaient les plus petites proportions de cime en 1943, ont su accroître leur pourcentage de cime efficace durant les dix années suivant la coupe. À partir des années '70, les tiges étudiées ont des proportions de cime semblables, peu importe la dimension initiale. Avec la fermeture du couvert les proportions de cime efficace ont diminué dans toutes les classes, se stabilisant entre 40 et 50% de la hauteur totale.

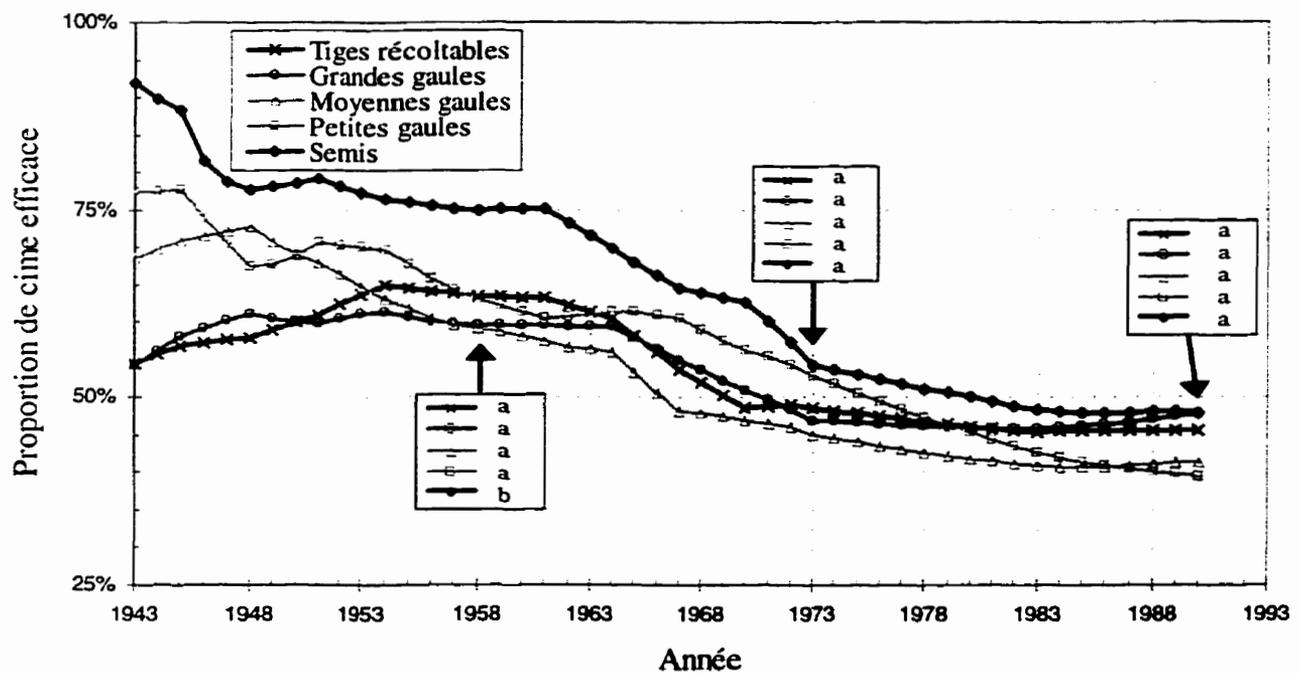


Figure 11. Évolution du pourcentage de cime efficace après coupe.

L'absence de différence significative (LSMEANS, $\alpha=0,05$) entre deux moyennes est indiquée par des lettres identiques.

2.3.6. Évolution de l'accroissement spécifique en volume

L'étude de la courbe d'accroissement spécifique en volume (ASV) en fonction des années indique que les semis ont la meilleure capacité à accroître leur volume par unité de surface cambiale (figure 12). En faisant abstraction des premières années après la coupe et entre 1981 et 1989, il y a une différence significative entre les semis et les tiges de plus de 3 m en 1943. Les gaules et les tiges récoltables sont toutefois très semblables entre elles à partir de la fin des années '60. La comparaison de l'ASV après coupe avec celui avant coupe (1939-1943) montre que toutes les classes semblent avoir réagi en augmentant leur accroissement. Notons les baisses marquées d'accroissement causées par les deux périodes épidémiques de tordeuse des bourgeons de l'épinette. À première vue, les pertes de croissance n'étaient pas plus prononcées chez les tiges les plus vieilles que chez les semis. Des baisses de croissance sont observables en 1947 et 1948 chez les gaules et les tiges récoltables. Selon les données historiques, il n'y avait pas d'insectes défoliateurs présents pendant cette période.

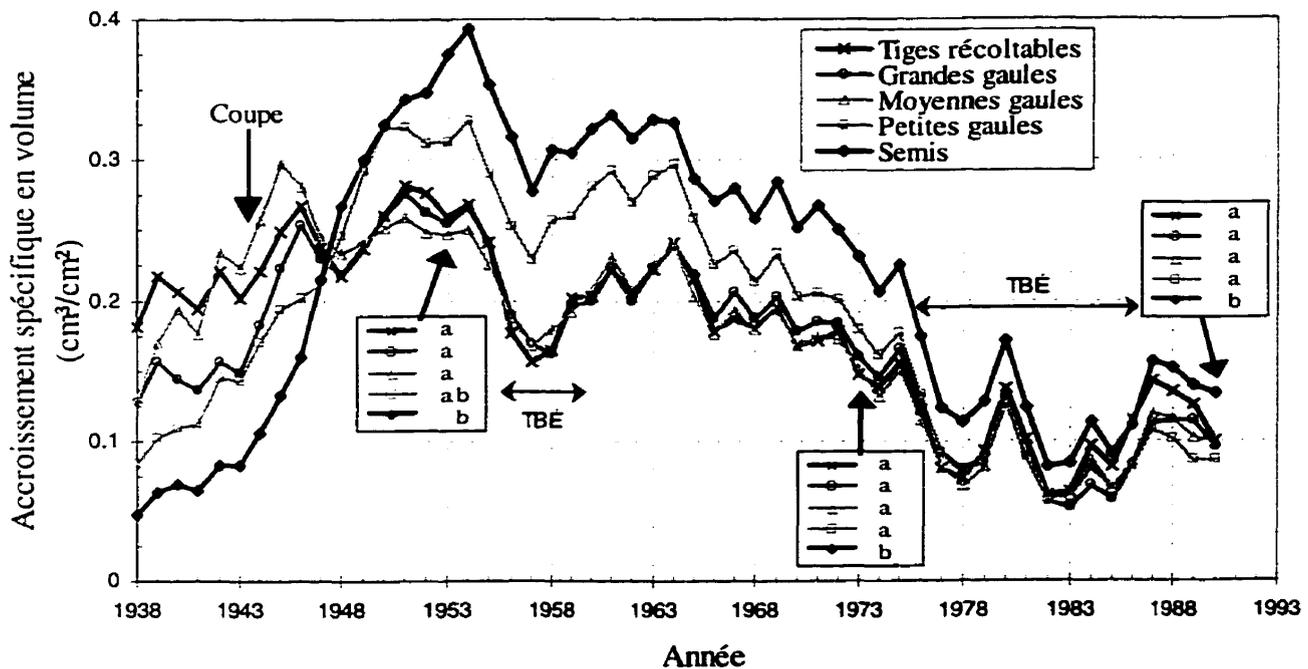


Figure 12. Évolution de l'accroissement spécifique en volume.

L'absence de différence significative (LSMEANS, $\alpha=0,05$) entre deux moyennes est indiquée par des lettres identiques.

2.3.7. Étude du coefficient de forme

Une analyse du coefficient de forme obtenu en 1990 montre qu'il n'y a pas d'impact significatif (seuil $\alpha=0,05$) de la classe de dimension en 1943. Ainsi ce coefficient varie de 0,47 à 0,49 peu importe la classe de régénération lors de la coupe. La forme des tiges produites 47 ans après la coupe ne semble donc pas fonction de la hauteur initiale des tiges.

2.4. Discussion

2.4.1. Caractéristiques des tiges lors de la coupe

Les tiges étudiées, provenant du couvert codominant et dominant lors de l'échantillonnage, possédaient des dimensions variables au moment de la coupe. Les tiges les plus grandes avaient connu des périodes d'oppression de plus de 50 ans avant l'ouverture du couvert. L'étude de la durée de l'oppression laisse supposer que les petites et moyennes gaules ont probablement bénéficié de l'ouverture du couvert causée par le passage d'une épidémie de tordeuse des bourgeons de l'épinette vers 1912 et de la mortalité d'épinettes dans les années '30. L'établissement des grandes gaules et des tiges récoltables remonterait plutôt à la fin du 19^{ième} siècle. Les semis, quant à eux, se seraient établis depuis les années '30 jusque dans les toutes premières années suivant la coupe.

Ferguson (1984) souligne l'importance d'identifier les caractéristiques minimales requises pour considérer la régénération préétablie comme acceptable. Ainsi le rapport entre la longueur de cime vivante et la hauteur totale est identifié par plusieurs auteurs comme une variable importante affectant la survie de résineux. Ruel et al. (1995) ont observé des taux de mortalité, à l'intérieur des trois premières années après la coupe, inférieurs à 10% chez la régénération possédant plus de 67% de cime vivante. Seidel (1980) et McCaughey et Ferguson (1988) suggèrent un pourcentage de cime vivante supérieur à 40-50%. La cime semble aussi jouer un rôle dans la capacité des tiges à réagir. Ainsi, Helms et Standiford (1985) soulignent

l'importance de la proportion de cime vivante comme indicateur de la vigueur de l'arbre. Seidel (1977) a observé que les tiges autour de 1,5 m de hauteur et ayant un pourcentage de cime supérieur à 40%, répondent bien et rapidement à l'ouverture du couvert.

Les résultats de la présente étude concordent avec ces observations car les pourcentages de cime efficace chez tous les individus étudiés étaient tous supérieurs à 40% lors de la coupe. Les plus forts pourcentages ont été observés chez les petites et moyennes gaules alors que les tiges de plus de 5 m (grandes gaules et tiges récoltables) avaient des proportions de cime près de 55%. Chez les tiges de moins de 5 m en 1943, le pourcentage de cime efficace est généralement supérieur à 60%. Il semble donc qu'il serait à propos d'estimer les proportions de cime, lors des inventaires après coupe, afin de caractériser la qualité de la régénération protégée, comme le suggèrent Ruel et Doucet (1998).

La technique utilisée dans cette étude évalue la base de cime efficace à partir des accroissements le long de la tige. Elle permet une évaluation de la dimension de la cime à n'importe quelle année. Il importe toutefois de souligner que la cime efficace ne constitue qu'une approximation de la cime vivante. Compte tenu de la concordance des résultats avec ceux d'autres études (citées plus haut), la technique semble valide mais l'interprétation doit se faire avec précaution.

Au niveau de la résistance aux vents des tiges protégées, on admet que les arbres opprimés affichent des coefficients hauteur/diamètre élevés (Larson 1963). Ainsi le diamètre se développe peu à cause des conditions sévères de compétition alors que la croissance en hauteur doit se maintenir pour permettre à la tige d'atteindre l'étage supérieur. Chez les tiges de plus de 5 m (les grandes gaules et les tiges récoltables), les coefficients étaient aux environs de 0,75 m/cm au moment de la coupe. Des coefficients plus élevés, généralement associés à une oppression plus sévère avant coupe, pourraient être critiques pour les risques de chablis (Peltola et Kellomäki 1993). Quelques auteurs considèrent que les peuplements constitués de tiges avec des coefficients d'élancement supérieurs à 1 m/cm sont instables (Petty et Worrell 1981, Cremer et al. 1982, Petty et Swain 1985). Becquey et Rioux-Nivert (1987) indiquent que la limite de stabilité

pour un peuplement résineux de 10 m de hauteur correspond à un coefficient d'élanement de 0,8 m/cm. Les peuplements présentant des coefficients inférieurs sont considérés comme étant résistants à des éclaircies très fortes. Selon la littérature, les tiges étudiées étaient donc peu vulnérables au chablis. Bien que les gaules de moins de 5 m avaient des coefficients d'élanement plus élevés, leurs faibles dimensions limitaient les risques.

2.4.2. Évolution des dimensions dendrométriques après coupe

2.4.2.1. Hauteur totale

L'évolution de la hauteur totale montre que les plus hautes tiges présentes lors de la coupe maintiennent leur supériorité tout au long de la période étudiée. Presque 50 ans après la coupe, les tiges occupent l'espace vertical suivant leur ordre initial. De plus, il semble que cette tendance se maintiendra à plus long terme. Toutefois la différence entre la haute régénération préétablie et les semis s'atténue avec le temps. Ces observations s'apparentent à celles rapportées chez les marcottes d'épinette noire au Québec (Paquin et Doucet 1992b, Lussier et al. 1992, Pothier et al. 1995). Quant aux tiges de plus de 5 m lors de la coupe, elles se démarquent significativement des tiges de moins de 3 m. Paquin et Doucet (1992b) ont fait la même observation entre les tiges de plus de 3 m (jusqu'à 7 m de hauteur) et les plus petites, 59 ans après coupe. Toutefois, 47 ans après la coupe, les hauteurs ne sont plus différentes entre les gaules de moins de 5 m et les semis libres de croître. Chez le sapin, McCarthy (1918) a aussi observé des hauteurs semblables 50 ans après la coupe, chez des sapins ayant connu des périodes d'oppression différentes. Donc malgré un âge plus élevé, les tiges protégées conservent leur dominance mais croissent en hauteur à moins grande vitesse.

Un lien étroit est conservé entre la hauteur obtenue après la coupe et la hauteur initiale. Ainsi, la hauteur après coupe demeure directement proportionnelle à la hauteur initiale tout au long de la période étudiée. Chez l'épinette noire, plusieurs auteurs ont plutôt observé un lien logarithmique (Horton et Groot 1987, Lussier et al. 1992, Paquin et Doucet 1992b, Ouellet 1996). Cette différence réside probablement dans le fait que, dans ces études, les plus petites tiges ont souffert de la compétition par les plus grosses lors des premières années après la coupe. Étant

donné que les semis sélectionnés dans notre étude étaient libres de croître, la croissance des plus petites tiges ne fut pas inhibée. La présence d'un plateau dans l'évolution de la hauteur des tiges de dimension supérieure, les années suivant la coupe, témoigne d'un délai dans l'adaptation des tiges à leur nouvel environnement. Cet aspect sera plus approfondi dans le prochain chapitre.

2.4.2.2. Diamètre à hauteur de poitrine

L'évolution du DHP montre que les tiges de plus de 5 m lors de la coupe se sont le mieux développées après l'ouverture du couvert. Les tiges récoltables, qui avaient en moyenne 13 cm de DHP en 1943, ont atteint des dimensions imposantes avec des diamètres de 30 cm, 47 ans plus tard. Ces tiges ont donc profité de leur supériorité pour accroître leur diamètre, atteignant des dimensions de bois de sciage beaucoup plus rapidement que la régénération plus basse. À Terre-Neuve, McGraw (1948) a d'ailleurs observé sur des sapins ayant entre 10 et 16 cm de diamètre à hauteur de souche (DHS) lors de la coupe, des DHS autour de 24 cm, 16 ans après coupe. Ainsi, les tiges avaient conservé une supériorité en terme de diamètre par rapport à des tiges ayant subi une période d'oppression moins longue (autour de 30 ans).

Quant aux tiges de moins de 5 m de hauteur initiale, il n'y a plus de différence marquée entre elles et les semis à partir de la trentième année après la coupe. Ainsi les semis ont connu une croissance juvénile assez vigoureuse à l'intérieur des 20 premières années après la coupe. Lors de l'échantillonnage ces semis avaient même dépassé les petites et moyennes gaules. Il semble donc que les tiges entre 0 et 5 m de hauteur lors de la coupe atteindront des diamètres semblables. Ces observations concordent avec celles de McCarthy (1918) et Morris (1948) qui ont étudié l'évolution de tiges de moins de 5 cm de diamètre à la souche lors de l'ouverture du couvert. Ces auteurs avaient remarqué de très faibles différences entre les tiges qui avaient connu des périodes d'oppression initiale variable avant l'ouverture du couvert.

2.4.2.3. Volume total

Au niveau du volume total par tige, les sapins de plus de 5 m ont démontré leur capacité d'occuper l'espace disponible après la coupe en atteignant des dimensions supérieures à 0,5 m³/tige, 47 ans après la coupe. Les tiges récoltables au moment de la coupe ont obtenu des volumes jusqu'à 2½ fois plus élevés que les semis. À l'opposé de la hauteur et du diamètre, la

différence entre le volume total des tiges de plus de 5 m et la régénération de plus petite taille augmente avec le temps. Une tendance similaire fut observée par Pothier et al. (1995). Toutefois, comparativement à cette dernière étude, les tiges de moins de 5 m lors de la coupe se démarquent moins bien des semis. Il semble donc que leur dimension initiale ne leur ait pas procuré une avance suffisante pour surpasser les semis à la fin de la période étudiée. Il est difficile d'expliquer la faible performance des petites et moyennes gaules. Il faut toutefois tenir compte qu'on les compare avec des semis libres de croître qui ont subi peu de compétition. Cependant, la raison la plus plausible réside dans le fait que, durant les premières décennies après la coupe, les pourcentages de cime des semis libres de croître sont plus élevés que la haute régénération préétablie. Cet avantage des semis peut avoir été suffisant pour surpasser, en termes de diamètre et de volume, les gaules les plus petites.

2.4.2.4. Proportion de cime efficace

L'étude de l'évolution de la proportion de cime efficace après la coupe montre que les tiges ont en général bien réagi à l'ouverture du couvert. Par exemple les tiges de plus de 5 m lors de la coupe, qui avaient des pourcentages de cime relativement faibles, ont augmenté leur proportion de cime à l'intérieur des dix premières années après la coupe. Les tiges ont donc réussi à adapter leur cime, autrefois opprimée, à l'ouverture du couvert. Lors des trente premières années après la coupe les semis présentaient des proportions de cime supérieures à celles des gaules et des tiges récoltables. Ceci démontre bien que ces tiges étaient bien libres de croître même si elles étaient parfois entourées de tiges de dimension supérieure. À partir de la dernière épidémie de tordeuse des bourgeons de l'épinette, il n'y a plus de différence significative entre les proportions de cime des différentes classes de régénération. Ainsi, comme l'a observé McCarthy (1918), les proportions de cime sont semblables presque 50 ans après la coupe.

2.4.2.5. Accroissement spécifique en volume

L'étude de l'accroissement spécifique en volume après la coupe, qui permet une comparaison de la croissance en volume d'individus de taille différente, montre que les semis ont en général de meilleurs accroissements que les tiges de dimension supérieure. La comparaison de l'accroissement avant coupe par rapport à celui après coupe montre que tous les groupes ont réagi à l'ouverture du couvert à l'intérieur des cinq premières années après la coupe. Dès les premières

années, l'accroissement spécifique en volume est remarquablement semblable entre les tiges de dimension supérieure. Il semble donc que la capacité des tiges à accroître leur volume ligneux soit comparable entre les gaules et les tiges récoltables. Lors de la dernière épidémie de tordeuse des bourgeons de l'épinette, il n'y avait plus de différence entre les semis et les tiges de dimension supérieure. Lussier et al. (1992) avaient observé la même tendance chez des épinettes noires. Toutefois dans cette dernière étude, les marcottes de différente taille initiale avaient les mêmes accroissements tout au long de la période étudiée. Seuls les semis provenant d'un peuplement d'origine sexuée (feu) avaient des accroissements supérieurs à l'intérieur des 50 premières années après la coupe. Une analyse de l'accroissement à dimension comparable permettra de mieux cerner l'impact de la dimension initiale sur l'accroissement après coupe.

2.4.2.6. *Forme et coefficient d'élanement*

Au niveau de la forme, il est reconnu qu'une éclaircie forte peut contribuer à augmenter le défilement de la tige car une plus grande proportion de l'accroissement sera redistribuée à la base de l'arbre (Larson 1963, Cremer et al. 1982). Cet aspect est important au niveau de la qualité du bois car un défilement ou un coefficient de forme élevé contribue à diminuer la valeur des billes de sciage. L'analyse du coefficient de forme montre toutefois que, 47 ans après la coupe, les tiges ne sont pas significativement différentes. Donc, les tiges de dimension supérieure ne présentent pas, dans cette étude, une forme plus détériorée que celle des semis.

Pour que les tiges survivent après la coupe, une des conditions est de s'ajuster rapidement aux changements brusques des conditions environnementales. Lorsqu'elles étaient opprimées, ces tiges étaient protégées par le couvert dominant. Pour diminuer leur vulnérabilité au vent, les tiges doivent donc améliorer leur défilement afin d'être plus résistantes aux stress mécaniques. Mård (1997) a observé une réaction rapide des arbres en diminuant leur coefficient hauteur/diamètre. Ce phénomène est aussi observé dans la présente étude car, dix ans après la coupe, les tiges de plus de 5 m ont un coefficient d'élanement d'environ 0,6 m/cm comparativement à plus de 0,7 avant la coupe. La faible croissance en hauteur durant les premières décennies après la coupe comparativement à la réaction rapide en diamètre a donc permis de diminuer encore plus la vulnérabilité des sapins au chablis.

À la lumière des résultats, les sapins baumiers de grande taille protégés lors de la coupe possèdent une bonne capacité d'adaptation. Leur réaction en terme de hauteur, même si elle est inférieure, est suffisante pour maintenir leur supériorité. Au niveau du diamètre et du volume, il semble que la protection de tiges de plus de 5 m lors de la coupe peut contribuer à une production accrue de volume sciage. Ainsi les billes atteignent des dimensions plus intéressantes. Quant aux tiges de moins de 5 m, même si elles n'atteignent pas des dimensions beaucoup plus élevées que les semis, leur protection est d'intérêt puisqu'elles contribuent à la formation du nouveau peuplement. Il importe toutefois de souligner que les tiges étudiées dans ce chapitre faisaient toutes partie du couvert dominant et codominant lors de l'échantillonnage. Les présents résultats ne tiennent donc pas compte des tiges qui n'ont pas survécu et de celles qui n'ont pas atteint la strate supérieure. Le chapitre 5 traite de cet aspect par le biais d'une analyse de l'ensemble des tiges présentes lors de la récolte des données de terrain.

CHAPITRE 3. ACCROISSEMENTS DES TIGES INDIVIDUELLES

3.1. Introduction

La mise en lumière subite causée par la coupe introduit un changement dans l'arbre qui se répercutera sur les accroissements en hauteur, en diamètre et en volume les premières années après la coupe. L'importance du stress et le niveau d'oppression avant la coupe détermineront la durée de la période d'adaptation aux nouvelles conditions. Une fois l'arbre bien adapté, des questions se posent quant à l'impact de l'âge, considérablement plus élevé de ces tiges, sur la croissance, la sénescence et la vulnérabilité à la tordeuse des bourgeons de l'épinette (*Christoneura fumiferana* (Clem.)).

Quelques chercheurs (Morris 1948, Hatcher 1960, 1964, Gagnon 1985) ont démontré que l'accroissement après coupe des semis de sapin baumier paraît en général non influencé par la durée de l'oppression, une fois le couvert dominant éliminé. Cependant, personne encore n'a directement étudié de façon comparative, l'accroissement après coupe des semis, des gaules et des tiges récoltables et ce, à dimensions comparables. Ainsi, malgré leur âge plus élevé, les gaules et les petites tiges marchandes sont-elles physiologiquement différentes des semis de dimension comparable quant à leur capacité de croître ? Quel est l'effet de la période d'oppression sur la croissance et le vieillissement ?

Une analyse des accroissements en fonction de l'âge ou des années de calendrier ne permet pas une réponse adéquate à cette dernière question. Ainsi, dans le cas des tiges opprimées au début de leur vie, Assman (1970) souligne l'importance de distinguer l'âge actuel et l'âge physiologique qui fait référence aux différentes phases de croissance. Au-delà de la simple comparaison de l'accroissement des semis, des gaules et des tiges récoltables à un moment donné ou un âge donné, il importe donc de comparer leur accroissement après coupe à dimensions égales. Enfin, les peuplements issus de régénération préétablie ayant connu une période d'oppression avant la coupe sont assujettis à de fréquentes sous-estimations de la qualité de

station (Pothier et al. 1995). Ainsi, un ajustement est nécessaire afin d'évaluer l'âge effectif des tiges. Cependant le succès de cet ajustement repose aussi sur la capacité des tiges à croître normalement après la coupe. D'où la nécessité de mieux comprendre la croissance en hauteur des tiges après la coupe.

Au niveau de la susceptibilité à la tordeuse des bourgeons de l'épinette (TBÉ) après l'ouverture du couvert, Gagnon (1985) a observé que les semis de sapin baumier opprimés en jeune âge ne sont pas plus affectés que les semis plus jeunes. Quant aux gaules, leur vulnérabilité après une période d'oppression reste donc à vérifier. Les observations de Lussier et al. (1992) sur l'épinette noire indiquent que des marcottes, jusqu'à 8 m de hauteur initiale, ont connu des réductions de croissance similaires à celles des semis d'origine sexuée.

L'objectif du présent chapitre est donc de comparer les accroissements des semis libres de croître, des gaules et des tiges récoltables, suite à la coupe du couvert. Plus spécifiquement, le présent chapitre discutera des résultats de la comparaison au niveau:

1. de l'oppression des tiges avant la coupe caractérisée par l'accroissement avant coupe;
2. des changements, par rapport à avant coupe, dans l'accroissement en hauteur et en diamètre cinq et dix ans après coupe;
3. de l'accroissement annuel après coupe à dimensions comparables en termes de hauteur, de diamètre, de volume total et d'accroissement spécifique en volume;
4. des pertes d'accroissements en hauteur et en volume reliées aux périodes épidémiques de tordeuse des bourgeons de l'épinette.

3.2. Matériel et méthodes

Tout comme le chapitre précédent, cette section fait référence au volet 1 de l'étude soit l'analyse comparative au niveau des tiges individuelles libres de croître. Seule la section 3.3.2 utilise les données brutes d'accroissement après la coupe afin d'évaluer l'augmentation de l'accroissement. Le reste de ce chapitre provient du résultat des modélisations arbre par arbre.

3.2.1. Modélisation de la croissance

Dans le but d'évaluer les accroissements des tiges individuelles à des classes de dimensions précises, l'évolution après coupe des grandeurs dendrométriques a été estimée à partir de régressions non-linéaires du volume total, de la surface cambiale, du diamètre et de la hauteur. Les croissances de chacune des analyses de tiges ont donc été modélisées. La dimension de la tige à l'année zéro ($A=0$) correspond à la dimension lors de la coupe alors que l'année un ($A=1$) fait référence à la première saison de croissance après la coupe, soit à la fin de 1944. Cependant, dans le cas des tiges post-établies, la première année ($A=1$) correspond plutôt à la première saison de croissance où la tige fait son apparition. Pour la modélisation du volume total et de la surface cambiale, les années dont le DHP était nul, étaient exclues.

Après avoir testé différents modèles, notre choix s'est arrêté sur l'équation de Chapman-Richards (Richards 1959) [7]. Les régressions expriment donc la dimension de la tige (Y) en fonction de l'âge depuis la coupe (A).

$$[7] \quad Y = a_0 [1 - \exp(-a_1 A)]^{a_2}$$

Celle-ci est considérée comme une des plus flexibles, des plus précises et des plus utilisées pour l'étude de la croissance des arbres et des peuplements (Zeide 1993). Toutefois, l'analyse du comportement de ce modèle sur la croissance des gaules montre un manque d'ajustement dans les premières années de croissance suivant la coupe. Cette période étant généralement caractérisée par la présence d'un plateau dans la croissance, le modèle seul ne s'ajuste pas bien aux données. De plus, il suppose un accroissement nul à l'année zéro. Or, dans le cas de la haute régénération préétablie, il y a bel et bien un accroissement supérieur à zéro avant la coupe. L'ajout de la composante ' $b_{00} \exp(b_0 A)$ ' permet d'ajuster le modèle à ces exigences. Il en résulte un modèle très flexible qui présente une évolution plus fidèle des grandeurs dendrométriques.

$$[8] \quad Y = b_{00} \exp(b_0 A) + a_0 [1 - \exp(-a_1 A)]^{a_2}$$

Pour calculer l'accroissement, il suffit de calculer la dérivée première de cette équation. Ainsi l'accroissement s'obtient selon la formule suivante:

$$[9] \quad dY/dA = (b_{00} b_0 \exp (b_0 A)) - [a_0 a_1 a_2 \exp (a_1 A) (1 - \exp (a_1 A))^{a_2 - 1}]$$

Pour que le modèle s'ajuste bien aux données et afin de comparer des croissances pendant des années normales, il est nécessaire de soustraire de l'équation les périodes affectées de réductions de croissance attribuables aux épidémies de la tordeuse des bourgeons de l'épinette. La variable 'A' doit ainsi être modifiée de manière à ce que le modèle tienne compte de la perte de croissance, en terme de nombre d'années perdues, attribuable à chacune des périodes épidémiques.

Une translation latérale des courbes de croissance après chaque période de tordeuse (figures 13 et 14) peut être réalisée au moyen de variables binaires.

$$[10] \quad A = AN + X_1 c_1 + X_2 c_2 - X_0$$

AN = nombre d'années après la coupe (année - 1943)

X₀ = nombre d'années établies après coupe

X₁ = 1 pour les années entre les deux périodes TBÉ (sinon = 0)

X₂ = 1 pour les années après la deuxième période TBÉ (sinon = 0)

c₁, c₂ = coefficients de la régression généralement négatifs

Le modèle qui en résulte permet d'estimer l'évolution des dimensions en absence d'épidémie de tordeuse, une condition essentielle pour la comparaison d'individus à des dimensions identiques mais à des temps différents. Notons que l'utilisation de X₀ permet l'obtention d'une valeur à l'année 1 pour toutes les tiges incluant les tiges postétablies.

Les années affectées par les défoliations ont été soustraites des modélisations. Pour ce faire, les périodes de tordeuse ont été déterminées à partir des informations disponibles sur les années de tordeuse et des patrons de croissance en volume et en hauteur. Étant donné que l'effet se fait sentir plus rapidement sur la hauteur que sur les autres variables, une évaluation a été réalisée pour chacun de ces groupes (tableau 2).

Tableau 2. Périodes de tordeuse ayant affecté les variables dendrométriques.

Variabes	Années TBÉ	Nombre d'années affectées
Hauteur	1955-1958	4
	1973-1986	14
Diamètre, volume,	1956-1959	4
Surface cambiale	1976-1986	11

Le calcul des coefficients pour chacune des tiges a été effectué à partir de la procédure NLIN (SAS Institute Inc. 1988). Le choix des valeurs générées a été déterminé en favorisant les résultats minimisant la somme des carrés des erreurs et en s'assurant de l'homogénéité des résidus. Les coefficients obtenus pour chacune des tiges sont présentés à l'annexe D. Puisque l'analyse portait sur la croissance de tiges à dimensions semblables, un programme d'itération a été élaboré pour déterminer les années correspondantes aux différentes classes de dimensions. L'évaluation a été réalisée au dixième d'année près. Les analyses des accroissements en hauteur, en diamètre et spécifique en volume ont été réalisées par classes de 50 cm de hauteur. Quant à l'accroissement en volume, les analyses ont été réalisées à tous les 10 dm³/tige de volume total.

3.2.2. Évaluation du niveau d'oppression avant la coupe: proportion de l'accroissement libre de croître

Lorsque l'on veut porter un jugement sur le niveau d'oppression de tiges de tailles différentes, il est difficile de se fier uniquement à leur accroissement avant coupe. En effet, comme la croissance est fonction de la dimension des tiges, il importe de tenir compte de ce facteur. Pour ce faire la croissance quinquennale avant coupe de chacune des gaules et des tiges récoltables a été comparée à l'accroissement modélisé des semis après coupe (figures 15 et 16). Étant donné que les semis étaient libres de croître, le rapport entre l'accroissement avant coupe des tiges opprimées et l'accroissement des semis, à classes de dimension comparable, représente la proportion de l'accroissement d'une tige libre de croître située en pleine lumière. Cette variable a donc été utilisée afin de caractériser le niveau d'oppression de la haute régénération avant l'ouverture du couvert.

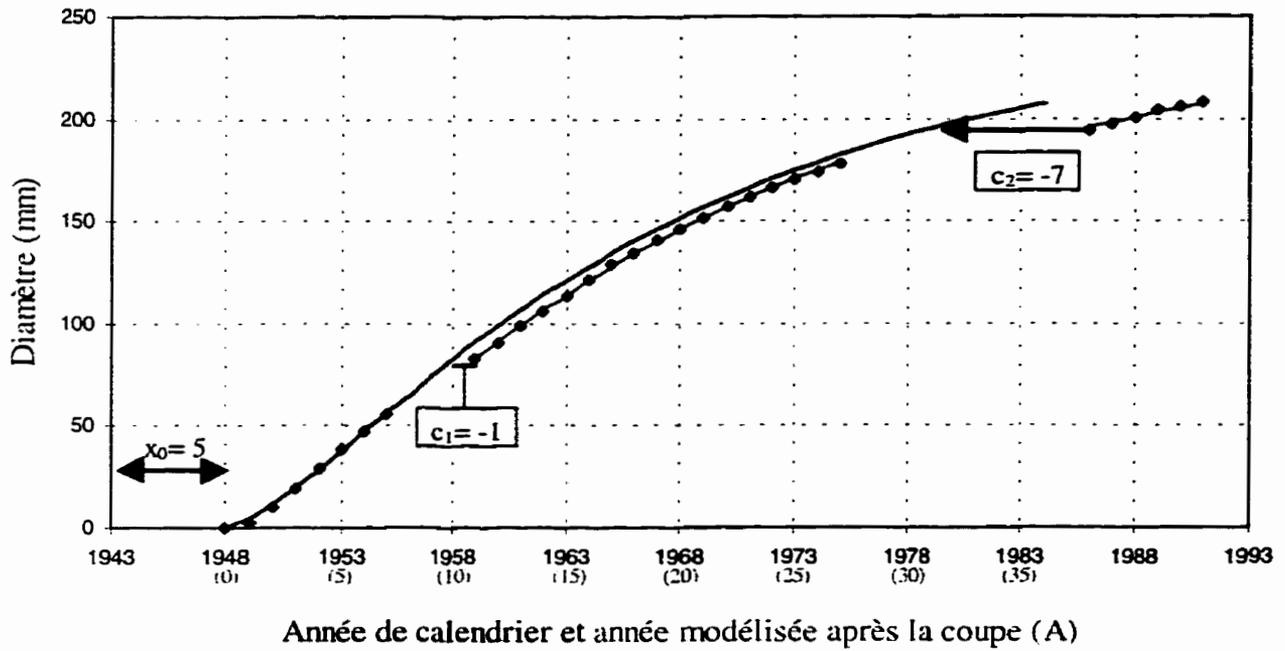


Figure 13. Exemple de modélisation du diamètre chez un semis.

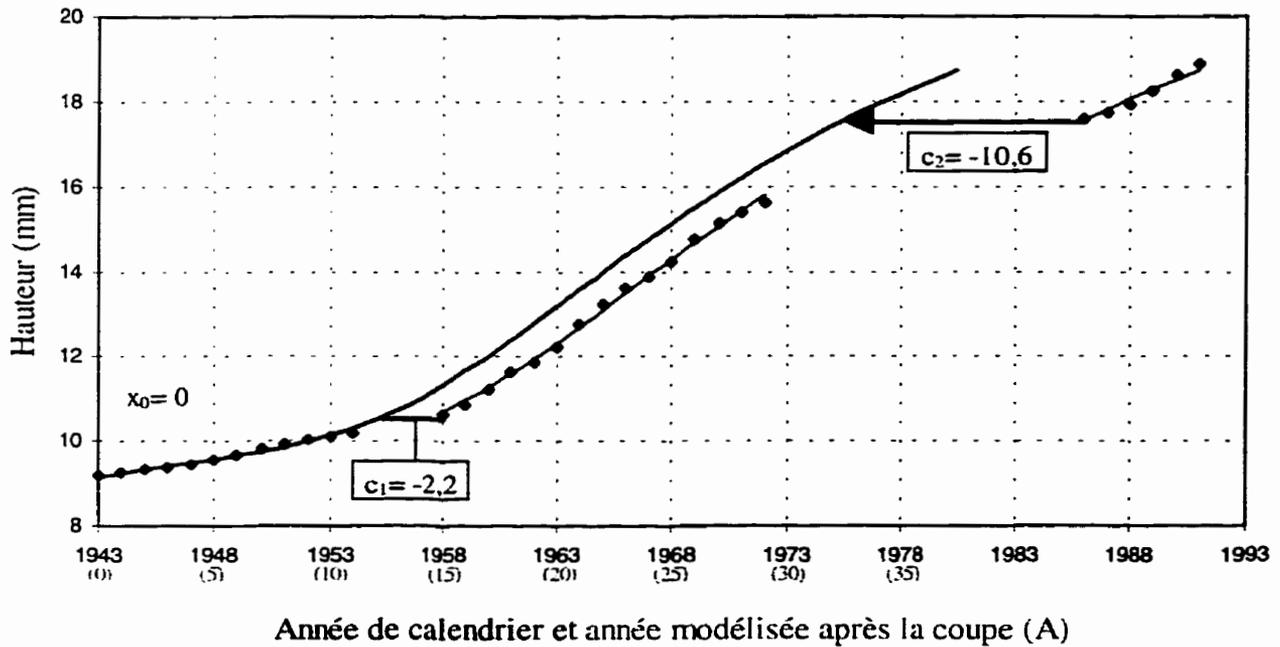


Figure 14. Exemple de modélisation de la hauteur chez une gaule.

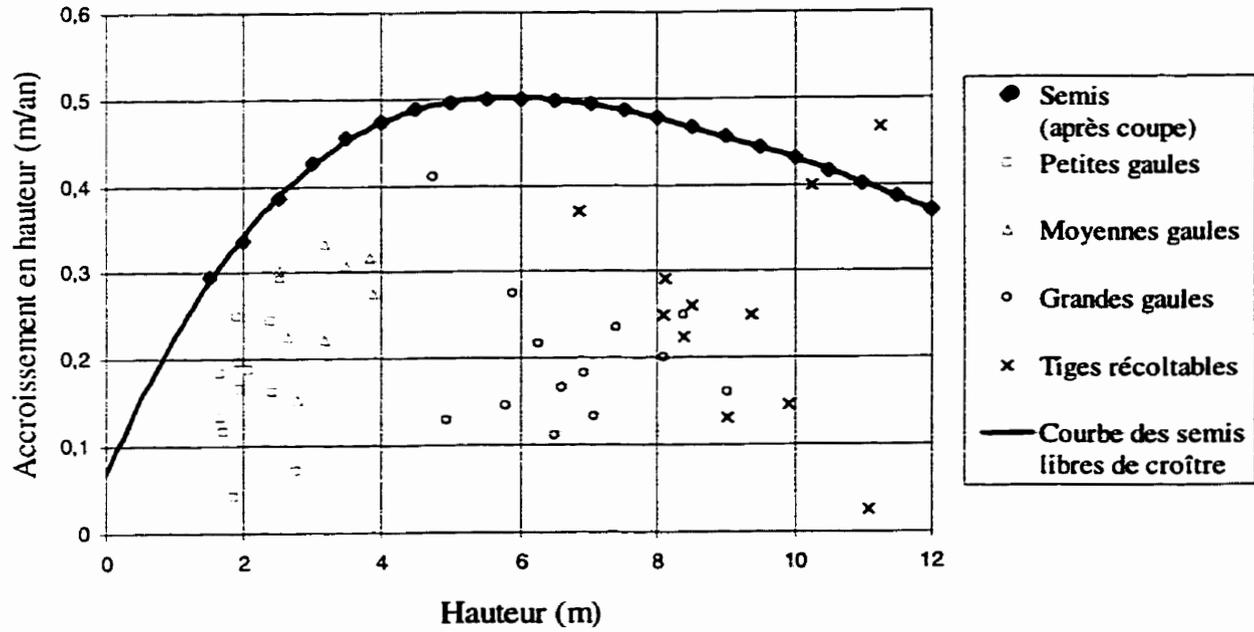


Figure 15. Accroissements annuels moyens en hauteur des cinq années avant coupe de la haute régénération préétablie et accroissements de semis libres de croître, en fonction de la hauteur.

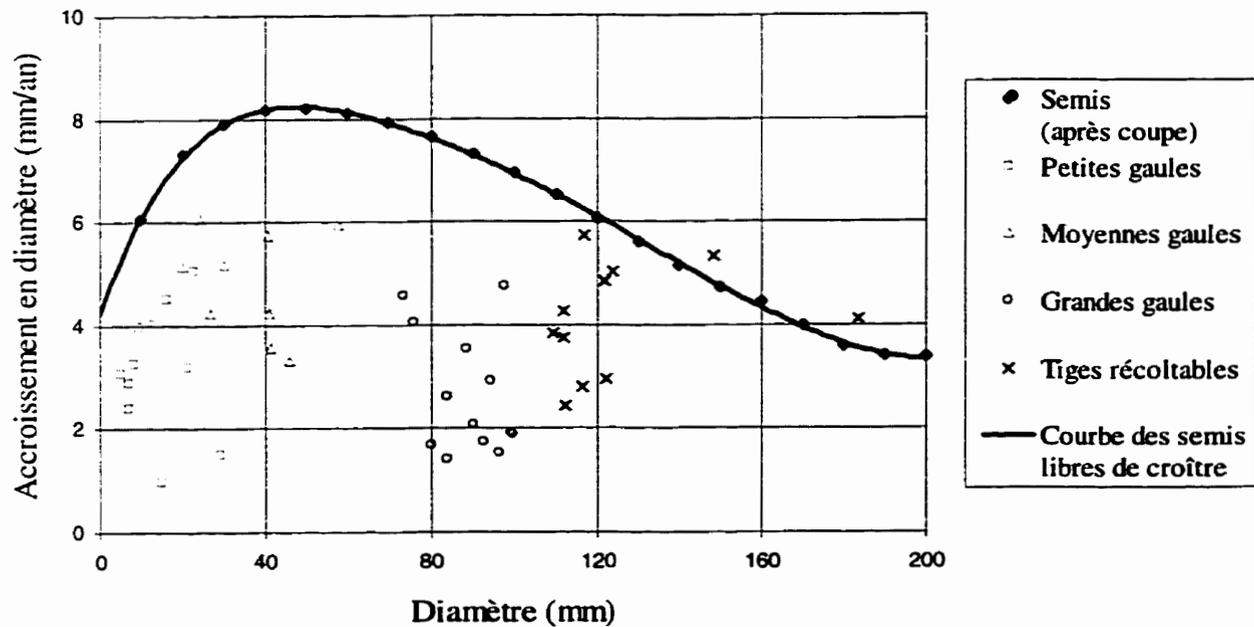


Figure 16. Accroissements annuels moyens en diamètre des cinq années avant coupe de la haute régénération préétablie et accroissements de semis libres de croître, en fonction du diamètre.

3.2.3. Évaluation des pertes de croissance causées par les défoliations

Les pertes de croissance sont généralement évaluées en comparant la croissance durant les années de défoliation avec la croissance moyenne durant une période de référence précédant l'épidémie (Mott et al. 1957, MacLean et al. 1996). À l'égard du patron normal de croissance, l'utilisation de cette méthode peut être à l'origine d'une surévaluation ou une sous-évaluation, particulièrement lorsque l'on tente d'évaluer l'effet d'une défoliation cumulative prolongée. Par exemple, les pertes de croissance peuvent s'avérer trop élevées si la défoliation a lieu sur un arbre ou un peuplement ayant dépassé le stade de pleine vigueur. Ainsi, à partir de ce moment, l'accroissement courant évolue selon une pente descendante. L'extrapolation de l'accroissement mesuré avant l'événement afin de l'appliquer à la période épidémique, occasionne donc une surestimation de la croissance prédite sans défoliation.

De manière à éviter ce genre de biais, l'évaluation des pertes de croissance dues aux deux périodes épidémiques de tordeuse des bourgeons de l'épinette a été réalisée à partir des coefficients c_1 et c_2 provenant de la modélisation de l'évolution de la hauteur et du volume total après la coupe. Ces coefficients (généralement négatifs), qui sont responsables de la translation latérale des courbes, représentent les pertes de croissance durant les périodes de défoliations en termes de nombre d'années modélisées perdues. En divisant la valeur de ces coefficients par le nombre d'années de calendrier affectées par le phénomène ($An_{tb\epsilon}$), présenté au tableau 2, on obtient une évaluation de l'effet des défoliations sur l'accroissement normal. Ainsi les effets en pourcentage se calculent ainsi:

$$[11] \quad E_1 = (c_1) / An_{tb\epsilon_1} * 100$$

$$E_2 = (c_2 - c_1) / An_{tb\epsilon_2} * 100$$

E_1, E_2 : Changement en % dans l'accroissement normal lors de la 1^{ère} et la 2^{ème} épidémie.

Par exemple, la figure 13 montre que la première période épidémique (qui a duré 4 ans) a causé la perte de l'équivalent d'une année d'accroissement en diamètre sur cet arbre. La figure 14 montre que la deuxième épidémie, qui a eu des effets sur la hauteur de 1973 à 1986

(14 ans), a causé la perte de 8,4 ans d'accroissement (10,6 - 2,2). Les pertes d'accroissement en hauteur durant ces années s'élèvent donc à 60% de l'accroissement normal (8,4/14).

3.2.4. Évaluation de la réaction des tiges après coupe

Afin de porter un jugement sur la réaction de la haute régénération préétablie quelques années après la coupe, une comparaison a été réalisée entre l'accroissement après coupe et l'accroissement des cinq dernières années avant la coupe. Dans cette analyse, seules les données brutes ont été utilisées pour des fins de comparaison d'accroissements en hauteur et en diamètre.

3.2.5. Utilisation de la cime dans l'explication de l'accroissement

L'utilisation combinée de la croissance de la tige et de données liées à la cime permet une évaluation intéressante de la vigueur de l'arbre (Waring et al. 1980). Ainsi, plus un arbre a une croissance élevée pour une unité de surface foliaire donnée, plus il est vigoureux. Cette relation peut donc être mise à profit pour la comparaison de la croissance de tiges ayant subi une période d'oppression. L'utilisation d'une variable exprimant la dimension de la cime peut être efficace pour expliquer l'accroissement car elle est le reflet de la compétition à l'échelle de l'arbre. Plusquellec (1997) a d'ailleurs observé que la longueur de cime de lumière peut contribuer efficacement à expliquer l'accroissement en hauteur et en diamètre. La longueur de cime efficace ainsi que le pourcentage de cime efficace ont donc été testés comme covariable dans l'estimation de l'accroissement après la coupe en fonction des classes de dimension.

3.2.6. Analyses statistiques

Toutes les analyses statistiques ont été réalisées à partir du logiciel SAS. Les analyses de comparaison multiple ont été effectuées avec le test LSMEANS, une composante de la procédure GLM. Une différence entre deux groupes est déclarée significative si la probabilité est inférieure

au seuil de 5% divisé par le nombre de groupes dans le modèle (Rice 1989). La comparaison multiple a été utilisée avec ou sans covariable, selon la présence ou l'absence de variables significatives pouvant expliquer l'accroissement après coupe. Une analyse a préalablement été réalisée afin de vérifier l'hypothèse de départ que les semis utilisés dans la comparaison, ont été libres de croître depuis la coupe de 1944. Ainsi, les accroissements (en hauteur, diamètre et en volume) à dimensions comparables des tiges provenant de quatre placettes de semis et des semis provenant des placettes de hautes régénérations ne se sont pas avérés significativement différents au seuil $\alpha=5\%$.

3.3. Résultats

3.3.1. Accroissement avant coupe et proportion de l'accroissement libre de croître

L'analyse des figures 15 et 16 permet de constater que les accroissements en hauteur et en diamètre des tiges de dimensions supérieures avant la coupe étaient généralement plus faibles que ceux des semis libres de croître après la coupe. L'accroissement avant la coupe était généralement près de 50% de celui des tiges libres de croître (figure 17). Il y a toutefois beaucoup de variabilité entre les individus d'un même groupe. Notons que les grandes gaules semblent avoir été les tiges les plus opprimées avant la coupe avec 40% de l'accroissement libre de croître. Ces valeurs permettent de croire que les tiges avant la coupe étaient pour la plupart vraiment affectées par la compétition mais pas à des niveaux extrêmes. Certaines tiges semblent avoir profité d'éclaircies naturelles dans le peuplement.

3.3.2. Réaction des tiges après coupe

Au niveau de l'accroissement en hauteur après coupe, les tiges de plus de 3 m ont peu profité de leur mise en lumière. Leur accroissement moyen en hauteur, durant les cinq premières années, a été inférieur ou égal à celui d'avant coupe contrairement à celui des petites gaules qui

s'est nettement amélioré (tableau 3). Lors de la période suivante (entre la cinquième et la dixième année après coupe), seules les tiges récoltables tardaient encore à réagir positivement.

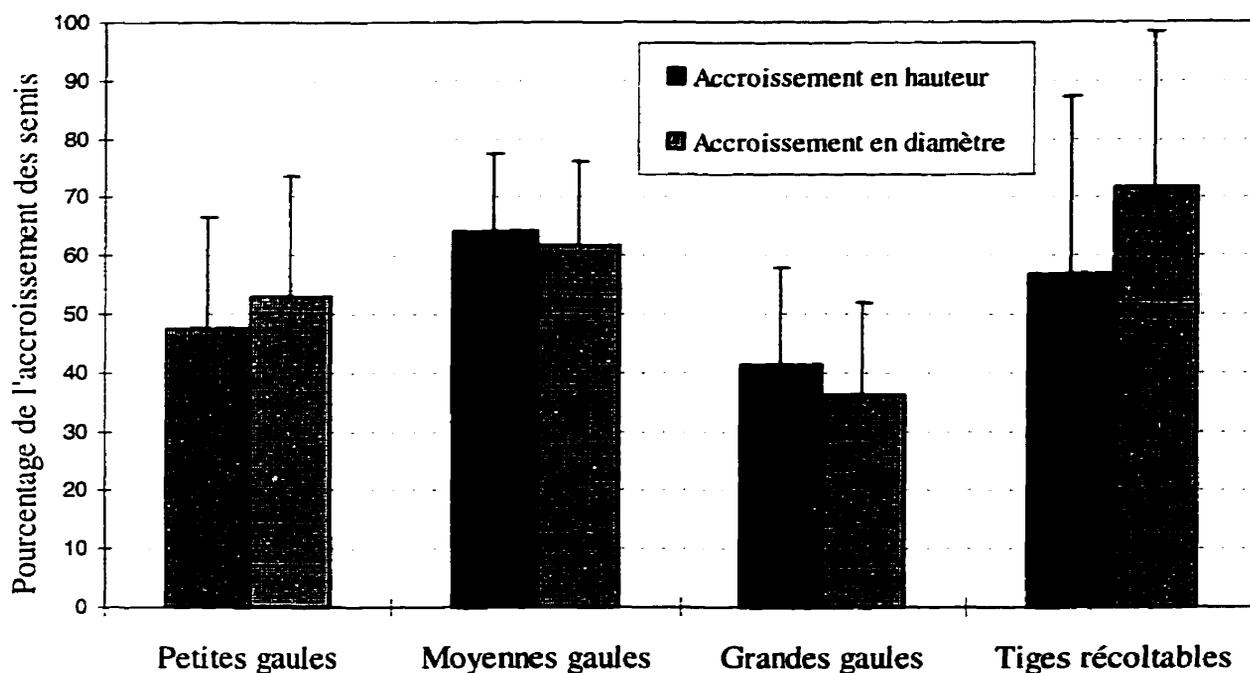


Figure 17. Pourcentage de l'accroissement libre de croître en hauteur et en diamètre des gaules et des tiges récoltables avant coupe (1939-1943).

Tableau 3. Augmentation de l'accroissement après coupe par rapport à celui des cinq dernières années avant coupe.

Type de régénération en 1943	Augmentation moyenne de l'accroissement			
	en hauteur (%)		en diamètre (%)	
	1944-1948	1949-1953	1944-1948	1949-1953
Petites gaules	52	234	75	178
Moyennes gaules	0	34 ^a	17	3
Grandes gaules	3	17 ^a	86	143
Tiges récoltables	-41 ^a	-30 ^a	34	60

^a indique la présence d'une différence significative avec les petites gaules au seuil $\alpha = 0,05$.

La réaction en diamètre des gaules suite au retrait du couvert dominant s'est manifestée plus rapidement. À part les moyennes gaules, le gain d'accroissement a été élevé dès les cinq premières années après la coupe et s'est amélioré encore à la période suivante. Sur dix ans, les petites et grandes gaules sont celles qui ont réagi avec le plus de vigueur. On y observe des accroissements en diamètre qui ont plus que doublé après leur mise en lumière.

3.3.3. Accroissement annuel courant en hauteur après coupe à dimensions comparables

Les courbes d'accroissement en hauteur en fonction de la hauteur présentent une phase d'augmentation de l'accroissement, un plafonnement et, par la suite, une décélération. En général, chez les tiges de dimension supérieure, la région où il y a un plafonnement de l'accroissement semble correspondre au moment où il n'y a plus de différences marquées avec les semis libres de croître (figure 18). Ainsi, les tiges s'adaptent à leur nouvel environnement en augmentant graduellement leur accroissement. Une fois la période d'adaptation terminée, les tiges croissent en hauteur d'une manière semblable aux tiges n'ayant pas connu d'oppression importante avant la coupe.

La durée de cette adaptation semble varier en fonction de la dimension initiale. Cette période oscille entre 9 ans pour les petites gaules et 20 ans pour les tiges récoltables (tableau 4). Une fois l'adaptation réalisée, l'accroissement des tiges apparaît être essentiellement tributaire de leur dimension et ce, malgré des différences d'âge parfois importantes. Toutefois, l'analyse de la variance détecte quelques différences significatives avec les semis chez les petites gaules pendant une brève période après l'adaptation (voir annexe E). À noter que les quelques discontinuités observées aux extrémités des courbes d'accroissement sont causées essentiellement par les variations de hauteur initiale à l'intérieur des classes de régénération. Ainsi, les diminutions d'accroissement en hauteur dans le groupe des grandes gaules des classes de hauteur de 6,5 à 7,5 m sont essentiellement causées par l'ajout de tiges dont la hauteur initiale est supérieure à 7 m.

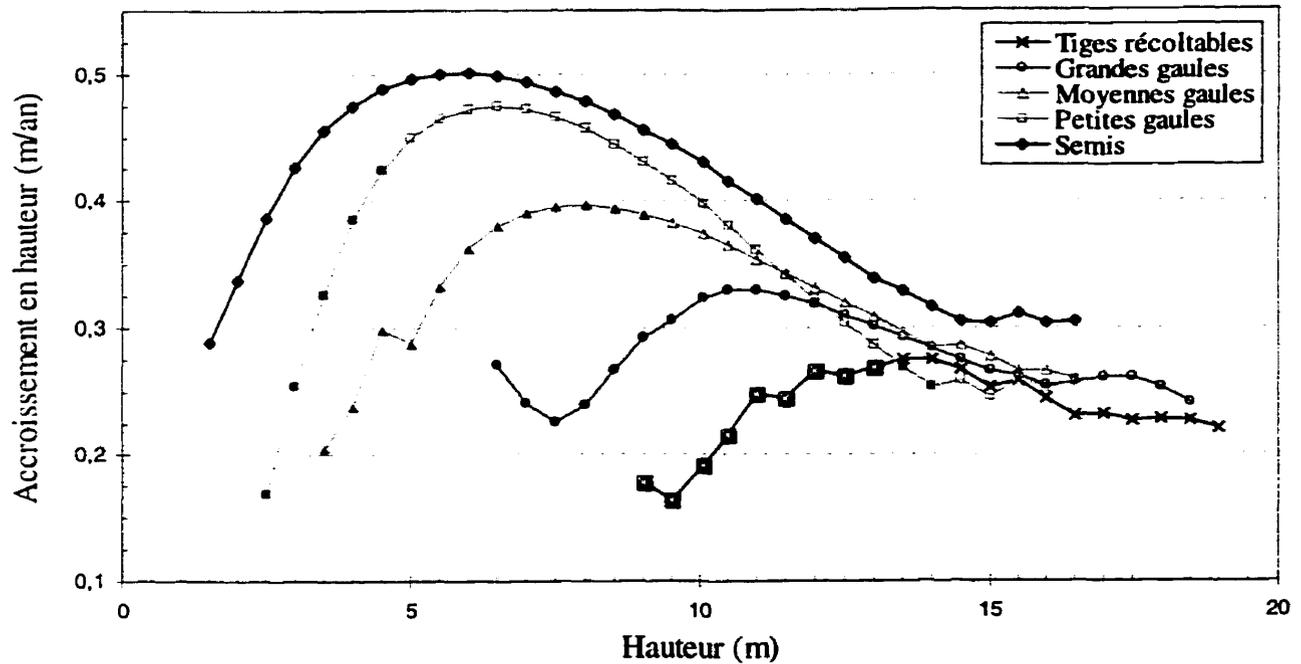


Figure 18. Comparaison de l'accroissement annuel en hauteur après coupe à hauteurs comparables.

Les points noircis correspondent aux hauteurs où il y a des différences significatives avec les semis (LSMEANS, $\alpha=0,05$).

Tableau 4. Durée de la période d'adaptation chez les gaules et les tiges récoltables.

Type de régénération	Nombre d'années nécessaires après la coupe pour que l'accroissement des tiges soit équivalent à celui des semis de dimensions comparables ^a			
	Accroissements			
	en hauteur	en diamètre	en volume	spécifiques en volume
Petites gaules	9	5	moins de 10 ans	5
Moyennes gaules	17	20	8	8
Grandes gaules	19	moins de 3 ans	4	6
Tiges récoltables	20	moins de 3 ans	moins de 2 ans	moins de 3 ans

^a Évalué à partir de la moyenne du temps requis après la coupe pour atteindre la dimension où l'accroissement des tiges n'est plus significativement inférieur à celui des semis libres de croître.

3.3.4. Accroissement annuel courant en diamètre après coupe à dimensions comparables

L'analyse de l'accroissement en diamètre à hauteur de poitrine a été réalisée en fonction des classes de hauteur plutôt qu'en fonction des classes de diamètre. Ainsi, l'utilisation de la classe de diamètre rendait l'utilisation du pourcentage de cime problématique car l'interaction entre cette variable et la classe de régénération préétablie était significative à plusieurs occasions. Le pourcentage de cime a été utilisé comme covariable dans l'analyse. Celui-ci était hautement significatif à plusieurs occasions (voir annexe E).

La figure 19 révèle que, mises à part les moyennes gaules, les tiges réagissent rapidement à la mise en lumière au niveau de l'accroissement en diamètre. Ainsi, les grandes gaules lors de la coupe ont des accroissements similaires à ceux des semis à hauteurs et à pourcentages de cime comparables, et ce, dès les premières années après la coupe. Quant aux tiges récoltables, elles ont même quelques fois atteint des accroissements significativement supérieurs aux semis, petites et moyennes gaules jusqu'à 13 m de hauteur. La période d'adaptation des petites gaules est relativement courte (cinq ans), alors que les moyennes gaules semblent soumises à une réaction plus lente à la mise en lumière soudaine. Ces dernières prennent une vingtaine d'années pour croître en diamètre d'une manière équivalente aux semis.

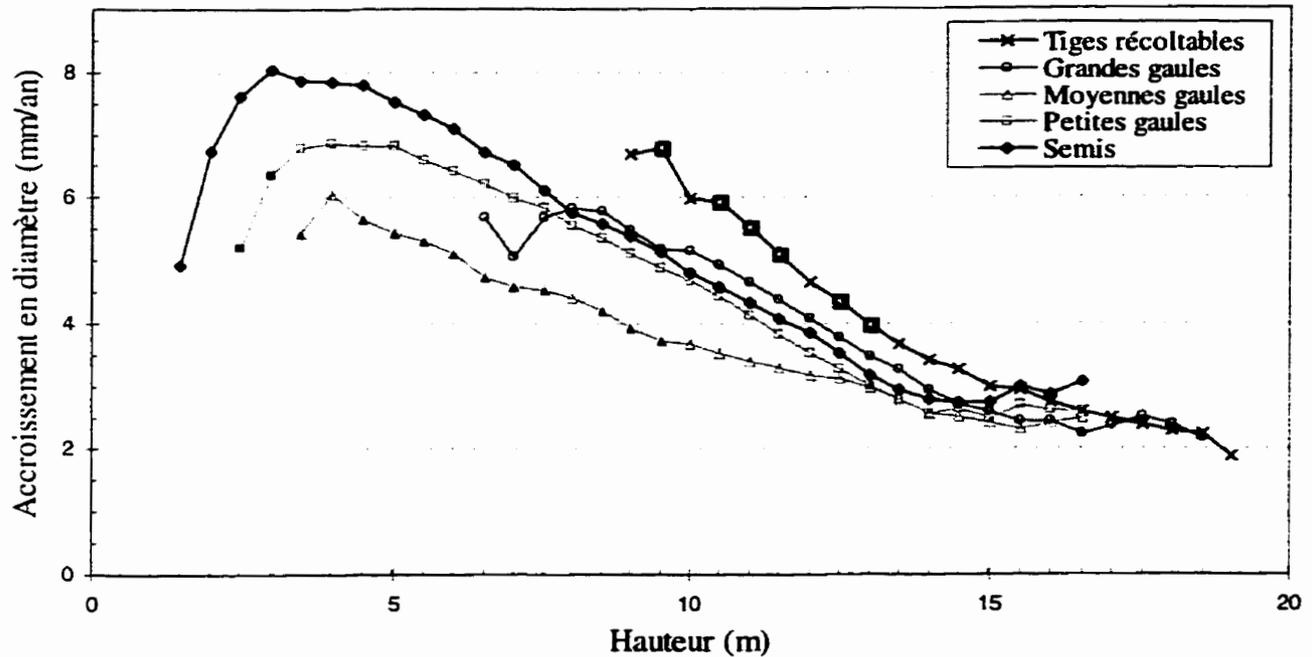


Figure 19. Comparaison de l'accroissement en diamètre après coupe à hauteurs et pourcentages de cime comparables.

Les points noirs correspondent aux hauteurs où il y a des différences significatives avec les semis (LSMEANS, $\alpha=0,05$).

3.3.5. Accroissement annuel courant en volume après coupe à dimensions comparables

Après une courte période d'adaptation (moins de dix ans), l'accroissement en volume des gaules et des tiges récoltables est semblable à celui des semis, à volume et à pourcentage de cime efficace comparables. En général, les tiges récoltables présentent les meilleurs accroissements en volume (figure 20). Malgré des âges biologiques supérieurs à 100 ans, l'évolution croissante du volume de ces tiges tend à indiquer qu'elles ne semblent pas encore affectées par le phénomène de la sénescence. Les analyses statistiques démontrent des différences significatives entre ces dernières et les petites et moyennes gaules dans les dimensions entre 80 et 150 dm³ (annexe E).

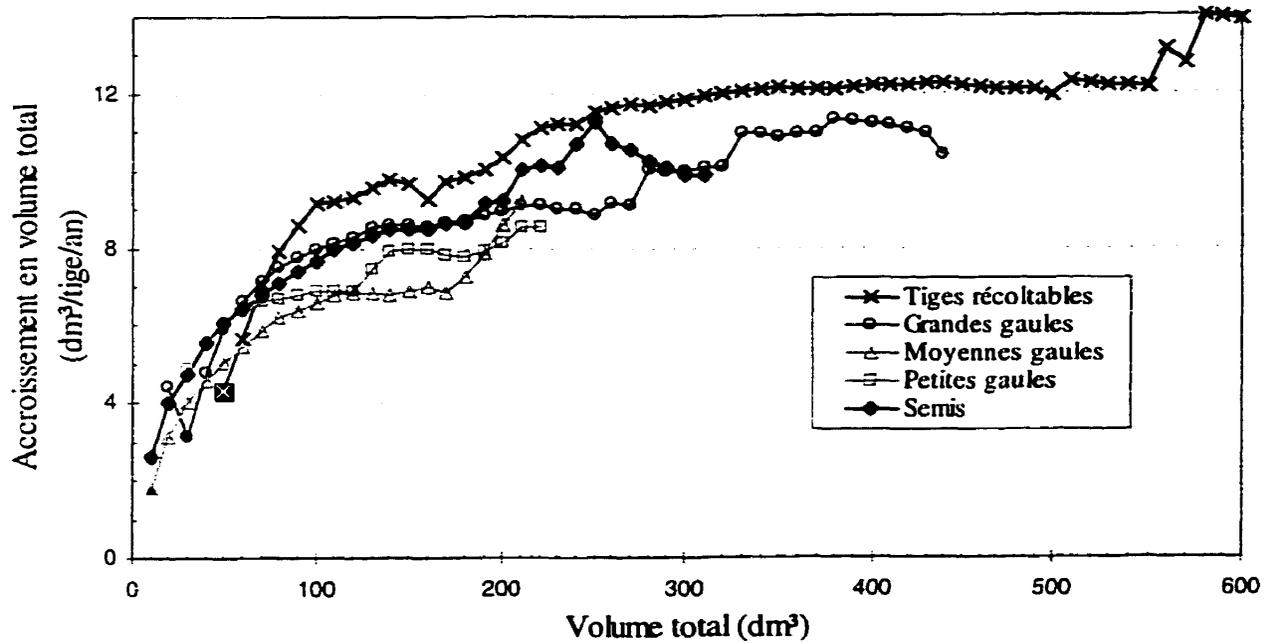


Figure 20. Comparaison de l'accroissement en volume après coupe à volumes et pourcentages de cime comparables.

Les points noircis correspondent aux volumes où il y a des différences significatives avec les semis (LSMEANS, $\alpha=0,05$).

3.3.6. Accroissement spécifique en volume après coupe à dimensions comparables

L'accroissement spécifique en volume en fonction de la hauteur, pour un pourcentage de cime efficace comparable, témoigne de la rapidité des tiges récoltables à réagir à l'augmentation de la disponibilité de lumière (figure 21). Dans le cas des petites et grandes gaules, il faut 5 à 6 ans pour que l'accroissement soit équivalent aux semis. De toutes les classes de régénération, ce sont les moyennes gaules qui sont les plus lentes à prendre leur rythme de croissance suite à la coupe. Ainsi, en moyenne, ces tiges ne seront pas aussi efficaces que les semis pendant une période de 8 ans après coupe. À partir de cette période, les courbes d'accroissement sont remarquablement similaires entre les différentes classes de dimension initiale.

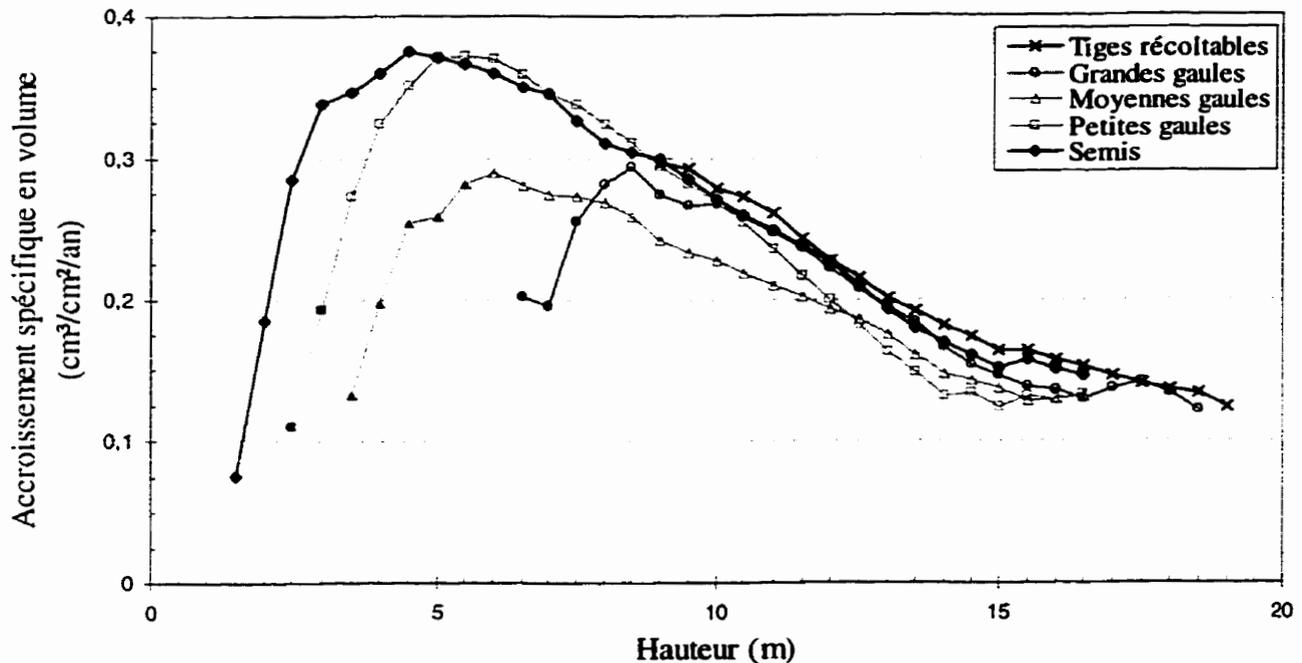


Figure 21. Comparaison de l'accroissement spécifique en volume après coupe à hauteurs et pourcentages de cime comparables.

Les points noirs correspondent aux hauteurs où il y a des différences significatives avec les semis (LSMEANS, $\alpha=0,05$).

3.3.7. Effet des défoliations causées par la tordeuse des bourgeons de l'épinette

En général, chez les tiges qui ont survécu, l'impact des défoliations sur l'accroissement en hauteur et en volume n'est pas plus important chez la haute régénération que chez les semis (tableau 5). Cependant, les grandes gaules se démarquent des semis avec des pertes de 44% sur l'accroissement en volume lors de la première épidémie. Ainsi, ces tiges présentaient les cimes les plus déficientes lors du passage de cette épidémie dans les années '50 (figure 11). Toutefois, le pourcentage de cime efficace n'a pas été une covariable significative dans l'analyse de la variance. La deuxième période épidémique a causé des pertes d'accroissement autour du tiers de l'accroissement normal en volume. Quant à l'accroissement en hauteur, la dernière épidémie a causé des diminutions beaucoup plus importantes que celle des années 50. De 1973 à 1986, l'accroissement en hauteur a diminué de plus de la moitié de l'accroissement normal. Pour cette

période, on ne note aucune différence significative entre les différents types de régénération lors de la coupe. Notons qu'au niveau de l'accroissement en volume, les pertes de croissance en pourcentage ont été semblables durant les 2 périodes épidémiques. Toutefois, en termes absolus, les pertes de croissance ont été beaucoup plus sévères à cause de la longueur plus importante de l'épidémie (11 ans au lieu de 4 ans). L'année 1980, qui a été exceptionnellement bonne, a aussi contribué à augmenter l'accroissement moyen en volume durant la deuxième période épidémique (figure 12).

Tableau 5. Pertes de croissance lors des deux épidémies de tordeuse des bourgeons de l'épinette.

Type de régénération	Accroissement en hauteur		Accroissement en volume	
	1955-58	1973-86	1956-59	1976-86
Semis	26%	44%	25%	34%
Petites gaules	21%	51%	40%	33%
Moyennes gaules	20%	55%	42%	35%
Grandes gaules	28%	59%	44% *	38%
Tiges récoltables	35%	51%	37%	32%

*La présence de * indique une différence significative avec les semis au seuil $\alpha = 0,05$.*

3.4. Discussion

Tout comme pour le chapitre 2, les résultats ont été obtenus à partir de sapins qui ont survécu et qui faisaient partie de l'étage supérieur au moment de l'échantillonnage.

3.4.1. Croissance et niveau d'oppression avant la coupe

Dans les années précédant la coupe, les accroissements en diamètre variaient entre 1 et 6 mm/an. Les accroissements en hauteur et en diamètre des gaules oscillaient autour de 50% de l'accroissement libre de croître. Ces observations, de même que celles de MacArthur (1959) relatives au volume de bois récolté en 1944 (environ 110 m³/ha), laissent supposer que les

peuplements étaient déjà ouverts lors de la coupe. Toutefois, mises à part quelques tiges récoltables, la plupart des tiges résiduelles se situaient bien en dessous du couvert dominant en 1943. Les caractéristiques du peuplement semblent avoir favorisé la survie et le développement de la régénération préétablie car les niveaux d'oppression n'étaient pas extrêmes. Tout porte à croire que la structure et la densité de ce peuplement étaient différentes de celles prévalant dans les sapinières équiennes denses.

3.4.2. Réaction des tiges

L'étude de l'accroissement en hauteur après la coupe a permis de constater que les tiges étudiées n'ont pas toutes réagi à la même vitesse et avec la même ampleur. Les petites gaules se démarquent avec d'excellentes reprises de croissance dès les cinq premières années après coupe alors que la réaction positive des tiges de plus de 3 m lors de la coupe a tardé. Assman (1970) indique d'ailleurs qu'une accélération marquée de la croissance en hauteur peut être induite par une éclaircie forte réalisée avant la culmination. Or, les petites gaules n'avaient pas encore atteint la dimension où l'accroissement est maximum lorsqu'elles sont libres de croître, soit à 6 m de hauteur. Ainsi, sur la base du patron normal de croissance en hauteur, ces tiges aspiraient plus à augmenter leur accroissement que celles de plus de 6 m lors de la coupe. À la lumière des résultats, plus la tige est haute au moment de la coupe, moins la réaction dans l'accroissement en hauteur à l'intérieur des dix premières années sera prononcée. Ceci explique en partie la diminution, avec le temps, de l'écart entre la hauteur des tiges de différente dimension initiale lors de la coupe. Ces observations rejoignent celles de Hatcher (1964) chez le sapin baumier. Chez l'épinette noire, plusieurs auteurs ont observé des accroissements moyens en hauteur plus faibles chez les tiges les plus hautes lors de la coupe (Lussier et al. 1992, Paquin et Doucet 1992b, Pothier et al. 1995). Tout comme Ferguson et Adams (1980) pour le sapin de Vancouver (*Abies grandis*), les résultats de la présente étude suggèrent des diminutions, durant la première décennie, dans l'accroissement en hauteur des plus grandes tiges résiduelles. D'ailleurs, les tiges récoltables n'ont toujours pas su réagir positivement après dix ans.

Au niveau de l'accroissement en diamètre, les arbres semblent réagir rapidement à leur mise en lumière. Ceci rejoint les constatations de plusieurs auteurs selon lesquelles les tiges augmentent leur accroissement à l'intérieur des trois années suivant la coupe (Hatcher 1960, Herring et Etheridge 1976, Seidel 1977, Ferguson et Adams 1980,). Ainsi, les tiges de qualité, profitant de l'enlèvement de leurs compétiteurs, réagissent donc vigoureusement en augmentant leur accroissement en diamètre. Les moyennes gaules, qui avaient les meilleurs accroissements en diamètre avant la coupe, se distinguent avec des réactions plus faibles (moins de 20%). Cette différence n'est toutefois pas significative entre les groupes. Quant à elles, les petites et grandes gaules, qui semblaient être les plus opprimées avant la coupe, ont connu les plus fortes augmentations d'accroissement en diamètre avec plus de 70% durant la première période quinquennale après la coupe et plus de 140% lors de la deuxième. Plusieurs auteurs font état de la réaction prononcée du sapin baumier après l'ouverture du couvert. Ainsi l'analyse des données présentées par McCarthy (1918) montre que des tiges, entre 6 et 10 cm de DHS, ont augmenté leur accroissement en diamètre de 49 à 84% à l'intérieur des 10 premières années après la coupe. Ce pourcentage passe à plus de 100% chez les tiges ayant connu une période d'oppression plus courte (4-5 cm de DHS lors de la coupe). McGraw (1948) a observé, sur des sapins ayant connu jusqu'à plus de 40 ans d'oppression, une augmentation moyenne de l'accroissement en diamètre de 168% durant les 16 années après coupe. Morris (1948) et Crossley (1976) ont observé que les tiges d'épinette et de sapin pouvaient même quadrupler leur accroissement. Comparativement aux résultats de la présente étude, ces tiges ont plus fortement réagi car elles étaient beaucoup plus opprimées avant l'ouverture du couvert.

À la lumière des résultats des dix premières années après coupe, les tiges semblent donc fortement réagir en diamètre alors que l'on observe, en général, une réaction beaucoup moins prononcée et plutôt lente au niveau de la hauteur. Ce phénomène a aussi été observé sur des tiges opprimées soumises à une très forte éclaircie (Näslund 1943 et Vaartaja 1951 dans Larson 1963, Jäghagen 1997). Herring et Etheridge (1976) ont d'ailleurs observé une réponse en diamètre très rapide (1 à 2 ans) alors qu'il fallait plusieurs années pour que la réaction dans l'accroissement en hauteur soit positive. Cette tendance peut s'expliquer dans la capacité de l'arbre à attribuer son énergie disponible en fonction des besoins des différents organes (Kramer et Kozlowski 1979).

De façon générale, la hiérarchie énergétique de l'arbre tend à favoriser la croissance foliaire et apicale avant la production de racines et la production de bois. Cependant cet ordre peut être altéré par un stress environnemental comme la mise en lumière soudaine. C'est ainsi qu'un arbre soudainement exposé à la pleine lumière et en absence de compétition, canaliserait plutôt ses énergies à augmenter sa résistance aux vents (Larson 1963). Une fois l'arbre bien adapté, il y a tout lieu de croire que la hiérarchie énergétique de l'arbre va reprendre son cours normal en favorisant de nouveau la croissance apicale.

3.4.3. Accroissements et période d'adaptation

La plupart des études font état de l'évolution de l'accroissement en fonction du temps. Ainsi, les premières années après la coupe, les marcottes d'épinette noire les plus hautes présentent des accroissements en hauteur inférieurs aux tiges plus petites et plus jeunes (Paquin et Doucet 1992b, Pothier et al. 1995). Selon ces auteurs, cet écart ne serait que temporaire, l'accroissement annuel courant n'étant pas significativement différent entre les classes de hauteur à la fin des périodes étudiées. Toutefois, personne n'avait étudié directement l'effet de la dimension initiale sur l'accroissement annuel courant et ce, à dimensions comparables.

La présente étude démontre que lors des premières années après la coupe, les tiges subissent une période d'adaptation qui se manifeste par des accroissements inférieurs à la normale. Ainsi les tiges résiduelles doivent s'adapter rapidement aux changements drastiques de conditions environnementales (luminosité, température, vent, neige, humidité) en modifiant la morphologie des aiguilles, en développant la cime et en équilibrant le système racinaire versus le système foliacé (Helms et Standiford 1985, Tucker et al. 1987). L'arbre doit aussi pallier aux blessures infligées lors de la coupe (Tesch et al. 1993). Ces adaptations nécessitent donc des modifications quant au mode d'allocation de carbone afin de satisfaire aux nouvelles exigences des fonctions vitales de l'arbre (Waring et Schlesinger 1985). Parfois, un stress hydrique peut se produire dans l'arbre, causant ainsi des diminutions d'accroissement en hauteur pour la période pendant laquelle la tige n'a pas encore surmonté l'incapacité de ses racines à procurer suffisamment d'eau au feuillage pour l'évapotranspiration (Tucker et Emmingham 1977). À la

lumière des résultats, une fois la période d'adaptation terminée, l'accroissement des gaules et des tiges récoltables est similaire à celui des semis libres de croître à dimensions comparables. À partir de ce moment, il apparaît donc que l'accroissement des sapins n'est pas tributaire de l'âge ou de la dimension initiale de la tige.

Dans le cas de l'accroissement en hauteur, l'effet de la période d'adaptation peut prendre jusqu'à 20 ans avant de se résorber. La durée semble être proportionnelle à la dimension initiale des tiges. Ainsi, chez les petites gaules, il a fallu moins de 10 ans avant que leurs accroissements soient équivalents aux semis libres de croître alors qu'il en a fallu plus de 15 ans chez les tiges supérieures à 3 m lors de la coupe. Ces résultats peuvent s'expliquer par le fait qu'il est plus difficile pour les plus grandes tiges d'acheminer la sève vers le haut car la distance entre les racines et la cime est plus importante (Kramer et Kozlowski 1979). Il faut aussi souligner que les tiges les plus exposées aux vents n'ont pas intérêt à augmenter leur coefficient d'élanement. La priorité sera donc d'augmenter le volume de bois à la base de la tige et de solidifier le système racinaire (Larson 1963, Cremer et al. 1982, Tucker et al. 1987) avant d'augmenter l'accroissement en hauteur. Enfin, il faut souligner que la mesure de l'accroissement en hauteur est entachée d'une plus grande erreur que l'accroissement en diamètre. Ainsi, la méthode d'évaluation des hauteurs utilisée dans l'analyse de tige ne permet pas une évaluation précise de la distance entre les verticilles. Il est aussi possible que les plus grandes tiges aient été les plus affectées par le bris de la flèche terminale lors de la coupe.

En général, l'étude de l'accroissement en diamètre à hauteurs et à cimes comparables montre une adaptation beaucoup plus rapide des tiges après la coupe (5 ans et moins) comparativement à l'accroissement en hauteur. Les moyennes gaules se démarquent toutefois avec des accroissements plus faibles que les semis libres de croître durant 20 ans après coupe. Quant aux tiges récoltables, elles démontrent une capacité élevée à accroître leur diamètre car leurs accroissements à dimensions comparables sont significativement supérieurs à ceux des semis et des moyennes gaules durant plusieurs années après la coupe. Il semble donc qu'elles ont particulièrement profité de leur position avantageuse dans le nouveau peuplement pour augmenter leur diamètre à hauteur de poitrine.

Quant à l'accroissement en volume ligneux après la coupe, Lussier et al. (1992) et Pothier et al. (1995) ont observé des accroissements supérieurs chez les plus hautes tiges présentes lors de la coupe. Lussier et al. (1992) indiquent que cet avantage des plus grandes tiges provient de leur surface cambiale plus élevée qui augmente leur capacité d'accroître leur volume ligneux. Afin d'éliminer cet impact, l'étude de l'accroissement en volume à volumes et pourcentages de cime comparables nous semble plus appropriée. Ainsi, après une courte période d'adaptation (moins de 10 ans), l'accroissement en volume total après la coupe est comparable, peu importe la dimension de la régénération au moment de la coupe. Presque 50 ans après la coupe, l'accroissement en volume n'a pas encore culminé chez les tiges récoltables présentes lors de la coupe. Ainsi le phénomène de sénescence n'est pas encore survenu sur les sapins qui avaient pourtant des âges biologiques supérieurs à 100 ans. Cette tendance a aussi été observée chez des tiges d'épinette noire dont la hauteur initiale était de plus de 7 m (Pothier et al. 1995).

L'étude de l'accroissement spécifique en volume à hauteurs et à pourcentages de cime comparables permet d'en arriver essentiellement aux mêmes conclusions en terme de durée de la période d'adaptation. La similarité des courbes d'accroissement spécifique en volume après les courtes périodes d'adaptation permet d'apprécier l'efficacité de cette mesure dans la compréhension des phénomènes de croissance. Ainsi, l'ASV, qui permet de considérer l'accroissement de l'ensemble de la tige par unité de surface cambiale, est une mesure plus complète que l'accroissement en diamètre qui est plutôt le reflet local de la réaction dans la partie inférieure de la tige.

À la lumière des résultats et des considérations physiologiques, la problématique de la compréhension de la croissance des gaules et des tiges récoltables après la coupe semble résider essentiellement sur les facteurs qui influenceront le temps nécessaire aux tiges pour s'adapter aux nouvelles conditions environnementales. Ainsi, après la période d'adaptation, l'accroissement des tiges ayant connu une période d'oppression se compare à celui des semis libre de croître, à dimensions comparables. Une meilleure connaissance des facteurs pouvant affecter la longueur de la période d'adaptation serait profitable.

3.4.4. Pertes de croissance causées par les défoliations

L'importance des pertes de croissance et de la mortalité induites par des insectes défoliateurs est généralement associée à l'âge des peuplements (MacLean 1980, Blais 1958, 1983, Archambault et al. 1990), le niveau de défoliation (MacLean et al. 1996), la vigueur des tiges (MacLean 1980, Archambault et al. 1990, Thibault et al. 1995) et leur position dans le couvert (Blais 1958). Cependant peu d'auteurs ont abordé la performance des tiges ayant subi des défoliations après avoir été libérées d'une période d'oppression initiale. Gagnon (1985) a observé chez des sapins baumiers, qui avaient été opprimés en jeune âge, que les diminutions de croissance en hauteur causées par la tordeuse des bourgeons de l'épinette n'ont pas été plus importantes que chez les semis plus jeunes. Chez l'épinette noire, Lussier et al. (1992) en sont arrivés à la même conclusion quant à l'accroissement spécifique en volume. Pour ce qui est de la deuxième période épidémique, les résultats de la présente étude montrent la même tendance. Ainsi les semis libres de croître ont subi des pertes similaires aux tiges de dimension supérieure en termes de pertes d'accroissement en hauteur et en volume total. Ces résultats appuient l'hypothèse selon laquelle l'âge biologique des tiges n'a pas d'influence sur la vigueur des tiges et par conséquent, l'accroissement durant les périodes de défoliations.

Cependant, au niveau de l'accroissement en volume lors du passage de la première période épidémique, les semis semblent avoir été moins affectés (pertes de 25%) que les grandes gaules (pertes de 44%). Une des raisons que l'on peut invoquer est que les proportions de cime de ces derniers étaient les plus faibles lors du passage de la tordeuse. Il se peut aussi que l'effet de la tordeuse ait été amplifié parce que les défoliations se sont réalisées une douzaine d'années après la coupe. Certaines tiges étaient encore en période d'adaptation. Or, il semble que le stress hydrique peut favoriser un enrichissement du feuillage en azote assimilable (Waring et Schlesinger 1985) et une meilleure survie des insectes qui s'en nourrissent (Kimmins 1971). Il est donc possible que les pertes auraient pu être beaucoup plus élevées si l'épidémie s'était produite à l'intérieur des premières années après la coupe. Ainsi Bause (1995) et Batzer (1967) soulignent que les dommages causés par la tordeuse sur les tiges résiduelles peuvent être sévères

si une épidémie se produit durant les deux premières années après une éclaircie. De plus, à cause de la préférence de la tordeuse pour les bourgeons floraux, la susceptibilité des tiges serait liée à la maturité sexuelle. Or les semis avaient, en moyenne, 22 ans en 1955, soit à peine l'âge minimum où les tiges peuvent commencer à produire des semences (Roe 1948, Morris 1948, Webb 1957). Quant à l'accroissement en hauteur, il ne semble pas avoir de différence entre les classes de régénération.

Une analyse plus approfondie des pertes de croissance permet de constater que, si les programmes de pulvérisation ont été efficaces pour contrer des mortalités massives dans le dispositif, les pertes de croissance ont tout de même été substantielles. Ainsi lors de la dernière infestation, qui a touché les sapinières de la région de façon modérée (Lachance et al. 1990), les pertes d'accroissement en volume total des tiges individuelles sont, en moyenne, entre 32 et 38% durant 11 ans. Ces résultats se comparent à ceux de MacLean et al. (1996) qui avaient étudié les pertes sur l'accroissement spécifique en volume de sapins baumiers affectés par 6 années consécutives de défoliations modérées à sévères. Ainsi l'analyse des données mesurées par ces auteurs permet de constater qu'en moyenne les sapins, ayant subi des défoliations cumulatives supérieures à 25%, ont perdu autour de 37% de leur accroissement précédant les défoliations. D'autres auteurs ont évalué des pertes entre 50 et 80% sur l'accroissement en volume après 6 à 10 ans de défoliation (Batzer 1973, Baskerville et MacLean 1979, Archambault et Beaulieu 1985). Quant à l'accroissement en hauteur, les pertes s'élèvent à environ 50% de l'accroissement normal.

CHAPITRE 4. ANALYSE DE LA CARIE ET DE LA DÉCOLORATION

4.1. Introduction

La valeur des tiges préétablies, suite à l'ouverture du couvert, n'est pas seulement tributaire de leur capacité à croître. Il importe que les individus protégés ne soient pas trop affectés par la pourriture au moment de leur récolte. Ainsi, toute intervention sylvicole, comme la CPRS, constitue une source supplémentaire d'opportunités pour l'entrée de pathogènes via les blessures infligées sur les tiges résiduelles. Le sapin baumier étant l'une des essences résineuses les plus susceptibles à la carie (Basham 1991), une attention spéciale doit y être accordée. Les tiges opprimées peuvent aussi développer des caries de pied avant la coupe du couvert dominant (Lavallée 1986). La régénération préétablie est donc soumise à plusieurs facteurs qui augmentent les risques de propagation de la carie. La valeur de la haute régénération suite à la coupe reste donc à vérifier au niveau de la proportion de pourriture.

Chez le sapin baumier, seul Morris (1948) a étudié la carie chez des tiges ayant subi une longue période d'oppression. Ainsi la surface transversale des souches provenant des plus vieilles tiges ne serait pas plus affectée par la carie que celle des plus jeunes tiges. Chez l'épinette noire, Horton et Groot (1987) et Paquin et Doucet (1992b) en sont venus à la même conclusion. Crossley (1976) a aussi observé de faibles impacts de la carie sur des tiges qui avaient été affectées par une période initiale d'oppression.

En général, on distingue deux types de caries: les caries de pied et les caries de tronc. Les caries de pied proviennent à plus de 90% des racines (Spaulding et Hansbrough 1944, Lavallée 1986) et ne montent généralement pas plus qu'à 2 m du sol (Basham 1991). Les caries de pied sont plus nombreuses que les caries de tronc mais ces dernières sont trois fois plus volumineuses (Basham et Morawski 1964, Lavallée 1986). Il est donc important de se préoccuper des caries de tronc qui sont principalement associées aux blessures sur la tige et les branches. La phase initiale de la carie est souvent caractérisée par la présence d'un volume coloré (Basham 1991). Ainsi,

avec l'arrivée du champignon, on retrouve souvent une modification chimique du bois causant l'apparition de zones plus foncées. La décoloration chez le sapin est considérée par certains comme une source de diminution de la qualité de la pulpe (Hunt et Whitney 1974). Cette décoloration risque d'évoluer en carie à plus ou moins long terme.

Les objectifs du présent chapitre sont donc d'étudier, 47 ans après coupe, les phénomènes de détérioration du bois au niveau des tiges individuelles et au niveau du peuplement. Au niveau des tiges individuelles, une comparaison entre des semis, des gaules et des tiges récoltables est réalisée selon les critères suivants:

1. la proportion des tiges qui sont cariées;
2. la proportion du volume marchand carié sur les tiges affectées par la carie;
3. l'importance de la carie et de la décoloration sur le volume marchand net par tige.

Au niveau du peuplement, une comparaison de l'importance de la carie sur le volume marchand à l'hectare est présentée selon la composition en haute régénération préétablie des différentes placettes étudiées.

4.2. Matériel et méthode

4.2.1. Analyse au niveau des tiges individuelles

Les données proviennent des analyses de tiges récoltées dans les 14 placettes utilisées dans l'analyse au niveau du peuplement (tableau I). Ainsi, pour chacun des disques de bois récoltés à différents niveaux, les surfaces affectées par la carie ont été mesurées en utilisant les critères en vigueur pour le mesurage des bois abattus au Québec (MRNQ 1994). Le cœur rouge du sapin est considéré comme une carie. Nous avons aussi considéré les zones plus faiblement colorées et dont la fibre n'était pas détériorée comme étant de la décoloration. Les évaluations ont été réalisées sur des échantillons à l'état sec.

Les volumes de carie compris entre deux sections affectées ont été évalués selon la formule du tronc de cône. Dans les cas où la carie apparaissait à un seul bout, les volumes ont été estimés selon la formule du cône où la longueur de celui-ci correspond à la moitié de la distance entre les deux rondelles.

Pour l'étude de la fréquence et de la proportion de carie par tige, toutes les analyses de tiges ayant un DHP supérieur à 15,1 cm en 1990 ont été utilisées. Ainsi, la presque totalité des tiges des classes de 14 cm de DHP et moins n'étaient pas affectées par la pourriture. Cette étude ne concerne que le sapin baumier, les épinettes n'étant pas suffisamment représentées pour une analyse adéquate. Au total, 161 sapins baumiers ont été retenus et répartis dans cinq classes de régénération lors de la coupe soit 85 semis, 25 petites gaules, 17 moyennes gaules, 19 grandes gaules et 15 tiges récoltables. La définition de chacun des groupes est expliquée au chapitre 1. Les proportions de volume affecté sont calculées en divisant le volume de carie par le volume marchand en 1990. La proportion de carie étant liée à la dimension de la tige (Spaulding et Hansbrough 1944, Basham 1950, Lavallée 1986), les analyses ont été réalisées à partir de trois groupes de classe de DHP (16-20 cm, 22-26 cm et 28 cm et plus). Ceci permet de tenir compte du fait que les gaules et les tiges récoltables ont des dimensions plus importantes en 1990 que les semis.

4.2.2. Analyse au niveau du peuplement

Une évaluation du volume carié (de pied et de tronc) par tige a été réalisée à partir des valeurs obtenues avec les analyses de tiges. Une régression linéaire multiple expliquant le volume carié par tige a permis d'évaluer le volume de réduction associé à chacune des tiges présentes dans les placettes. Ainsi, à partir des diamètres cariés à la souche (D_{CS} en cm) et à hauteur de poitrine (D_{CP} en cm) mesurés sur chacun des arbres récoltés, le volume de carie (V_C en dm^3) est obtenu à partir de l'équation [12]. Les volumes cariés ont été multipliés par 1,0404 pour éliminer l'effet du retrait radial lors du séchage. Le volume de réduction présent dans chacune

des placettes a été obtenu à partir de la somme des volumes de carie évalués dans chacune des tiges vivantes résineuses en 1990.

$$[12] \quad V_c = -3,655178 + 0,189745 * D_{cp}^2 + 7,013054 * \text{Log}_{10}(D_{CS} + 0,1)$$

$R^2 = 82\%$ et coefficient de variation = 70%

4.3. Résultats

4.3.1. Proportion de tiges cariées

Une proportion élevée (plus de 75%) des sapins de plus de 5 m lors de la coupe (grandes gaules et tiges récoltables) était cariée en 1990 (figure 22). La haute régénération préétablie est plus fréquemment affectée que les semis, à dimensions équivalentes 47 ans après coupe. En général, chez les petites et moyennes gaules, autour de la moitié des tiges sont cariées comparativement à moins de 1 tige sur 4 chez les semis. De plus, pour une même classe de diamètre, il y a un gradient croissant dans la fréquence de la carie en fonction de la dimension initiale. En général, la carie est plus fréquente chez les tiges de dimension sciage puisque la proportion de tiges cariées double lorsque l'on passe de la classe 16-20cm à 22-26cm.

4.3.2. Proportion du volume marchand par tige affectée par la carie

Les grandes gaules et les tiges récoltables affectées par la carie se démarquent nettement des autres groupes avec des proportions de volume marchand carié au-dessus de 5% (figure 23). Quant aux gaules de moins de 5 m, il n'y a pas de différence marquée avec les semis quant à la proportion de volume marchand carié. Pour ces tiges, la carie est peu volumineuse avec des taux inférieurs à 2% du volume marchand brut. L'étude de la classe de diamètre 22-26 cm montre que les grandes gaules sont beaucoup plus affectées comparativement aux plus jeunes tiges.

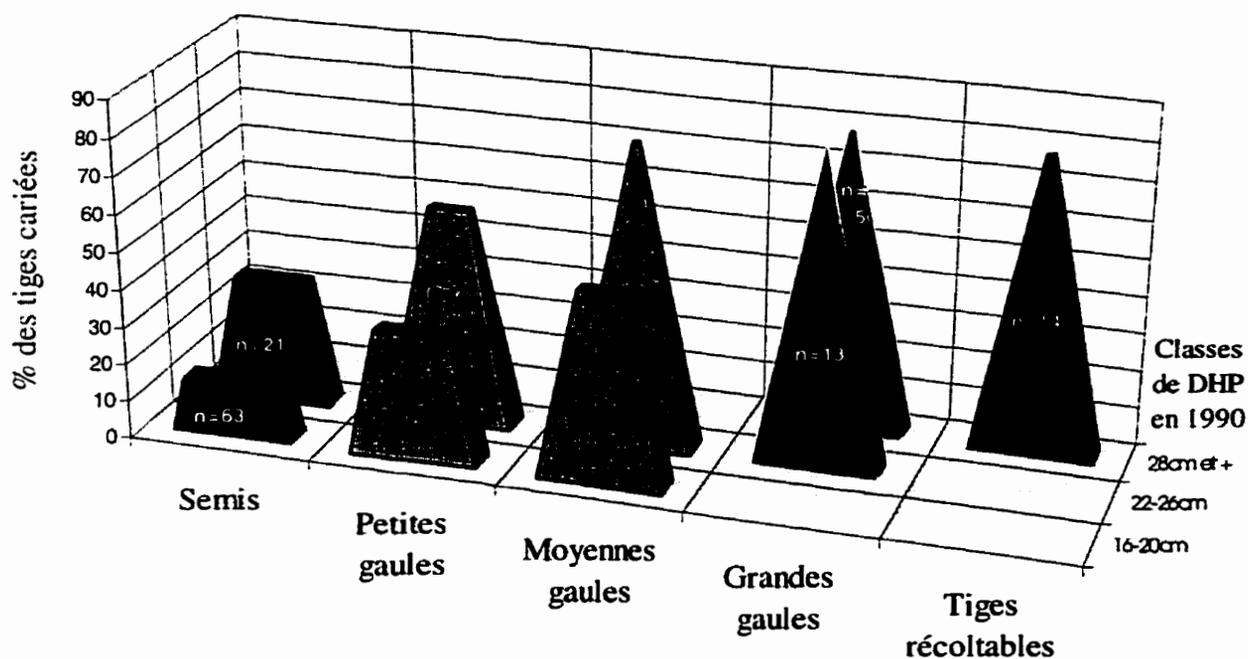


Figure 22. Proportion des tiges affectées par la carie.

Le nombre de tiges analysées est inscrit dans les groupes correspondants.

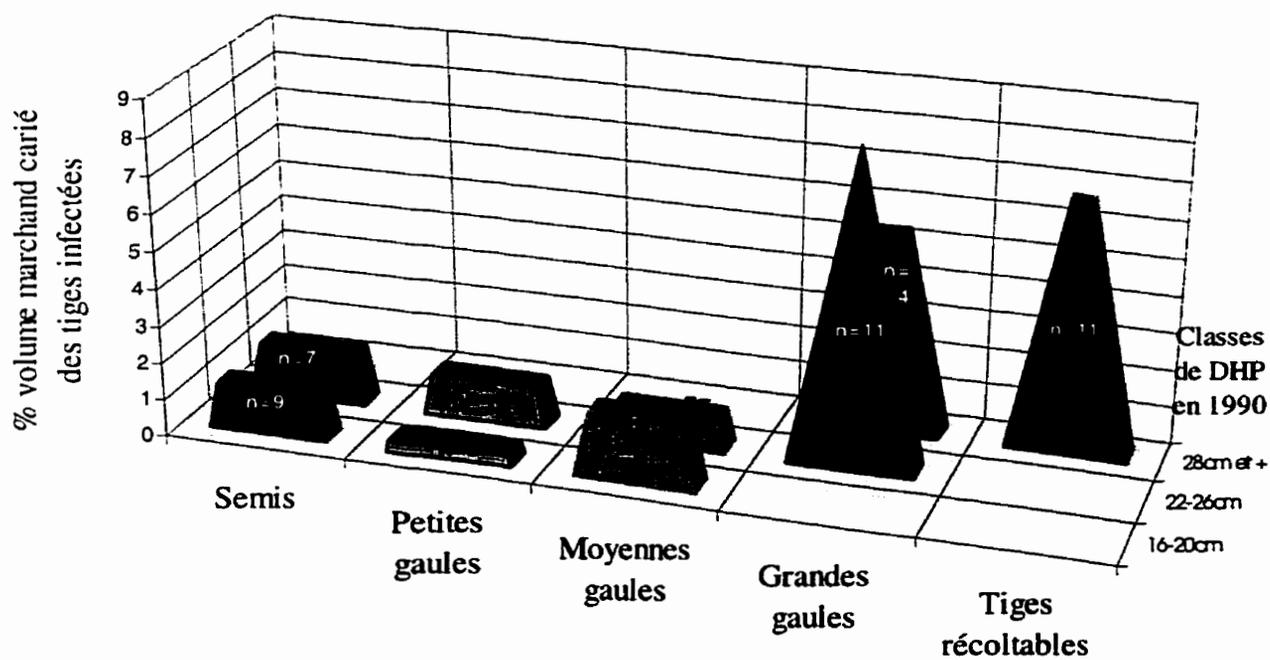


Figure 23. Proportion du volume marchand carié des tiges affectées par la carie.

Le nombre de tiges analysées est inscrit dans les groupes correspondants.

4.3.3. Volumes moyens altérés et marchands nets par tige

Sur la base de la moyenne de toutes les tiges (affectées ou non par la carie), plus la régénération protégée lors de la coupe est de grande taille, plus le volume de carie est élevé (tableau 6). Ainsi, les semis et les petites gaules sont très peu affectées par la carie et la décoloration (moins de 1% du volume marchand). Les moyennes gaules ont un peu plus de carie mais les taux demeurent très acceptables avec moins de 2% de carie. Quant aux grandes gaules et aux tiges récoltables, les proportions de carie sont plus considérables. La proportion moyenne du volume marchand affecté est de respectivement 6 et 5% pour les deux groupes (figure 24). Toutefois, même si les tiges de plus de 5 m lors de la coupe sont plus affectées par la pourriture, elles se démarquent avec des volumes marchands nets généralement supérieurs à 300 dm³/tige (tableau 6).

Tableau 6. Volumes moyens des tiges de 15,1 cm et plus de DHP en 1990.

Type de régénération	Volume de carie (dm ³ /tige)	Volume décoloré (dm ³ /tige)	Volume marchand net (dm ³ /tige)
Semis	0,5	0,0	165,3
Petites gaules	0,5	0,3	182,4
Moyennes gaules	4,3	1,9	231,4
Grandes gaules	21,8	14,6	324,1
Tiges récoltables	26,6	13,0	477,8

Au niveau de la décoloration, les grandes gaules étaient les plus affectées avec plus de 4% du volume marchand. Chez les tiges de plus de 5 m lors de la coupe, certaines étaient fortement affectées par la présence de décolorations du tronc, surtout observées dans la partie supérieure des tiges. Généralement, elles étaient associées à la présence de verticilles constitués de grosses branches mortes. Sur certains arbres, le champignon avait progressé à un stade suffisamment avancé pour qu'on puisse considérer le défaut comme une carie. Notons que, dans la majorité des cas, les tiges qui étaient affectées par la décoloration présentaient aussi de la carie.

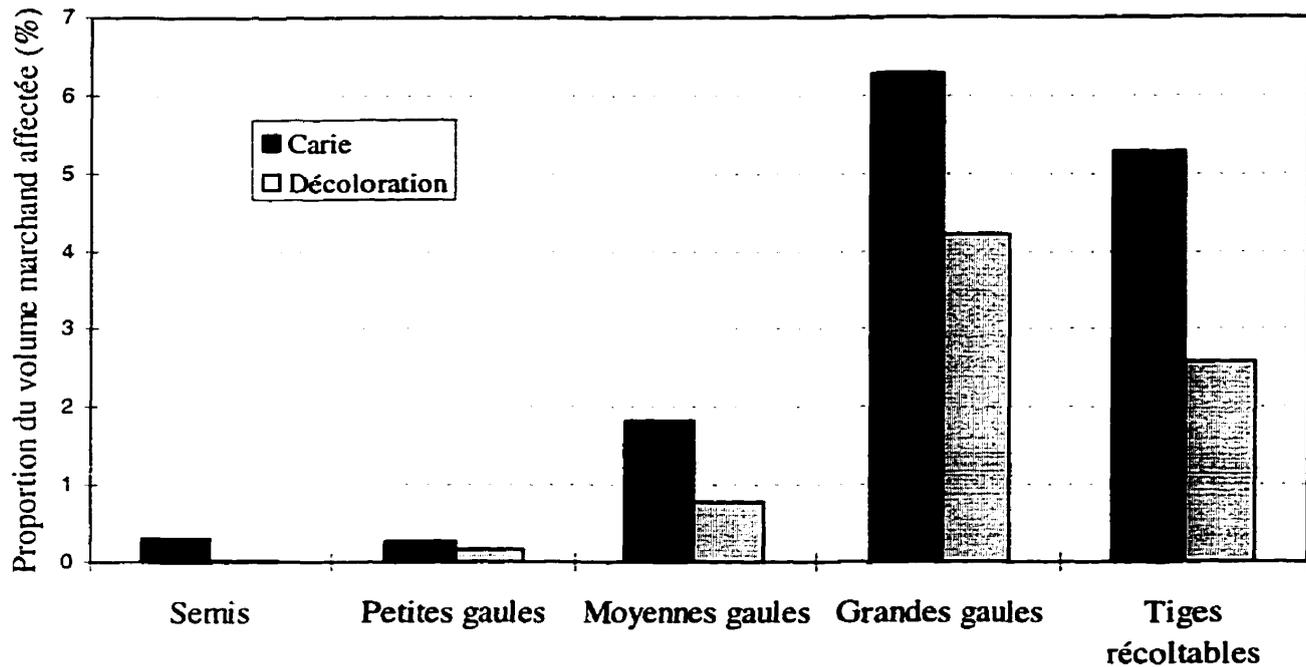


Figure 24. Proportions du volume marchand affectées par la carie et la décoloration. Moyenne de l'ensemble des tiges analysées par classe de régénération.

4.3.4. Volume marchand net à l'hectare et proportion affectée par la carie

Au niveau du peuplement, les placettes de semis et les placettes avec une forte proportion de petites gaules sont les moins affectées par la carie avec moins de 1 m³/ha (tableau 7). Dans les placettes contenant une certaine proportion de haute régénération avec ou sans diversité de dimension lors de la coupe, les taux varient entre 2 et 4% du volume marchand brut. Ainsi, plus les placettes sont constituées de régénération de grande taille plus les volumes de réduction sont élevés. D'ailleurs, il y a une relation hautement significative ($P > F=0,002$) entre la proportion de volume carié et la part du volume marchand en 1990 reposant sur des tiges de plus de 5 m lors de la coupe (figure 25). La présence de 80% du volume, plutôt que 20%, en grandes gaules ou/et tiges récoltables contribuera à obtenir une proportion de carie 2½ fois plus importante. Toutefois, quant au volume marchand net en 1990, les placettes constituées de régénération préétablie de haute taille sont généralement supérieures aux placettes de semis. Notons que les pertes de

matière ligneuse causées par la pourriture sont toutes inférieures à 11 m³/ha comparativement à des volumes marchands bruts souvent supérieurs à 150 m³/ha (tableau 7).

Tableau 7. Statistiques sur les volumes marchands et cariés des placettes en 1990.

Numéro de placette	Volume marchand brut (m ³ /ha)	Volume de réduction (m ³ /ha)	Volume marchand net (m ³ /ha)	% du volume marchand carié
Placettes composées de semis seulement				
6	172,7	0,3	172,4	0,2
9	119,0	0,0	119,0	0,0
5	196,2	0,4	195,8	0,2
Placettes composées de semis et une faible proportion de haute régénération (moins de 10% des tiges)				
10	170,0	5,0	165,0	2,9
7	133,1	2,7	130,4	2,0
15	210,2	3,8	206,4	1,8
14	205,8	3,5	202,3	1,7
Placettes composées d'une forte proportion de gaules				
2	284,0	0,3	283,7	0,1
16	167,4	0,5	166,9	0,3
Placettes composées de semis et une proportion entre 10 et 20% de haute régénération et avec une diversité de dimension initiale				
11	326,0	5,9	320,1	1,8
4	128,8	5,5	123,3	4,3
12	236,6	10,5	226,1	4,4
Placettes composées d'une forte proportion de haute régénération et avec une diversité de dimension initiale				
3	215,8	3,7	212,1	1,7
1	270,1	8,9	261,2	3,3

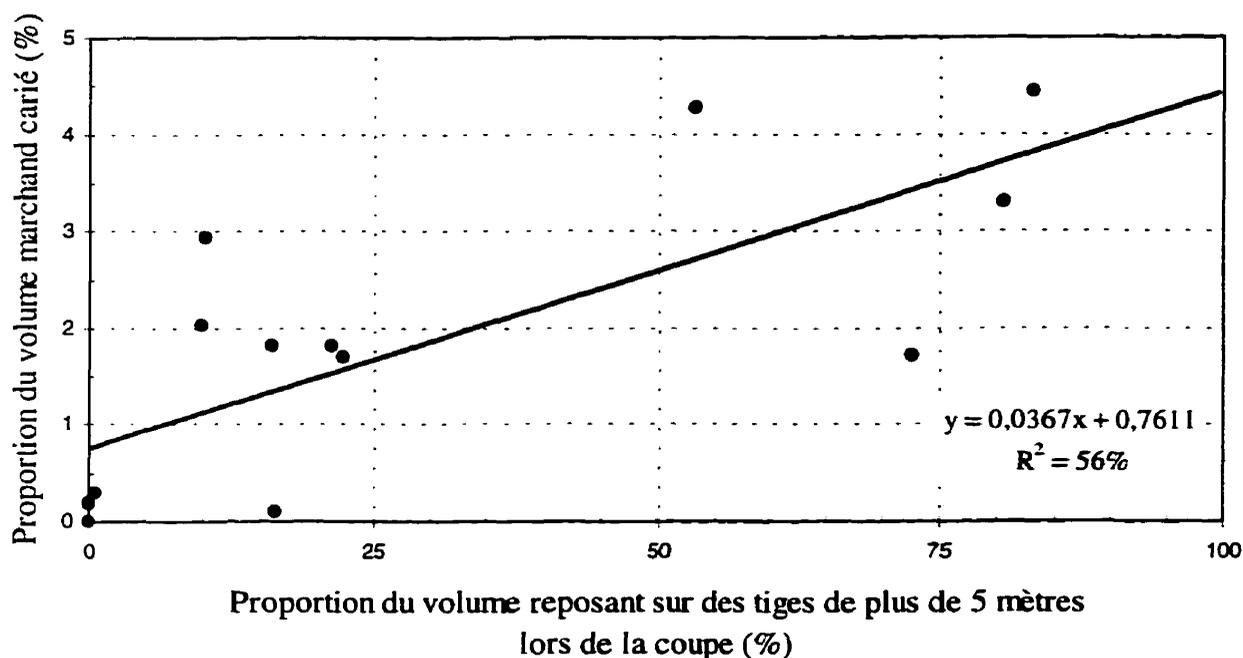


Figure 25. Relation, en 1990, entre la proportion de carie dans les placettes et la présence de tiges de plus de 5 m lors de la coupe.

4.4. Discussion

Horton et Groot (1987) et Paquin et Doucet (1992a) ont observé que, chez les marcottes d'épinette noire, les tiges d'âge élevé ayant subi une période d'oppression n'étaient pas plus affectées par la carie que les plus jeunes tiges (semis). Chez le sapin baumier, Morris (1948) a étudié le phénomène pour en arriver aux mêmes conclusions plus de 75 ans après l'ouverture du couvert. Toutefois, Herring et Etheridge (1976) ont observé, seulement 15 ans après la coupe, que la carie de pied était plus fréquente sur les sapins amabilis (*Abies amabilis*) qui avaient 60 ans et plus au moment de leur mise en lumière. Des études réalisées dans l'Ouest sur différentes espèces de sapin ont permis d'identifier un champignon qui s'installe dans la régénération préétablie durant le début de leur oppression (Herring et Etheridge 1976, Aho 1977, Aho et al. 1987). Le champignon responsable (*Echinodontium tinctorium*) infecte les tiges par le biais des branches et demeure en état de dormance durant plusieurs années sans causer de carie. Selon ces auteurs, le processus de détérioration du bois s'amorce après la coupe sur les tiges les plus

sérieusement blessées. Toutefois, aucune étude ne fait état de ce genre de phénomène dans l'est du continent nord-américain.

En général, les résultats obtenus dans le présent chapitre, montrent que plus les tiges protégées lors de la coupe sont hautes (donc vieilles), plus les caries sont fréquentes et volumineuses. Ainsi, les tiges de plus de 5 m de hauteur lors de la coupe semblent plus susceptibles à la carie. Quant aux tiges de moins de 5 m, l'étude de la fréquence et du volume moyen carié indique qu'elles n'inspirent que peu de crainte, 50 ans après leur mise en lumière. Ces résultats diffèrent de ceux de Morris (1948) qui n'avait observé aucune différence marquée entre les tiges ayant connu des périodes d'oppression de différentes durées. Toutefois, dans cette étude, seule la surface de carie à la souche avait été mesurée. Par conséquent, ces conclusions touchent principalement la carie de pied. La carie de tronc, qui semble importante dans la présente étude, n'a donc pas été considérée par Morris (1948). L'origine de la mise en lumière était aussi différente du fait que les peuplements avaient été ouverts par des événements naturels tels qu'une épidémie de tordeuse des bourgeons de l'épinette ou un chablis. Ainsi, étant donné que les tiges étudiées proviennent plutôt d'une coupe, les risques de blessures à la cime (lors de l'abattage), au tronc et au système racinaire (principalement lors du débusquage), sont plus importants.

Les résultats obtenus montrent donc qu'il semble y avoir une incidence de la dimension initiale, sur la fréquence et la proportion de carie. Quoique l'âge soit reconnu comme étant un facteur important pour expliquer la propagation de la carie, certains sapins de plus de 130 ans lors de l'échantillonnage n'étaient que très faiblement affectés par la pourriture. Il est donc difficile d'attribuer les variations dans l'importance de la carie à l'âge seulement. La qualité des tiges protégées qui ont survécu jusqu'à l'échantillonnage est un facteur qui peut être tout aussi important, mais les données disponibles ne permettent pas d'étudier cet aspect dans cette étude rétrospective.

Un autre facteur important est la présence de grosses branches cassées ou blessées. Ainsi Stillwell (1956), Davidson et Etheridge (1963), Lortie (1968) mentionnent que des branches de

plus de 2,5 cm de diamètre ont beaucoup plus de chances d'infecter le tronc que celles plus petites. Le champignon responsable est *Haematostereum sanguinolentum* (anciennement nommé *Stereum sanguinolentum*) qui cause une décoloration du bois dans sa phase initiale de développement (Basham 1991) et qui est pratiquement responsable de toutes les caries de tronc rencontrées chez le sapin baumier (Lavallée 1986). Stillwell (1956) a d'ailleurs démontré que les grosses branches mortes lors d'une défoliation sont plus infectées. La dernière épidémie de tordeuse des bourgeons de l'épinette est donc peut-être responsable de la décoloration observée dans la partie supérieure de certaines grosses tiges. Il semble aussi que la hauteur de la base de la cime vivante au moment de la coupe coïncide avec la présence de décoloration et de carie, 47 ans après la coupe. Ainsi chez les plus hautes tiges protégées lors de la coupe, l'absence prolongée de compétition au niveau de la cime peut avoir favorisé la formation de grosses branches.

Pour l'ensemble des tiges étudiées, les volumes cariés sont plutôt faibles. Ainsi pour les tiges de moins de 5 m lors de la coupe, les proportions de carie sont inférieures à 2% du volume marchand, 47 ans après la coupe. À dimensions équivalentes (volume marchand de 150 à 250 dm³/tige), Lavallée (1986) a observé des taux d'environ 6% du volume marchand sur des sapins d'un peu plus de 80 ans provenant de la forêt boréale québécoise. Les tiges âgées de 50 ans présentaient des taux de 4% comparativement à moins de 1% chez les semis de la présente étude. Quant aux tiges de plus de 5 m lors de la coupe, malgré des âges supérieurs à 90 ans, les proportions de carie sont inférieures à celles observées par Lavallée (1986) sur des tiges de dimensions comparables (5 à 6% comparativement à 7-9%).

Au niveau du peuplement, à cause de la prédisposition à la pourriture des tiges de plus de 5 m de hauteur lors de la coupe, il semble que les peuplements issus d'une coupe avec protection de grandes gaules et de tiges récoltables puissent présenter des proportions de pourriture plus élevées. Malgré tout, les taux de réduction sont encore relativement faibles avec moins de 5% du volume marchand, 47 ans après la coupe. À titre de comparaison, Lortie (1968) a observé des taux d'environ 4% du volume total dans des sapinières équiennes de 80 ans de classe de fertilité I situées dans le comté de Matane. L'importance des volumes de décoloration observés sur les tiges de plus de 5 m lors de la coupe laisse toutefois présager une augmentation notable des taux

de carie si ces tiges ne sont pas récoltées à l'intérieur des 60 premières années après la coupe. Ainsi, en considérant que la décoloration est le stade initial de la carie, des volumes importants de réduction pourraient s'ajouter sur les plus grosses tiges. Il semble donc nécessaire de porter une attention particulière sur les peuplements dont une proportion élevée du volume marchand repose sur de la haute régénération préétablie de sapin baumier. Il n'en demeure pas moins que les volumes marchands nets à l'hectare sont bien supérieurs dans les placettes constituées de hautes régénérations préétablies et de tiges récoltables.

CHAPITRE 5.TAUX DE SURVIE ET DIMENSION DE LA RÉGÉNÉRATION, 47 ANS APRÈS LA COUPE

5.1. Introduction

Après la coupe, quelques études ont porté sur les taux de survie de la régénération préétablie protégée lors de la coupe. Ruel et al. (1995) et Ruel et Doucet (1998) ont observé, chez des sapins baumiers et des épinettes noires de plus de 3 m ne possédant pas de défauts majeurs, des taux de survie autour de 90% trois ans après la coupe. Les taux de survie sont meilleurs chez les tiges les plus hautes comparativement aux semis de petites dimensions. En général, la mortalité est plus élevée la première année et diminue progressivement par la suite (Ruel et al. 1995, Mård 1997, Tesch et al. 1993). Ainsi, les premières années suivant la coupe sont les plus critiques à cause du fort stress induit par les changements drastiques des conditions environnementales. Avec la fermeture du couvert, les arbres physiologiquement les plus efficaces vont survivre et vont croître plus rapidement au détriment des tiges plus petites (Kramer et Kozlowski 1979). Cependant, au niveau de la haute régénération protégée lors de la coupe, aucune étude ne fait état, à long terme, de cette capacité physiologique à survivre malgré l'âge biologique plus élevé.

L'impact de la tordeuse des bourgeons de l'épinette soulève également des inquiétudes quant à la survie des arbres et des peuplements. Gagnon et Chabot (1988) soulignent que les sapins les plus âgés sont particulièrement vulnérables aux défoliations. Il reste à vérifier si cette affirmation s'applique aux tiges ayant connu une période d'oppression prolongée sous couvert.

Quant à la dimension des tiges, Paquin et Doucet (1992a) ont démontré que les hautes marcottes d'épinette noire protégées lors de la coupe sont capables de suffisamment bien se développer pour faire partie de l'étage des codominants et des dominants après plus de 47 ans après coupe. De plus, elles forment une large part du volume marchand du peuplement comparativement à leur nombre. L'impact de la dimension initiale de la régénération sur la

grandeur des tiges à récolter à la fin de la révolution est aussi d'intérêt. Chez le sapin baumier, McCarthy (1918) et McGraw (1948) soulignent que la haute régénération est capable de suffisamment bien réagir pour former les plus grosses tiges du futur peuplement. La présence de la régénération préétablie pourrait permettre la production des billes de dimension sciage de plus en plus recherchées par l'industrie du bois d'oeuvre.

Les objectifs poursuivis dans ce chapitre sont de comparer les différentes classes de régénération en fonction de leur taux de survie à long terme, leurs dimensions atteintes et leur part du volume du peuplement 47 ans après la coupe.

5.2. Matériel et méthode

Afin de mieux synthétiser l'information disponible, les données provenant des onze placettes contenant des gaules et des tiges récoltables lors de la coupe (tableau 1) ont été mises en commun. Les placettes 5, 6, 9 et 13, ne contenant que des semis, ont donc été mises de côté. Ce chapitre porte donc sur l'analyse combinée des données d'inventaire et des tiges récoltées dont on possède la rondelle à 1,3 m du sol. Puisqu'il n'existait pas de différences marquées entre les sapins et les épinettes, les analyses suivantes considèrent toutes les tiges résineuses, sans égard à l'essence.

5.2.1. Évaluation du taux de survie

À partir des cernes mesurés au moyen du logiciel Windendro, il est possible d'obtenir le diamètre de la tige à n'importe quelle année. La comparaison des données d'inventaire de 1954 (soit 11 années de croissance après coupe) à celles provenant des rondelles prises à hauteur de poitrine, a donc permis d'évaluer la mortalité des tiges par classe de DHP en 1954. Pour chacune des classes de diamètre en pouces en 1954, la différence entre le nombre de rondelles qui ont formé un cerne en 1990 et le nombre de tiges vivantes mesurées dans l'inventaire de 1954, nous donne le nombre de tiges mortes entre 1954 et 1990. Vu l'absence de données d'inventaire

immédiatement après la coupe, l'analyse du taux de mortalité lors des 11 premières années est impossible. Cependant, l'analyse de la mortalité des tiges entre les 11^{ème} et 47^{ème} années après la coupe, permet de juger de la vigueur des tiges ayant survécu à la difficile période d'adaptation. À partir de la relation entre le diamètre en 1954 et celui en 1943, une analyse du taux de survie sur la base de la dimension au moment de la coupe a été réalisée. Afin d'évaluer l'effet de la période d'oppression sur la survie, une comparaison de l'âge au moment de la coupe a aussi été réalisée entre les tiges vivantes et mortes en 1990. Pour ce faire, toutes les rondelles de souche (prélevées à 20 cm du niveau du sol), dont la découpe était complète, ont été utilisées.

5.2.2. Dimension des tiges 47 ans après coupe

À partir des rondelles prises à hauteur de poitrine, une analyse de la dimension obtenue en 1990 en fonction de la classe de dimension initiale a été réalisée. Seules les tiges résineuses encore vivantes en 1990 ont été analysées. Les tiges ont été divisées en quatre groupes selon leur diamètre avec écorce à hauteur de poitrine en classes de pouce en 1990:

non-marchandes: tiges des classes de DHP de 3 po et moins (moins de 9 cm);

petites tiges marchandes : tiges des classes de 4 et 5 po (9-14 cm);

dimension sciage: tiges des classes de 6 à 9 po (14-25cm);

forte dimension: tiges des classes de 10 po et plus (plus de 25 cm).

Afin de mieux cerner l'impact de la dimension initiale, les semis ont été divisés en trois groupes selon la hauteur au moment de la coupe. On distingue donc les petits semis que l'on pourrait qualifier de « post-établis » car ils sont inférieurs au niveau de la souche (20 cm) en 1943. Les semis moyens ont entre 20 et 50 cm alors que les grands ont plus de 50 cm de hauteur. La classe des grosses tiges marchandes a été ajoutée et correspond aux tiges de 15,1 cm et plus lors de la coupe alors que les petites tiges récoltables représentent les tiges des classes de 12 et 14 cm de DHP.

5.2.3. Contribution au volume du peuplement

La contribution, 47 ans après la coupe, au volume marchand de chacune des classes de régénération a été calculée. Le calcul a été réalisé pour l'ensemble des placettes contenant des gaules, à partir du volume marchand des tiges vivantes résineuses dont la rondelle à 1,3 m du sol a été récoltée.

5.3. Résultats

5.3.1. Caractéristiques moyennes des placettes étudiées

Selon les rondelles récoltées dans les placettes contenant de la haute régénération préétablie, il y avait en moyenne 562 gaules et 47 tiges récoltables (classes de 12 cm et plus de DHP) à l'hectare lors de la coupe à l'origine du peuplement. Les espaces disponibles ont été mis à profit par 1 923 semis à l'hectare qui étaient en grande majorité déjà établis lors de la coupe. Évidemment, cette évaluation ne tient toutefois pas compte des tiges qui sont mortes avant 1980 et dont la rondelle à hauteur de poitrine n'était pas analysable. La surface terrière totale initiale était de 1,6 m²/ha, dont 1 m²/ha marchand. Selon les données d'inventaire, la régénération résineuse n'a pas souffert de compétition par des feuillus de lumière. De plus, les quelques bouleaux à papier laissés sur pied lors de la coupe sont généralement morts à l'intérieur des 20 premières années. Les peuplements constitués de gaules et de tiges récoltables lors de la coupe ont obtenu, en moyenne, un volume marchand de 213 m³/ha, 47 ans après la coupe.

La plupart des semis ont connu une période d'oppression de moins de 20 ans (tableau 8). Les petits semis, qui ont nécessité en moyenne seulement 3 ans après la coupe pour atteindre le niveau de la souche étaient probablement en grande majorité déjà établis en 1943. Les moyennes et grandes gaules ont connu des périodes d'oppression autour de 40 ans. Plusieurs tiges

récoltables avaient plus de 130 ans en 1990. Notons que dans le cas des grosses tiges marchandes, l'âge moyen n'a pu être établi car aucune tige ne présentait une souche complète principalement à cause de la carie de souche.

Tableau 8. Âges moyens en 1943 des tiges vivantes résineuses en 1990.

Dimension lors de la coupe	Moyenne ± écart type	Étendue
Semis de moins de 20 cm	(3) ± 2	(12) - (1)
Semis entre 20 cm et 50 cm	3 ± 3	1 - 18
Semis de plus de 50 cm	16 ± 10	3 - 74
Gaules de moins de 3 m	25 ± 9	7 - 58
Gaules de 3 à 5 m	42 ± 14	17 - 65
Grandes gaules	41 ± 13	24 - 70
Petites tiges marchandes récoltables	82 ± 13	67 - 130

Pour les tiges post-établies à la souche (petits semis), les chiffres entre parenthèses correspondent au nombre d'années après la coupe avant que les tiges atteignent 20 cm au-dessus du niveau du sol.

5.3.2. Taux de survie des tiges

Les diamètres à hauteur de poitrine en 1943 sont fortement corrélés aux diamètres en 1954 exprimés en pouces. Ainsi, l'étude de la figure 26 permet une évaluation de la dimension lors de la coupe des tiges inventoriées en 1954. Par exemple, les semis étaient représentés principalement dans les classes de 1 et 2 pouces en 1954 alors que les grosses tiges marchandes, de plus de 15,1 cm de DHP lors de la coupe, faisaient principalement partie des classes de 9 pouces et plus de DHP en 1954.

L'analyse des taux de survie permet de constater que, à part les tiges de moins de 4 pouces en 1954, le ¾ des tiges ont survécu entre la 11^{ième} et la 47^{ième} année après la coupe (figure 27).

Ainsi, de la classe de 4 à 9 pouces en 1954, c'est-à-dire les gaules et les tiges récoltables en 1943, la survie est au même niveau. Cependant, cette proportion chute dans la classe de 10 pouces et plus représentée par quelques tiges de plus de 18 cm de DHP en 1943. Les tiges de 3 pouces, représentées principalement par les petites gaules, ont perdu presque la moitié de leur effectif alors que seulement un semis sur quatre a survécu entre 1954 et 1990. Une analyse de l'âge des rondelles récoltées à la souche a permis de constater que les tiges mortes en 1990 n'ont pas connu une période initiale d'oppression plus longue que celles ayant survécu. La mortalité des tiges ne semble donc aucunement liée à l'âge biologique des tiges.

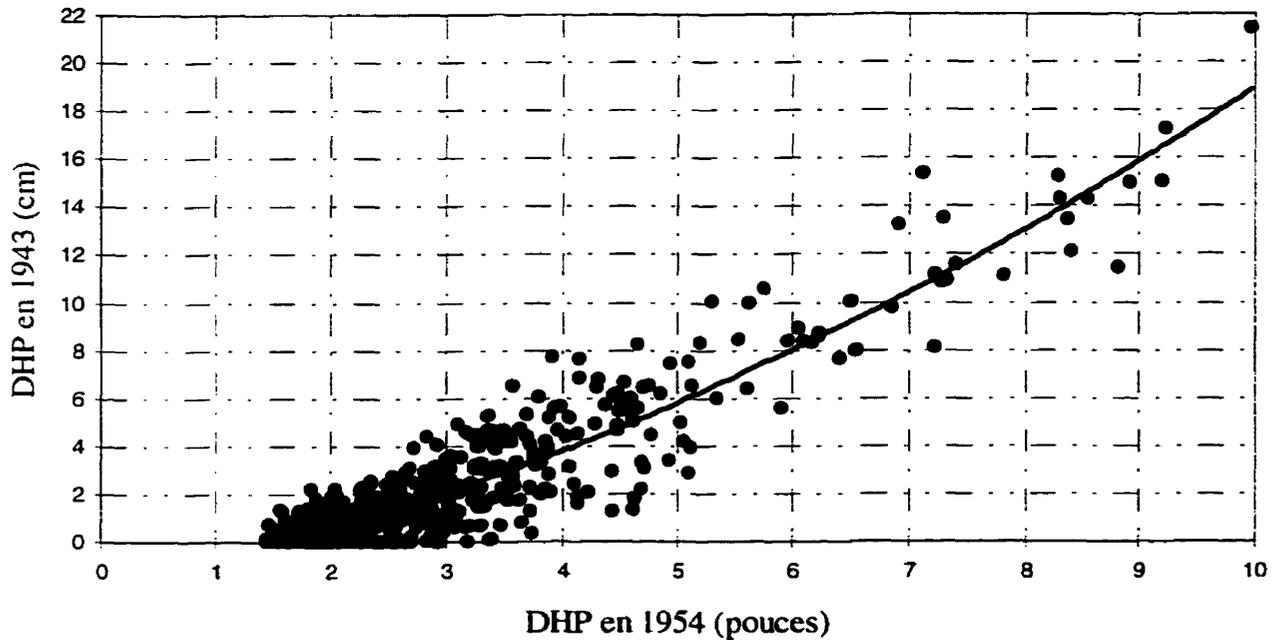


Figure 26. Relation entre le DHP avec écorce en 1954 et celui lors de la coupe.

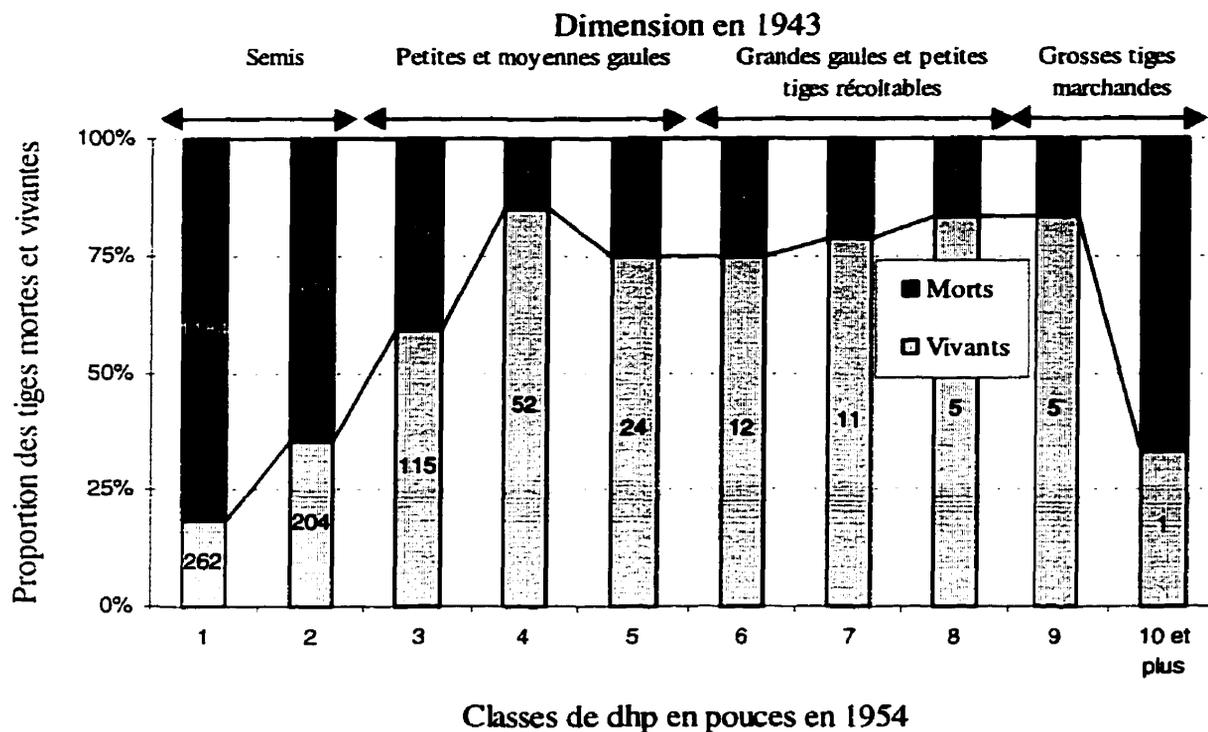


Figure 27. Survie des tiges résineuses de 1954 à 1990 en fonction de leur dimension 11 ans après la coupe.

Le nombre de tiges incluses dans chacune des classes est inscrit dans les bandes respectives.

5.3.3. Dimension des tiges en 1990

La figure 28 montre que plus les tiges sont grandes lors de la coupe, plus elles formeront des tiges de dimensions intéressantes. Ainsi, pratiquement toutes les tiges possédant un DHP lors de la coupe et qui étaient vivantes en 1990, ont obtenu des dimensions marchandes moins de cinquante ans après la coupe. La proportion de tiges de dimension sciage augmente rapidement en fonction de la dimension initiale de la régénération préétablie passant de 30% chez les semis à 100% chez les grandes gaules. La presque totalité des tiges récoltables lors de la coupe qui ont été protégées et qui ont survécu, ont atteint des dimensions supérieures à 25 cm de DHP. Malgré leur dimension inférieure lors de la coupe, la majorité des semis ayant survécu ont obtenu des dimensions marchandes. Les semis de plus de 50 cm de hauteur se démarquent des plus petits semis avec plus de la moitié des tiges ayant obtenu des diamètres supérieurs à 14 cm de DHP.

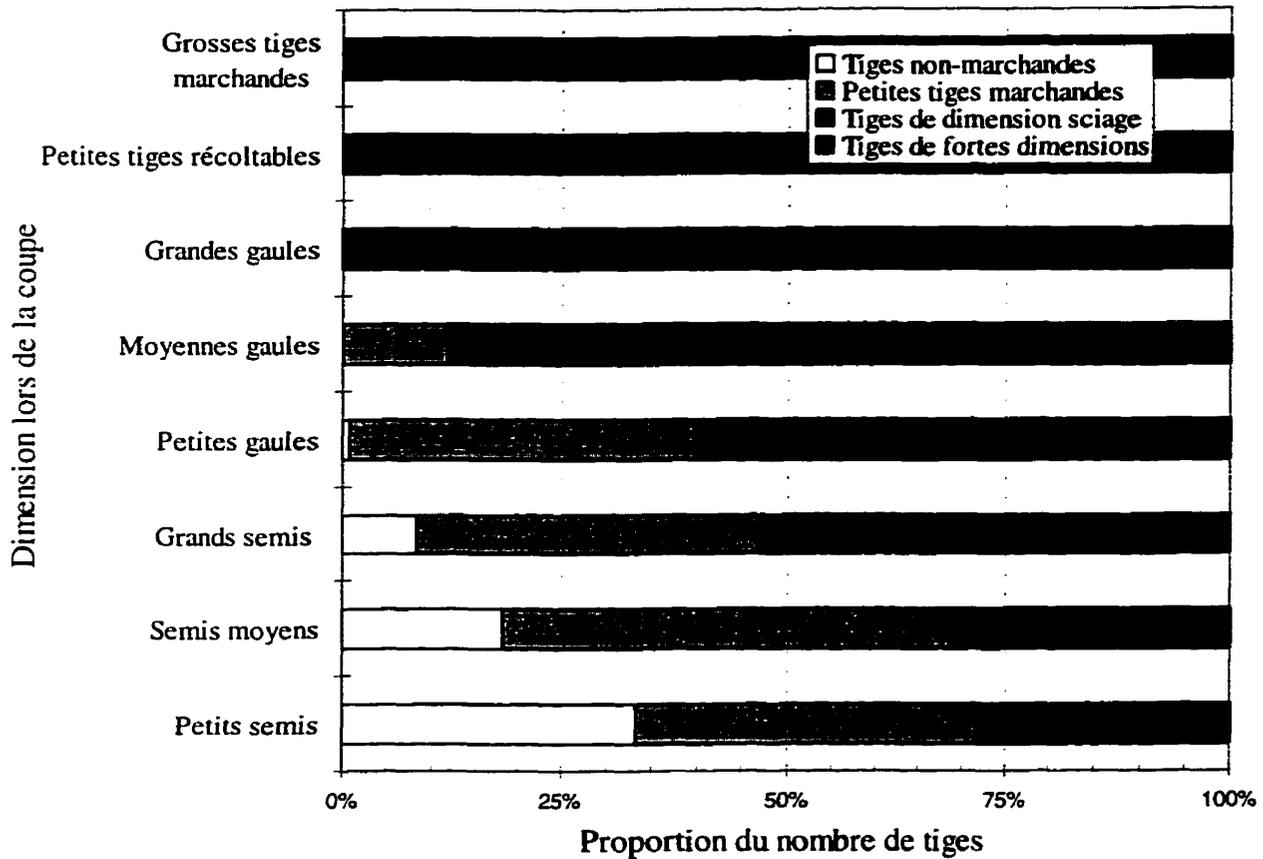


Figure 28. Répartition des tiges vivantes résineuses selon les dimensions atteintes en 1990.

En moyenne, la dimension des tiges marchandes 47 ans après la coupe est directement proportionnelle à la dimension initiale de la régénération (figure 29). Ainsi, les tiges marchandes récoltables lors de la coupe sont bien supérieures aux gaules et aux semis. Il ne suffit que de deux tiges de ce type pour obtenir un m³ marchand. Quant aux semis de moins de 50 cm de hauteur lors de la coupe, il en faut presque 14 pour récolter le même volume. Les gaules se sont bien développées avec des volumes marchands de 100 à 300 dm³/tige.

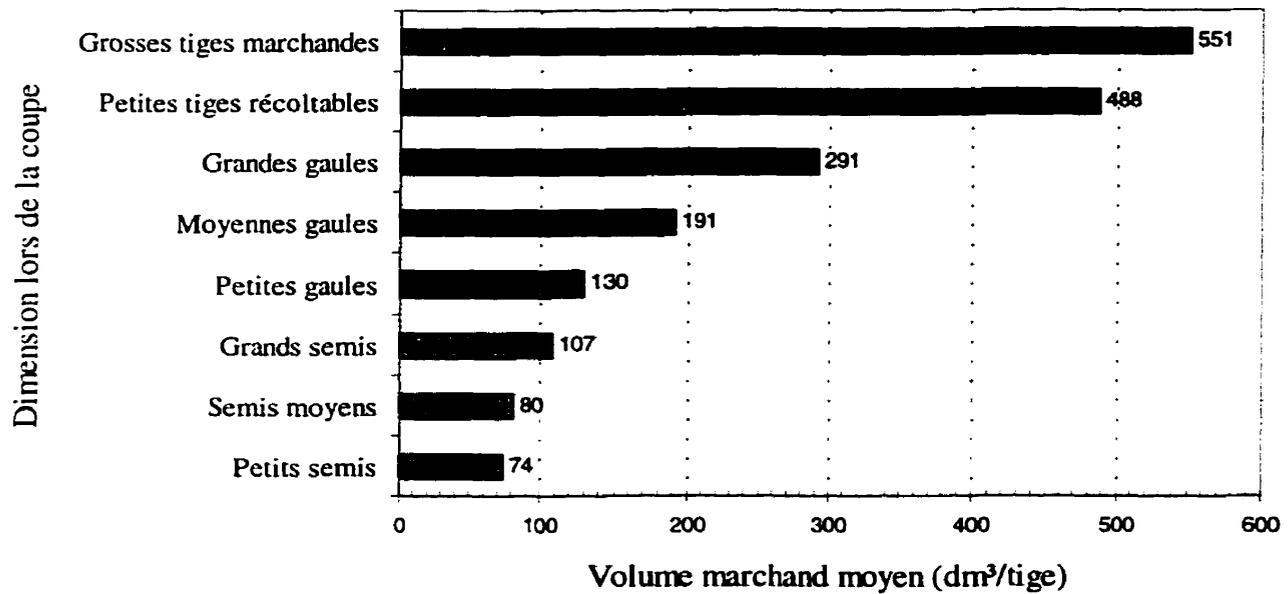


Figure 29. Volume marchand moyen des tiges marchandes vivantes en 1990.

5.3.4. Contribution de la régénération préétablie au peuplement

L'effet de la dimension moyenne de la haute régénération préétablie se fait d'ailleurs sentir au niveau de leur contribution au volume marchand du peuplement (figure 30). Ainsi, malgré leur faible proportion quant au nombre de tiges marchandes présentes 47 ans après coupe (près de 30%), les tiges qui possédaient un DHP lors de la coupe représentent la moitié du volume marchand du peuplement. Toutefois, il ne faut pas négliger la part des semis, tout particulièrement ceux de plus de 50 cm de hauteur qui ont permis de récolter un peu plus de 25% du volume marchand. La contribution des petites gaules et des grands semis est semblable tant au niveau du nombre de tiges marchandes que du volume marchand du peuplement. Quant aux tiges de plus de 3 m, leur part du volume marchand est plus que le double de leur proportion du nombre de tiges marchandes.

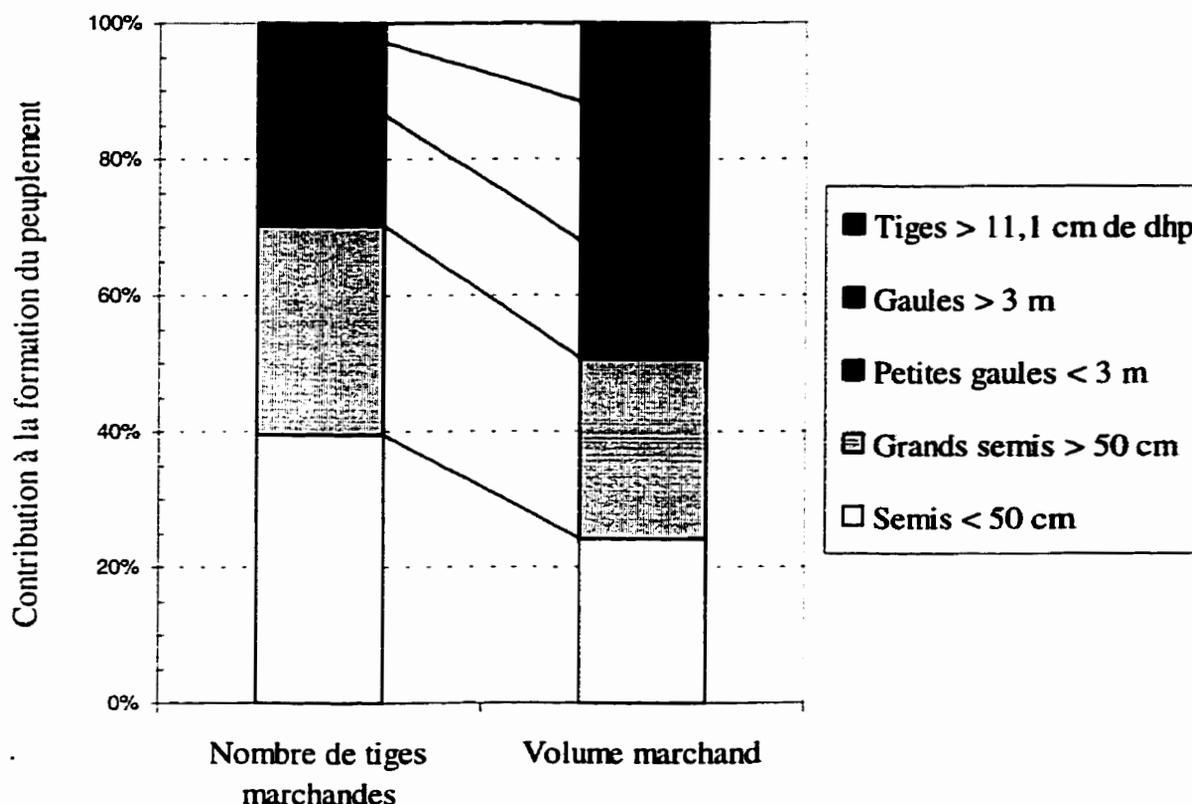


Figure 30. Parts du nombre de tiges marchandes et du volume marchand du peuplement occupées en 1990 par les différentes classes de régénération.

5.4. Discussion

5.4.1. Mortalité et dimension de la régénération

Quelques études ont porté sur la survie de la régénération préétablie à l'intérieur des 6 premières années après la coupe (Tesch et al. 1993, Ruel et al. 1995, Mård 1997, Ruel et Doucet 1998). Toutefois, aucune étude ne fait état de la survie de ces tiges à plus long terme. Par ailleurs il y a peu de documentation disponible au sujet du comportement des petites tiges marchandes après une coupe sévère du couvert. Notons à ce sujet, que Hatcher (1960) a observé, dans des coupes réalisées dans le parc des Laurentides, que plusieurs tiges marchandes avaient tombé après la coupe

et que les survivants étaient de piètre qualité. Leur nombre a fortement diminué dans les sept premières années après la coupe à cause des vents. Malheureusement, les taux de mortalité et les dimensions atteintes ne sont pas documentées.

Dans la présente étude, les données disponibles ne permettaient pas de faire une analyse de la survie durant la période la plus critique, soit les onze premières années après la coupe. Les résultats permettent toutefois d'affirmer que les tiges protégées, qui ont survécu aux 11 premières années après la coupe, possèdent de très bonnes capacités de survie à long terme. Ainsi les grandes gaules et les tiges récoltables lors de la coupe (8 pouces et moins de diamètre en 1954) n'apparaissent pas plus affectées par la mortalité que les plus petites gaules entre la 11^{ème} et la 47^{ème} année après la coupe. Plus spécifiquement, il semble que la position privilégiée des tiges de plus de 3 m lors de la coupe leur a fourni un avantage comparativement aux semis. La haute régénération préétablie, avec des taux de survie de 75% et plus, affiche donc une vigueur appréciable et ce, malgré un âge biologique élevé et après avoir subi deux épidémies de tordeuse. À l'opposé, le taux de mortalité atteint plus de 50% chez les semis, de moins de 3 pouces (8 cm) de diamètre en 1954. La position inférieure des semis dans le peuplement a probablement diminué leur chance de survie lors de la dernière épidémie de tordeuse des bourgeons de l'épinette. Ainsi, il est reconnu que les plus petites tiges ont des taux de mortalité plus élevés suite aux défoliations (Blais 1958, 1983, Thibault et al. 1995). Les semis sont plus vulnérables à cause de la compétition induite par les tiges de dimension supérieure qui contribuent à diminuer leur vigueur. Le taux de survie semble donc être essentiellement tributaire de la position des tiges dans le peuplement et aucunement lié à l'âge biologique. Dans la mesure où la régénération préétablie de grande taille s'adapte bien à l'ouverture du couvert, les risques de pertes de matière ligneuse associées à des taux de mortalité élevés après 11 ans inspirent relativement peu d'inquiétudes.

Malheureusement il n'est pas possible de séparer les mortalités causées par les défoliations de celles causées par la compétition et le chablis. Cependant, les inventaires de 1964 et 1978 dénotent de faibles taux de mortalité en jeune âge du peuplement. La première période épidémique des années '50 n'a pas causé de mortalité dans le dispositif. Ainsi, la majorité des tiges sont mortes entre 1978 et 1990, lors de la dernière épidémie. Tout indique que les gaules et les tiges récoltables,

malgré des âges souvent supérieurs à 60 ans lors du passage de la dernière épidémie sont capables de résister aux défoliations d'une manière remarquable. Si ces défoliations n'avaient pas eu lieu, les mortalités auraient été encore plus marginales car il ne semble pas y avoir de tige de la strate supérieure qui ait été tuée par les phénomènes de sénescence et de chablis. Il est possible que la structure irrégulière des peuplements ait favorisé une bonne vigueur des arbres par la présence de cimes bien développées. Toutefois, le faible taux de survie des semis montre que l'ouverture du couvert serait nécessaire pour permettre à ces jeunes tiges de former le futur peuplement. La faible mortalité des plus grosses tiges démontre que les tiges n'ont pas encore dépassé leur dimension maximale malgré leurs diamètre et âge élevés.

5.4.2. Dimension des tiges

À la lumière des résultats, il appert que plus la tige est haute lors de la coupe, plus elle a de chance d'atteindre des dimensions intéressantes 47 ans après coupe. Ainsi, tout comme Paquin et Doucet (1992a), la totalité des tiges de plus de 3 m qui ont survécu ont atteint des dimensions marchandes lors de l'échantillonnage. Ces auteurs ont aussi observé qu'entre 30 et 75% des épinettes préétablies de moins de 1,5 m lors de la coupe ont obtenu des dimensions marchandes. Dans la présente étude, malgré leur retard, plus de 65% des semis (essentiellement des sapins baumiers) ont atteint des dimensions marchandes mais pour la plupart inférieures à 14 cm de DHP.

Dans un contexte de production de bois de sciage, il semble particulièrement intéressant de préserver la haute régénération préétablie et les tiges récoltables. Ainsi un peu plus de 50% de l'effectif des grands semis (plus de 50 cm de hauteur lors de la coupe) qui ont survécu, ont réussi à produire des billes de dimensions fort intéressantes pour la transformation (plus de 14 cm de DHP). Cette proportion augmente à 100% chez les tiges de plus de 5 m lors de la coupe. Les tiges de fortes dimensions (25 cm et plus de DHP en 1990) ont d'ailleurs été observées principalement chez les tiges de plus de 5 m lors de la coupe.

L'étude du volume moyen par tige démontre qu'il y a un avantage marqué à conserver des tiges récoltables lors de la coupe. Ainsi, 47 ans après la coupe, il faut entre 10 et 14 semis pour

obtenir 1 m³ de bois marchand comparativement à seulement 2 tiges récoltables lors de la coupe. Les grandes gaules ont eux aussi atteint de très bonnes dimensions avec 300 dm³/tige. Paquin et Doucet (1992a) ont observé des tendances semblables chez l'épinette noire.

5.4.3. Contribution de la régénération préétablie au volume du peuplement

Les tiges résineuses de plus de 3 m lors de la coupe formaient le tiers du volume marchand du peuplement en 1990, comparativement à seulement 13,5% du nombre de tiges marchandes. Une tendance similaire a été observée par Paquin et Doucet (1992a) chez l'épinette noire où les tiges de plus de 3 m au moment de la coupe, qui ne représentaient que 34% des tiges marchandes, ont contribué à presque la moitié du volume marchand du peuplement, 59 ans après coupe.

Comparativement à leur nombre, les semis de moins de 50 cm de hauteur contribuent le moins au volume marchand. Quant aux grands semis (plus de 50 cm), leur rôle dans la constitution du peuplement est non négligeable car ils forment plus de 25% des tiges marchandes et du volume marchand. Ainsi, dans un contexte où le nombre de gaules n'est pas suffisant, les grands semis peuvent jouer un rôle important en comblant les trouées. Les quelques tiges marchandes de 12 cm et plus de DHP (à peine 50 tiges à l'hectare) ont aussi contribué substantiellement au volume du peuplement 47 ans après la coupe.

Enfin, les résultats de ce chapitre permettent d'affirmer que les tiges étudiées au chapitre 2 et 3, quoiqu'elles aient été sélectionnées dans le couvert codominant et dominant, ne sont pas des exceptions. La plupart des tiges préétablies, qui étaient vivantes 11 ans après la coupe, ont bien survécu et se sont développées avantageusement comparativement aux tiges plus jeunes. Leur présence dans le peuplement contribue à produire des volumes marchands appréciables.

CHAPITRE 6. IMPACT DE LA RÉGÉNÉRATION PRÉÉTABLIE SUR LA PRODUCTIVITÉ

6.1. Introduction

L'amélioration des connaissances quant au rendement réel des sites forestiers est identifiée comme l'un des champs de recherche à privilégier (Anonyme 1989, CRFQ 1992). À ce titre, un effort de recherche considérable doit être consenti pour affiner la précision des modèles de croissance. Mais au-delà des modèles de croissance, la connaissance du rôle de la régénération préétablie sur la productivité, de même que la détermination précise de l'âge demeurent des questions fondamentales auxquelles il faut répondre pour estimer et prévoir l'évolution de la production d'un peuplement.

La coupe avec protection de la régénération peut être à l'origine de peuplements où l'on retrouve une quantité importante de régénération préétablie de différentes tailles. Dans ces circonstances, la détermination de l'âge des sapinières devient une tâche difficile. En effet, l'âge biologique des tiges opprimées constitue un mauvais estimateur de l'âge effectif du peuplement, qu'il surestime. Il en résulte une estimation pratiquement impossible de la production selon l'âge chronologique (Zarnovican 1981). Pour pallier à ce problème, Morris (1948) propose la notion d' « âge depuis la coupe » pour définir un âge en relation plus étroite avec le développement physiologique du sapin. Il appert cependant que, ne tenir compte que de l'âge depuis la coupe, sans égard au niveau de développement de la régénération, peut occasionner une surestimation de l'évolution future de la production. D'ailleurs Bertrand et al. (1992) soulignent la nécessité de tenir compte de la dimension de la régénération pour mieux estimer la production.

Paquin et Doucet (1992a) et Pothier et al. (1995) rapportent que la présence de marcottes permettrait d'améliorer la productivité des pessières noires. Les sapinières en régénération comportant une certaine proportion de gaules peuvent, dans une certaine mesure, s'apparenter aux

peSSIères noires issues de marcottes. Il y a donc un intérêt manifeste à vérifier si la présence de haute régénération de sapin baumier permet, elle aussi, d'améliorer la productivité forestière. Cette hypothèse apparaît des plus plausibles et a été soulevée par Bertrand et al. (1992) et Tremblay et al. (1997) qui rapportent une productivité supérieure pour les peuplements possédant une forte surface terrière initiale, c'est-à-dire ceux ayant vraisemblablement, au moment de la coupe, une forte proportion de gaules. L'importance de ce gain n'est cependant pas encore documentée chez le sapin baumier.

Dans les peSSIères noires, Pothier et al. (1995) ont calculé des gains équivalents de 3 m sur l'indice de fertilité pour une hauteur moyenne de 3 m au moment de la coupe. Morin et Gagnon (1992) indiquent que les peSSIères issues de hautes marcottes produisent des volumes marchands plus rapidement que les peuplements issus de feu. Archibald et Arnup (1993) ont émis l'hypothèse que le gain potentiel correspond au temps nécessaire à un peuplement issu d'une coupe totale pour atteindre la hauteur de la régénération préétablie protégée lors de la coupe. Ainsi, ces auteurs évaluent, pour des peSSIères de l'Ontario, que la protection de régénération entre 2 et 2,5 m de hauteur pourrait réduire de 20 et 30 ans la révolution pour les classes de fertilité 2 et 3 de Plonski (1981) respectivement.

Les objectifs de ce chapitre sont de décrire l'état des placettes au moment de la coupe, d'évaluer les gains de productivité et d'estimer l'âge des sapinières issues de haute régénération préétablie.

6.2. Matériel et méthode

6.2.1. Dimension de la régénération préétablie lors de la coupe

Pothier et al. (1995) ont utilisé un indice de hauteur de la régénération lors de la coupe pour modéliser la production en volume marchand. Ainsi, lorsqu'elle est disponible, la hauteur semble la variable la plus intéressante pour qualifier un peuplement. Les rondelles récoltées à

1,3 m du sol et les relations hauteur-diamètre calculées à partir des analyses de tiges, ont donc été utilisées afin d'évaluer la hauteur de chacune des tiges présentes lors de la coupe. Malheureusement, seules les tiges encore analysables (vivantes ou mortes) au moment de la récolte des données ont été utilisées. On ne possède donc pas d'information sur les tiges qui sont mortes avant 1980 ou qui étaient dans un état de décomposition trop avancé lors de l'échantillonnage. En général, la plupart des tiges qui ont survécu jusqu'en 1985 ont été analysées.

Pour obtenir une image juste de l'état des placettes lors de la coupe, un indice de hauteur de la régénération a été calculé. Cet indice (H_{1000}) porte sur la hauteur moyenne des 1 000 plus grandes tiges à l'hectare (40 par placette) au moment de la coupe. Ainsi plutôt que de prendre la hauteur moyenne de toutes les tiges, il est plus à propos de ne considérer que les individus ayant le plus de chance de survivre et de représenter la part la plus importante du volume marchand du peuplement à la fin de la révolution.

Afin de bien caractériser les placettes ayant une quantité anormalement faible de tiges préétablies, on considère la hauteur des semis postétablis comme étant 0 dans la moyenne des 1 000 tiges. Donc, si on n'a que 500 tiges, ayant en moyenne 2 m de hauteur, l'indice de hauteur obtenu sera d'un mètre. Un indice de diamètre avec écorce à hauteur de poitrine au moment de la coupe a aussi été calculé. Celui-ci correspond au diamètre moyen quadratique des 1 000 plus grosses tiges à l'hectare (Dq_{1000}).

6.2.2. Modélisation du volume

Afin d'évaluer la production en volume marchand brut et de quantifier l'impact de la régénération, les données d'inventaire de 11, 20, 35 et 47 ans après coupe ont été utilisées. La modélisation de la croissance du volume à l'hectare a été réalisée à partir de la dérivée première de l'équation de Chapman-Richards (Richard 1959). Étant donné que le volume d'un peuplement décroît dans la période de sénescence, il importe que le modèle puisse suivre cette tendance. La dérivée étant une fonction d'accroissement, le modèle s'ajuste très bien à l'allure des données.

Afin de tenir compte des variations dans la fertilité des placettes, l'indice de qualité de station a été introduit dans le modèle. Après plusieurs essais, le modèle suivant s'ajustait le mieux aux données:

$$[13] \quad V_m = b_1 \text{ IQS} \exp (b_2 A) [1 - \exp (b_2 A)]^{b_3}$$

V_m = Volume marchand brut (m³/ha)

A = Âge depuis la coupe

IQS= indice de qualité de station (m à 50 ans à hauteur de poitrine)

b_1, b_2, b_3 = coefficients

Ce modèle semble meilleur que les modèles d'équation polynomiale qui sont considérés comme dépourvus de logique biologique (Zeide 1993). Notons que l'étendue des indices de qualité de station étant plutôt faible et dû au faible nombre de placettes analysées, la qualité de station n'a été insérée qu'avec le coefficient b_1 . Toutefois en théorie, cette variable devrait aussi multiplier le coefficient b_2 ou b_3 pour obtenir des âges d'exploitabilité différents. Dans notre cas, cet ajout au modèle n'était pas significatif.

Deux méthodes ont été utilisées pour modéliser la production du volume marchand en fonction de l'âge depuis la coupe. La procédure consiste essentiellement en une translation latérale des courbes de production, comme le proposent Archibald et Arnup (1993). Ainsi, des courbes de production ont été générées en considérant que l'effet de la régénération préétablie se traduit essentiellement par un changement dans l'âge d'exploitabilité après coupe.

Le premier modèle calcule une translation latérale des courbes de production à partir de variables binaires associées à chacune des placettes. Ainsi, à partir du modèle de base (équation 13), un ajustement de l'âge (équation 14) est réalisé pour chacune des placettes de la même manière qu'utilisée au chapitre 3 pour éliminer les périodes affectées par les défoliations. La placette 6, composée presque uniquement de semis de petite dimension lors de la coupe, a servi de base dans la comparaison des placettes. Elle ne possède donc pas de variable binaire. Les treize autres placettes ont chacun un coefficient (c_n), calculé par la régression non-linéaire. Les coefficients produits représentent le nombre d'années de gain sur la production

comparativement à la placette 6. Une analyse a porté sur les variables affectant la valeur de ces coefficients.

$$[14] \quad A = AN + X_1c_1 + X_2c_2 + X_3c_3 + \dots + X_{16}c_{16}$$

AN = nombre d'années après la coupe;

X_n = variable binaire égale à 1 pour la placette 'n' (sinon 0);

c_n = coefficients de la régression pour la placette 'n'.

Le deuxième modèle utilise la hauteur moyenne des tiges au moment de la coupe afin d'évaluer l'effet de la dimension de la régénération sur l'importance de la translation de la courbe de production. Ainsi pour créer cet effet, on procède à l'addition, sur la variable 'A', d'une composante où l'indice de hauteur (H_{1000} en m) est représenté (équation 15). Avec ce type de modèle on considère donc que l'effet de la régénération se produit essentiellement sur l'âge d'exploitabilité.

$$[15] \quad A = AN + a_1 H_{1000}$$

a_1 = coefficient de la régression

Le calcul des coefficients a été effectué à partir de la procédure NLIN (SAS Institute Inc. 1988). Le choix des valeurs générées a été déterminé en favorisant les résultats minimisant la somme des carrés des erreurs et en s'assurant de l'homogénéité des résidus.

6.3. Résultats

6.3.1. Description des placettes lors de la coupe

Afin de présenter une image de chacune des placettes lors de la coupe, une description du nombre de tiges à l'hectare, des surfaces terrières initiales et des indices de dimension est présentée au tableau 10. Sur la base de la proportion des tiges par classe de régénération et de la diversité dans la dimension initiale des tiges, on peut diviser les placettes en cinq grandes catégories. Ainsi les placettes de semis n'avaient peu ou pas de tiges possédant un DHP lors de la

coupe. Leur indice de hauteur variait selon l'abondance de semis préétablis de bonne taille. La densité initiale de la régénération était supérieure à 2 000 tiges à l'hectare. Les placettes contenant une proportion de haute régénération inférieure à 10% des tiges, possédaient des indices un peu plus hauts à cause de la présence de quelques gaules de forte dimension (100 à 325 tiges / ha). Elles sont appuyées par un nombre suffisant de semis pour porter la densité à plus de 2 000 tiges à l'hectare. Les deux placettes de gaules étaient, quant à elles, assez denses en gaules et en grands semis, laissant peu de place aux petits semis pour se développer. Le quatrième groupe a la particularité de contenir une diversité de dimension initiale (jusqu'aux tiges marchandes) mais la grande majorité des tiges provient de semis lors de la coupe. Le diamètre moyen quadratique des 1 000 plus grosses tiges révèle la présence non-négligeable de haute régénération préétablie car il est supérieur à 4 cm. Le dernier groupe est fortement constitué de haute régénération avec une forte diversité de dimension initiale, passant de grands semis aux grosses tiges marchandes. Ce groupe possède l'indice de hauteur le plus élevé.

6.3.2. Statistiques 47 ans après coupe

En 1990, les tiges marchandes provenant des placettes de semis ont, en moyenne, entre 45 et 55 ans à la souche (tableau 10). On retrouve des variations assez marquées entre les trois placettes de semis au niveau des volumes marchands à l'hectare et des dimensions moyennes des tiges obtenues 47 ans après la coupe. Ces différences s'expliquent principalement par les qualités de station et les densités qui sont assez variables dans ce groupe. Les quatre placettes composées d'une faible proportion de haute régénération ont des volumes marchands entre 130 et 215 m³/ha. Dans ce groupe, la placette 14 se démarque avec un diamètre moyen de 18 cm et une densité inférieure à 1 500 tiges marchandes à l'hectare. Les deux placettes composées d'une forte proportion de gaules sont caractérisées par des âges moyens autour de 67 ans. Les densités sont supérieures à 2 000 tiges marchandes à l'hectare. La placette 2 est l'une des plus volumineuses avec un peu plus de 280 m³/ha. En général, les placettes composées d'au moins 10% de haute régénération produisent des tiges plus volumineuses. Ainsi, il faut moins de 10 tiges marchandes pour former un mètre cube marchand. Les placettes composées d'une forte proportion de haute régénération comportant une diversité de dimension initiale ont produit les tiges les plus

volumineuses avec, en moyenne, 5 tiges par m³ pour un diamètre moyen de 20 cm. L'âge moyen des tiges marchandes de ce groupe est élevé pour une sapinière, soit plus de 70 ans. En moyenne, les placettes étudiées présentaient des qualités de station d'environ 15 m à 50 ans à hauteur de poitrine.

Tableau 9. Description des placettes après la coupe selon les rondelles récoltées.

Numéro de placette	Semis < 50 cm	Grands semis	Gaules	Tiges récolt.	Surface terrière totale (m ² /ha)	Surface terrière march. (m ² /ha)	H ₁₀₀₀ (m)	Dq ₁₀₀₀ (cm)
	Nombre à l'hectare							
Placettes composées de semis seulement								
6	2842	297	0	0	0,00	0,00	0,1	0
9	2125	4275	0	0	0,00	0,00	0,9	0
5	544	1927	25	0	0,02	0,00	0,8	0,5
Placettes composées de semis et une faible proportion de haute régénération (moins de 10% des tiges)								
10	1680	2125	124	0	0,28	0,00	1,3	1,9
7	2100	717	99	0	0,33	0,17	0,8	2,0
15	1359	1631	321	0	0,85	0,18	1,9	3,3
14	593	1433	148	49	0,73	0,67	1,5	3,1
Placettes composées d'une forte proportion de gaules								
2	0	988	1063	0	0,64	0,00	2,4	2,8
16	0	1903	2249	0	0,94	0,00	2,5	2,9
Placettes composées de semis et une proportion entre 10 et 20% de haute régénération et avec une diversité de dimension initiale								
11	346	1878	222	74	1,34	1,25	2,0	4,2
4	1013	222	74	74	1,45	1,39	1,3	4,3
12	1656	544	272	99	3,40	2,72	3,1	6,6
Placettes composées d'une forte proportion de haute régénération et avec une diversité de dimension initiale								
3	148	445	568	49	2,37	1,19	3,5	5,5
1	0	371	1038	173	5,49	3,58	5,5	8,3

Tableau 10. Description des placettes en 1990.

Numéro de placette	Nb de tiges marchandes à l'hectare	Volume marchand (m ² /ha)	Diamètre moyen quadratique (cm)	Nb de tiges marchandes par m ³	Âge moyen des tiges march. ⁴	IQS ⁵ (m)
Placettes composées de semis seulement						
6	2199	172,7	14,2	12,7	45	15,3
9	2817	119,0	11,8	23,7	51	12,6
5	1804	196,2	15,9	9,2	55	14,7
Placettes composées de semis et une faible proportion de haute régénération (moins de 10% des tiges)						
10	2595	170,0	13,3	15,3	57	13,1
7	1952	133,1	13,7	14,7	49	13,7
15	2496	210,2	14,6	11,9	55	15,4
14	1384	205,8	17,9	6,7	56	15,0
Placettes composées d'une forte proportion de gaules						
2	2002	284,0	17,1	7,0	68	15,9
16	2743	167,4	12,8	16,4	66	13,5
Placettes composées de semis, une proportion entre 10 et 20% de haute régénération et avec une diversité de dimension initiale						
11	2718	326,0	16,0	8,3	61	15,3
4	840	128,8	17,8	6,5	47	15,8
12	1754	236,6	16,9	7,4	54	15,1
Placettes composées d'une forte proportion de haute régénération et avec une diversité de dimension initiale						
3	964	215,8	20,6	4,5	77	16,4
1	1384	270,1	19,5	5,1	75	16,2

⁴ Obtenu à partir des rondelles de souche (20 cm du sol) dont on possède tous les cernes (pas affectées par la carie).

⁵ Indice de qualité de station qui représente la hauteur à 50 ans à 1,3 m du sol.

6.3.3. Modélisation du volume marchand

6.3.3.1. *Modèle à partir de variables binaires par placette*

La modélisation du volume marchand brut, à partir de variables binaires par placette, a donné une régression possédant un coefficient de détermination ajusté élevé (96,3%) et une erreur-type de l'estimé d'un peu moins de 20 m³/ha (annexe F). Les résultats présentés au tableau 11 montrent que les placettes 4, 6, 7 et 9 présentent les plus faibles productions en volume ($c_n \leq 0$). À part la placette 9, qui a probablement souffert d'une densité trop élevée, elles avaient les plus faibles densités de tiges supérieures à 50 cm de hauteur, soit moins de 900 tiges à l'hectare. Les gains sur l'âge sont positifs dans le reste des placettes étudiées, passant de 3,3 à 16,6 ans.

En général, les effets sont significatifs au seuil $\alpha=5\%$ dans les placettes dont l'indice de hauteur était supérieur ou égal à 1,5 m et dont la densité des tiges de plus de 50 cm de hauteur se situait entre 900 et 2 200 tiges à l'hectare. La comparaison par rapport à la placette 6 montre assez bien l'effet de la haute régénération car l'âge à la souche de cette placette indique que les semis ont atteint, en moyenne, 20 cm de hauteur deux ans après la coupe (tableau 10). Donc, les semis étaient préétablis mais de très faible hauteur, comme une coupe totale avec protection du sol dans une sapinière bien régénérée.

La figure 31 montre que le gain en temps est directement proportionnel à l'indice de hauteur au moment de la coupe. Cette relation est d'ailleurs hautement significative ($P > F=0,0038$). Comparativement à l'indice de diamètre et à la surface terrière totale initiale, cette variable est celle qui explique le mieux le gain en temps.

Tableau 11. Évaluation du gain sur l'âge en fonction des placettes.

Numéro de placette	Gain sur l'âge (c_n)	Indice de hauteur (H_{1000} en m)	Nb de tiges plus hautes que 50 cm en 1943
Placettes composées de semis seulement			
6	0	0,1	297
9	- 3,2 *	0,9	4275
5	+ 7,2	0,8	1952
Placettes composées de semis et une faible proportion de haute régénération (moins de 10% des tiges)			
10	+ 3,3 *	1,3	2249
7	- 1,0 *	0,8	816
15	+ 5,5	1,9	1952
14	+ 7,6	1,5	1630
Placettes composées d'une forte proportion de gaules			
2	+14,4	2,4	2051
16	+ 5,6 *	2,5	4152
Placettes composées de semis, une proportion entre 10 et 20% de haute régénération et avec une diversité de dimension initiale			
11	+15,8	2,0	2174
4	- 2,5 *	1,3	370
12	+10,5	3,1	915
Placettes composées d'une forte proportion de haute régénération et avec une diversité de dimension initiale			
3	+ 9,0	3,5	1062
1	+16,6	5,5	1582

* Coefficient non significatif au seuil $\alpha=5\%$ (voir annexe F).

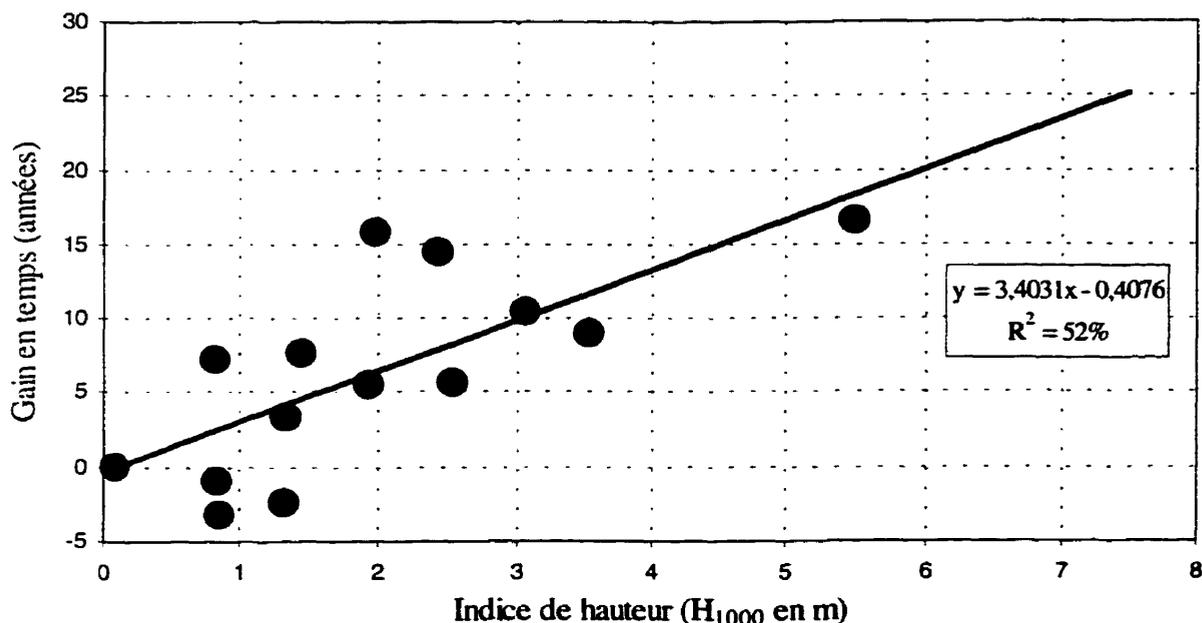


Figure 31. Relation entre le gain en temps et la hauteur moyenne au moment de la coupe (obtenue à partir du modèle avec variables binaires).

6.3.3.2. Modèle avec l'indice de hauteur

La modélisation du volume marchand à l'hectare à partir de l'indice de hauteur, du nombre d'années depuis la coupe et l'indice de qualité de station a donné l'équation suivante:

$$[16] \quad V_m = 289,422 \text{ IQS} \exp(-0,02823 (\text{AN} + 3,40412 H_{1000})) \\ (1 - \exp(-0,02823 (\text{AN} + 3,40412 H_{1000})))^{6,06742}$$

La proportion de la variation expliquée par cette équation est élevée (Pseudo- $R^2 = 89,4\%$) et l'erreur-type de l'estimé est de 29,4 m³/ha (annexe G). L'importance de la translation latérale en fonction de l'indice de hauteur est semblable à celle obtenue avec le modèle par placette. Ainsi, la figure 32 indique que la translation est de 10 ans pour un indice de hauteur de 3 m et elle est de 20 ans à 6 m. La protection de la régénération préétablie permettrait de sauver 3,4 années pour chaque mètre d'indice de hauteur.

L'âge d'exploitabilité absolu est de 55 ans pour un indice de hauteur de 0 m lors de la coupe. Pour un IQS égal à 15 m à 50 ans, le volume à récolter à ce moment est de 217 m³/ha. L'âge d'exploitabilité serait respectivement de 52, 45 et 35 années après la coupe pour des indices de hauteur de 1, 3 et 6 m. La productivité d'une CPRS protégeant la régénération préétablie d'une hauteur moyenne de 1 et 3 m serait donc respectivement de 4,2 m³/ha/an (217 m³/ha / 52 ans) et 4,8 m³/ha/an (217 m³/ha / 45 ans), comparativement à 3,9 m³/ha/an (217 m³/ha / 55 ans) sur un parterre de coupe sans protection de la haute régénération. En considérant qu'un parterre de coupe avec un indice de hauteur de 6 m possède environ 16 m³/ha de bois marchand non-récolté, la productivité du peuplement serait de 5,7 m³/ha/an ([217-16] m³/ha/ 35 ans).

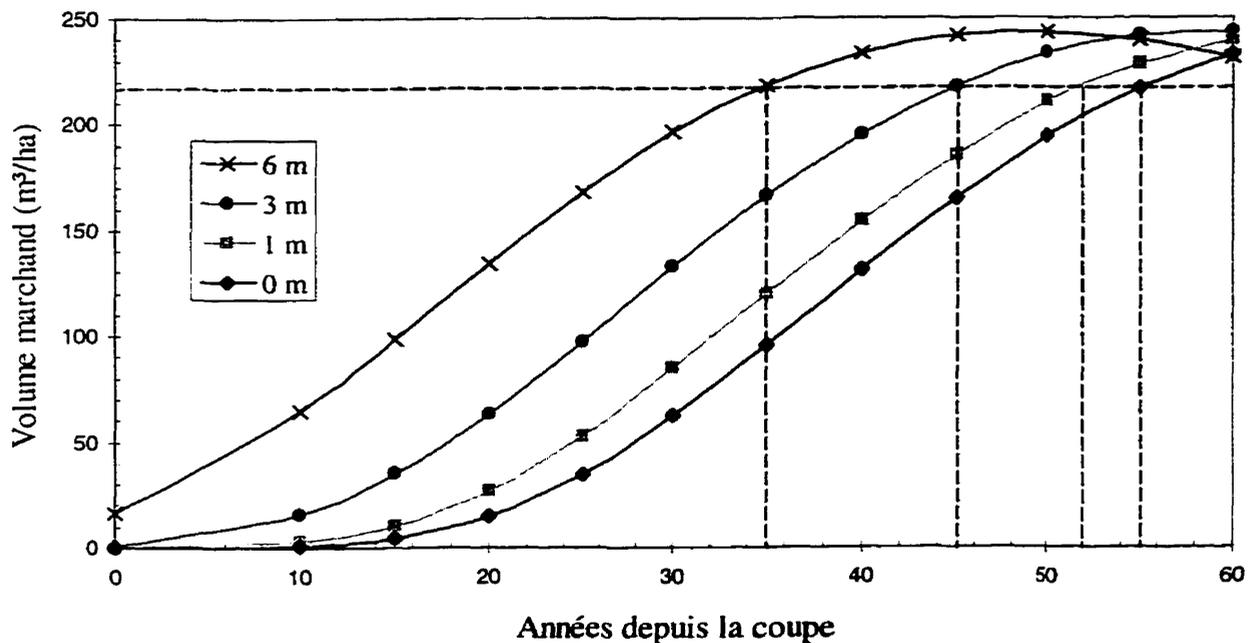


Figure 32. Courbes de production pour un indice de qualité de station de 15 m à 50 ans.

Les lignes pointillées représentent les âges d'exploitabilité absolus.

6.4. Discussion

6.4.1. Grandeurs dendrométriques 47 ans après coupe

Dans toutes les placettes, des volumes supérieurs à 100 m³/ha ont été observés. Plusieurs placettes composées de haute régénération ont cumulé des volumes marchands supérieurs à 200 m³/ha. À part la placette # 4, qui semble avoir eu un problème de densité trop faible, celles qui présentaient une diversité de dimension initiale au moment de la coupe semblent avoir produit les volumes les plus élevés. Ceci tend à démontrer que la protection de la haute régénération pourrait permettre d'obtenir de plus forts volumes.

Selon Frisque et al. (1978), le nombre de tiges par m³ pour obtenir des rendements acceptables est entre 4 et 11 selon la technique de récolte. Ces valeurs ont été obtenues dans la plupart des placettes contenant une proportion de 10% et plus de haute régénération lors de la coupe. Quant aux placettes comportant une forte proportion de semis, les tiges marchandes produites 47 ans après la coupe sont de faibles dimensions avec plus de 11 tiges par m³, sauf pour la placette # 5 qui s'est développée sous une densité optimale.

6.4.2. Gains sur l'âge de révolution

Les tiges possédant déjà une certaine hauteur après la coupe, le peuplement ainsi constitué a un avantage certain comparativement à un parterre de coupe régénéré que par des semis de faible dimension. Ainsi, à condition que la haute régénération préétablie réagisse bien et rapidement à l'ouverture du couvert, le gain de productivité pourrait se mesurer en nombre d'années gagnées sur la révolution comme si on avait planté des semis de très grande dimension. Dans la présente étude, il semble que l'on puisse prévoir des gains de 10 ans sur la révolution pour un parterre de coupe où la régénération a, en moyenne, 3 m de hauteur.

L'hypothèse d'Archibald et Arnup (1993) quant au fait qu'une coupe où l'on protège la haute régénération (CPHR) puisse augmenter la possibilité annuelle de coupe semble donc à propos. Ainsi, dans un contexte de forêt normale, la protection de la régénération réalisée à grande échelle n'aura pas d'influence que sur la période de révolution, mais aussi sur l'augmentation de la possibilité forestière. Dans la sapinière boréale étudiée, l'effet possibilité de ce traitement serait respectivement autour de 7% et 23% pour des indices de hauteur de 1 et 3 m comparativement à un régime de coupe totale. Ces résultats concordent avec l'hypothèse de Archibald et Arnup (1993) selon laquelle la protection de régénération entre 2 et 2,5 m de hauteur augmente de 15% la possibilité comparativement à une coupe conventionnelle dans les pessières noires de l'Ontario.

Les gains sur la productivité forestière pour un indice de hauteur égal à 6 m lors de la coupe, pourraient être d'un peu plus de 45%. Toutefois, le nombre de placettes étudiées avec un indice supérieur à 3 m et contenant une diversité de diamètre, jusqu'aux petites tiges marchandes récoltables, est assez faible. Des études supplémentaires devront donc être réalisées pour vérifier si une coupe avec protection de petites tiges marchandes (CPPTM) produit réellement des résultats aussi élevés.

Morin et Gagnon (1992) suggèrent que les pessières noires issues de marcottes ont environ la même productivité que celle des tables de rendement, mais à condition d'avoir suffisamment de tiges. À la lumière des résultats du modèle par placette, il semble que l'on ne puisse anticiper de gain sur l'âge de la révolution si on ne possède pas au moins 900 – 1000 tiges d'avenir à l'hectare de plus de 50 cm de hauteur après la coupe. Évidemment, cette évaluation ne considère que les tiges qui ont survécu. Notons que Hatcher (1967) a aussi observé de bons résultats sur la production lorsque plus de 600 conifères à l'hectare de 1,5 cm de DHP et plus sont protégés suite à une coupe des feuillus formant la strate supérieure.

6.4.3. Compatibilité du modèle

Le modèle développé semble s'ajuster très bien aux données tout en respectant la logique biologique. Plus particulièrement, le modèle qui utilise l'indice de hauteur pour effectuer une translation latérale des courbes, se démarque par sa simplicité. Ainsi, peu importe le niveau de développement de la régénération après la coupe, une courbe générale est générée. En connaissant la hauteur moyenne des tiges d'avenir protégées, il est possible de se situer sur cette courbe en sachant que chaque mètre d'indice de hauteur correspond à 3,4 années.

L'étude des courbes de Pothier et al. (1995) montre que le modèle généré dans la présente étude semble bien s'adapter à la réalité car la translation des courbes de production d'indice de hauteur de 3 et 6 m mène à leur superposition presque parfaite. Pourtant le modèle de Pothier et al. (1995) procède plutôt par ajout d'un volume à un âge donné. Ainsi, une hauteur initiale de 3 m permettrait de sauver environ 6 ans sur la révolution. Cet effet positif semble toutefois plafonner car avec l'indice de 6 m de hauteur, le gain ne serait que de 8 ou 9 ans.

Les courbes de production de classe de fertilité I et de faible surface terrière initiale obtenues par Tremblay et al. (1997) dans le même dispositif présentent le même volume marchand 55 ans après coupe, soit 217 m³/ha. Cependant, l'âge d'exploitabilité était évalué à un peu plus de 60 ans comparativement à 55 ans dans cette étude. Les courbes de Pothier et Savard (1998) arrivent à un âge d'exploitabilité de 58 ans pour le sapin baumier de densité moyenne et d'IQS égal à 15 m à 50 ans. Ces résultats sont très semblables sauf pour le volume marchand à 60 ans qui n'est que de 148 m³/ha. En général, on peut dire que le modèle semble généralisable et représentatif.

6.4.4. Effet de la hauteur initiale sur l'âge des sapinières

Il y a un lien entre les gains en terme d'âge et la hauteur initiale de la régénération préétablie après la coupe. Ainsi, à la lumière des résultats, il est vrai que de tenir compte de l'âge total des tiges ayant subi une période d'oppression sous-estime la productivité. Malgré l'âge

biologique parfois élevé des sapinières issues de régénération préétablie, leur comportement après la coupe semble s'apparenter à celui des sapinières plus jeunes. Une évaluation plus juste de l'âge des peuplements pourrait donc être réalisée à partir de la dimension initiale de la régénération immédiatement après la coupe. Quoique la hauteur initiale (ou l'indice de hauteur) semble la meilleure variable pour exprimer l'état des parterres de coupe, la surface terrière et le diamètre moyen pourraient être utilisés mais avec une précision moindre, ces derniers n'intégrant pas la dimension des semis. Le coefficient de distribution de la régénération combiné avec une de ces variables pourrait aussi apporter une amélioration du modèle.

Selon l'équation # 16, un parterre de coupe où l'on retrouve 1 000 tiges d'avenir à l'hectare de 6 m de hauteur correspond à un peuplement issu d'une coupe totale de 20 ans. En comparant avec les courbes d'indice de fertilité de Vézina et Linteau (1968), cette valeur correspond à environ l'âge à la souche des tiges de 6 m sur des stations d'indice de fertilité I, qui est d'environ 17 ans. Comparativement au nombre d'années nécessaires après la coupe aux semis étudiés au chapitre 2 pour obtenir 3 m (9 à 10 ans), l'évaluation de l'âge des sapinières d'indice de hauteur de 3 m semble aussi réaliste (soit 10 ans). Il semble donc que le gain potentiel corresponde au temps nécessaire à un parterre de coupe issu d'une coupe totale pour atteindre la hauteur de la haute régénération préétablie protégée.

CHAPITRE 7. CONSÉQUENCES POUR L'AMÉNAGEMENT DES SAPINIÈRES

7.1. Les gaules : une richesse à protéger.

Les tiges de dimension supérieure ont démontré qu'elles sont capables de réagir et de croître comme des tiges plus jeunes après une certaine période d'adaptation. Les grandes tiges préétablies, encore vivantes 11 ans après la coupe, survivront mieux et atteindront des dimensions plus imposantes que la plupart des semis. À la lumière des résultats et de la littérature consultée, la haute régénération préétablie possède donc un réel potentiel. Les gaules de sapin baumier étant physiologiquement aussi productives que les semis, une attention particulière devrait leur être portée lors de la coupe.

La protection de la haute régénération préétablie dans certaines sapinières pourrait assurer une remise en production rapide et peu coûteuse des parterres de coupe, sans avoir recours au reboisement. Dans la mesure où les tiges protégées sont de qualité, suffisamment nombreuses et pourvues d'une cime vigoureuse, des diminutions sur la durée de la révolution pourraient être anticipées. Selon les résultats obtenus, la protection de la haute régénération permettrait de sauver environ 10 ans lorsque 1 000 tiges à l'hectare de 3 m de hauteur sont préservées lors de la coupe. Il semble qu'un nombre minimum de 900 - 1 000 tiges d'avenir à l'hectare de 50 cm et plus de hauteur soit nécessaire pour obtenir des gains notables. Toutefois, ces chiffres ne considèrent pas les tiges qui sont mortes au cours des années après la coupe.

En plus des gains possibles sur la productivité forestière, la coupe avec protection de la haute régénération présente plusieurs autres avantages. Ainsi, les tiges protégées permettraient de procurer un couvert pour la faune, d'améliorer l'esthétique du parterre de coupe, de protéger les sols contre l'érosion, de préserver le pool génétique local et de procurer de l'ombre pour d'éventuels semis. L'orientation prise dans le « Projet de stratégie de protection des forêts »

(Gouvernement du Québec 1994), quant à la protection des gaules lors des CPRS, semble donc être la bonne, voire souhaitable. Ainsi, il semble à propos de considérer comme viables après coupe, les tiges de plus de 3 m dont la proportion de cime est supérieure à 40-50% de la hauteur totale.

De toute évidence, des efforts supplémentaires devraient être consentis afin d'améliorer le taux de protection de la haute régénération préétablie. Ces efforts devraient surpasser le simple respect des normes actuelles qui n'évaluent les coupes avec protection de la régénération et des sols (CPRS) que sur la base de la proportion de la superficie occupée par les sentiers. Au-delà de la récolte de la matière ligneuse par le biais de sentiers espacés, une protection optimale des gaules présentes dans la bande résiduelle boisée non perturbée par la circulation devra être privilégiée si l'on veut favoriser une production accrue en résineux. Pour ce faire, il importe que les opérateurs impliqués dans la récolte des bois soient conscientisés à cet aspect. Une adaptation de la machinerie forestière et des méthodes de coupe est aussi nécessaire afin d'optimiser le taux de protection de la haute régénération, sans pour autant causer de pertes importantes de productivité. La récolte de la totalité des tiges de 10 cm de DHP pourrait même être réévaluée. Ainsi, ces tiges représentent un très faible volume marchand comparativement aux bénéfiques que l'on pourrait en retirer lors de leur éventuelle récolte, quelques décennies plus tard.

Des recherches supplémentaires sont nécessaires afin de valider les gains en temps, de manière à vérifier comment les calculs de possibilité pourraient être ajustés en fonction de la protection de la haute régénération. La CPRS fait d'ailleurs partie des traitements prioritaires identifiés dans le cadre de la mesure des effets réels des traitements sylvicoles sur les terres publiques québécoises (MRNQ 1997). Ainsi, comparativement à un régime de coupe où seule la basse régénération est protégée, il semble à propos d'ajuster la possibilité en fonction de la dimension des tiges présentes après la coupe.

De tels ajustements devraient favoriser une approche par résultats. À la lumière des résultats, l'indice de hauteur mesuré après la coupe pourrait être une variable intéressante pour estimer les gains possibles en terme d'années sur la révolution. La prise de la hauteur des quatre

plus grandes tiges par grappe de 10 placettes de régénération de 4 m² pourrait suffire à caractériser l'indice de hauteur lors de l'inventaire de régénération après coupe. Cette procédure permettrait d'obtenir une évaluation de la hauteur des 1 000 plus grandes tiges à l'hectare, qui pourrait éventuellement être utilisée dans l'actualisation des calculs de possibilité forestière. Évidemment, la hauteur moyenne ne devrait considérer que les tiges ayant un bon potentiel de survie. Ruel et Doucet (1998) ont d'ailleurs déterminé des critères pour évaluer la qualité de la régénération résineuse. Enfin, à cause des multiples facteurs pouvant jouer sur le développement des peuplements en période juvénile (Ruel et al. 1998), il importe d'être prudent dans l'évaluation des gains.

7.2. Coupe avec protection des petites tiges marchandes (CPPTM)

À la lumière des résultats, il pourrait être envisageable, sous certaines conditions, de conserver les tiges de dimension marchande marginale lors de la coupe finale. En effet, les tiges récoltables étudiées, qui avaient en moyenne 13 cm de DHP et 10 m de hauteur, ont bien réagi à l'ouverture sévère du couvert. Malgré des âges biologiques supérieurs à 65 ans au moment de la coupe, ces tiges ont obtenu des taux de survie (entre la 11^{ème} et la 47^{ème} année après la coupe) aussi élevés que ceux des gaules. Étant donné les dimensions imposantes obtenues 47 ans après la coupe par les petites tiges récoltables (volume total de 0,5 m³/tige), il semble que leur protection lors de la coupe pourrait contribuer à la récolte de billes plus volumineuses sur une révolution raccourcie.

Il faut toutefois faire attention dans l'extrapolation des résultats provenant de cette étude où les tiges proviennent d'une sapinière vierge probablement clairsemée, à l'aménagement des forêts équiennes de forte densité. Dans ce dernier cas, les tiges opprimées et intermédiaires n'ont pas nécessairement des cimes suffisamment développées pour espérer obtenir de bonnes réactions et de bons taux de survie après la coupe. Ainsi, une coupe avec protection des petites tiges marchandes (classes de 10 à 14 cm de DHP) semble être une avenue intéressante dans les sapinières dont la structure diamétrale est biétagée, irrégulière ou inéquienne. Celle-ci pourrait s'apparenter à une éclaircie par le haut, d'intensité forte à modérée, où la sélection des tiges à

protéger serait essentiellement déterminée sur la base d'un diamètre limite. Les tiges marchandes protégées pourraient continuer à se développer et formeraient la strate dominante du nouveau peuplement, tout en servant de semencier. La réalisation de ce type de coupe contribuerait donc à la formation de forêts résineuses inéquiennes où les sentiers seraient colonisés par des semis alors que les grandes tiges se développeraient dans la bande résiduelle boisée protégée de la circulation. Des traitements similaires ont été étudiés dans des peuplements résineux (McCarthy 1918, LeBarron 1945, McGraw 1948, MacDonnel et Groot 1996) et des peuplements où les feuillus faisaient partie de la strate dominante (Hatcher 1967). Les résultats présentés par ces auteurs sont encourageants. Cependant, des coupes partielles réalisées dans des sapinières du parc des Laurentides ont donné des résultats mitigés notamment à cause du chablis après les traitements (Corriveau 1971).

Selon les résultats obtenus dans la présente étude, il semble qu'une CPPTM protégeant 1 000 tiges d'avenir à l'hectare de 6 m de hauteur en moyenne, permettrait d'obtenir des gains sur la productivité forestière d'un peu plus de 45%. Ainsi comparativement à un régime de coupe totale, une révolution raccourcie de 20 ans pourrait être anticipée. En Ontario, dans des pessières noires sur sol tourbeux, on procède à des "coupes attentives" où les petites tiges marchandes (jusqu'à 15 cm au DHP) sont protégées entre les sentiers (Gemmell 1995). Selon l'auteur, ce type de coupe permettrait de réduire à 80 ans la révolution qui en prend généralement 120 ans. Cette stratégie constitue donc une avenue prometteuse surtout dans le contexte actuel où les stocks de copeaux diminuent la demande pour le bois de pâte. En augmentant la dimension moyenne des tiges produites à la fin de la révolution, une réduction des coûts attribuables à la transformation des tiges de faibles dimensions pourrait être possible.

Des études réalisées par FERIC ont démontré la faisabilité économique de la CPPTM. Ainsi, malgré l'attention supplémentaire à accorder pour bien protéger les grandes tiges, le volume moyen par tige récolté est plus élevé comparativement à la CPRS à cause de la protection des tiges de dimensions marginales (Plamondon 1995, Légère et Gingras 1998). Dans le cadre des opérations forestières, ce traitement peut donc s'avérer profitable. En protégeant les petites tiges marchandes, on évite la récolte d'une quantité importante de tiges de 10 et 12 cm de DHP

qui demandent beaucoup de temps de manipulation et de transport comparativement aux bénéfices que leur transformation peut apporter. De plus, en diminuant l'intensité de coupe, des gains peuvent être réalisés quant à la protection de la haute régénération préétablie (Légère et Gingras 1998).

Un système de coupe partielle s'inscrirait dans une stratégie favorisant une harmonisation du système de coupe à blanc avec des coupes moins intenses. Ainsi, dans un contexte d'aménagement forestier durable, il semble à propos de réajuster la place de la coupe partielle dans les sapinières et les pessières du Québec. Les parterres de coupe issus de ces traitements présenteraient un impact moindre sur le paysage et atteindraient beaucoup plus rapidement le seuil psychologique de 7 m de hauteur, identifié par Pâquet et Bélanger (1997). Par ailleurs, la coupe partielle peut procurer un habitat favorable pour certaines espèces de petits mammifères et d'oiseaux que l'on retrouve généralement en forêt mature (Steventon et al. 1998).

Des expérimentations sont présentement en cours sur la Côte-Nord et au Lac Saint-Jean afin de vérifier l'intérêt de la coupe avec protection des petites tiges marchandes (CPPTM) en termes de croissance et de productivité opérationnelle. Entre autres, un suivi des pertes de matière ligneuse causées par le chablis doit être réalisé. Des études de coupes partielles sont aussi en cours afin de protéger l'habitat du caribou des bois dans la péninsule gaspésienne.

7.3. Carie et qualité du bois

Le sapin étant une essence très vulnérable à la carie, il est particulièrement important que les blessures infligées aux tiges résiduelles protégées lors des coupes soient réduites au minimum (Basham 1991). Autant dans le cadre d'une CPRS que d'une coupe partielle, une attention particulière doit être portée lors des opérations pour s'assurer que les bois produits soient de qualité à la fin de la révolution. Afin d'éviter des propagations importantes de la carie de racine, des mesures devraient être adoptées pour minimiser les dommages au niveau du tronc, de la cime et de la flèche terminale sur les tiges protégées lors des coupes. L'utilisation de machinerie adéquate et la récolte par le biais de sentiers espacés favoriseront l'atteinte de tels résultats.

En fonction de la carie et de la décoloration observée sur les sapins de plus de 5 m lors de la coupe, il semble nécessaire d'ajuster l'âge d'exploitation en fonction de la dimension de la régénération présente immédiatement après la coupe. Ainsi, si on attend trop longtemps avant de récolter les bois, des pertes substantielles pourraient se réaliser. En considérant la prédisposition des tiges de plus de 5 m lors de la coupe, on pourrait assister à des pertes tant en termes de qualité que de quantité de matière ligneuse à récolter.

Le nombre d'individus étudiés dans l'analyse de la carie n'étant pas très élevé, les tendances observées devront être validées par des études plus complètes portant sur le développement de la carie après la coupe chez la haute régénération préétablie de sapin baumier. Plus particulièrement, les causes liées à la présence de pourriture chez les tiges de plus de 5 m protégées, devront être éclaircies.

Étant donné que 47 ans après la coupe, les tiges étudiées n'avaient pas de plus fort défilement que les semis plus jeunes, la forme des billes produites devrait être semblable, n'affectant donc pas la qualité des tiges. Toutefois, les tiges ayant très fortement réagi après la coupe sont susceptibles de présenter des défauts liés au bois de compression et au bois de réaction. Ce manque d'uniformité dans le bois aura pour conséquence de diminuer l'usinabilité et aura des impacts sur l'apparence du bois scié (Snellgrove et al. 1988). Ainsi, le changement dans la densité du bois, causé par la réaction rapide de l'arbre, peut causer des problèmes notamment lors du séchage des planches affectées par la zone de compression et de réaction près du centre de la bille. Cet aspect, encore peu étudié, devra être approfondi par des recherches plus poussées.

7.4. Élagage naturel

Puisque les tiges opprimées avant la coupe sont soumises à l'élagage naturel nous pouvons supposer qu'une proportion assez importante de la tige est claire de nœud lors de la coupe. Ainsi selon nos données, les grandes gaules et les petites tiges récoltables avaient des proportions de cime vivante autour de 50% lors du traitement. La récolte de ces tiges, 50 ans plus

tard, devrait donc produire au moins une bille de 8 pieds de dimension sciage dont la qualité sera supérieure à cause de l'absence de nœud. Cependant l'effet de l'éclaircie et de la faible compétition les premières années après la coupe risquent de favoriser la formation de branches de grosses dimensions dans la partie supérieure de la tige. Ces branches semblent d'ailleurs la cause de la présence de décoloration du bois dans la partie supérieure des tiges. Il ne faut pas non plus sous-estimer l'importance des tiges de plus petites tailles dans l'élagage naturel des plus grosses. Ainsi, les semis, s'ils sont présents en quantité suffisante obligeront la haute régénération préétablie à élever leur base de cime vivante. S'ils sont absents, on risque d'observer la présence de branches de fortes dimensions à des niveaux pouvant compromettre la qualité des bois produits pour le bois de sciage.

7.5. Évaluation de la qualité de station

La détermination de la qualité de station dans les peuplements issus de hautes régénérations préétablies cause de fréquentes sous-estimations du potentiel de production. Ainsi, l'âge élevé des tiges ayant connu une période d'oppression rend l'utilisation de cette variable peu appropriée. Par exemple, l'utilisation de l'âge biologique et de la hauteur totale des tiges récoltables lors de la coupe aurait contribué à sous-estimer de 20% l'indice de qualité de station.

Pour contourner ce problème, Pothier et al. (1995) proposent un ajustement de l'âge de l'arbre à partir du diamètre au moment du dégagement et de la croissance en diamètre entre la cinquième et la dixième année depuis cet événement. Cette procédure ajuste l'âge des tiges préétablies, initialement affectées par une période d'oppression, en supposant que la croissance avant l'ouverture du couvert est similaire à la croissance après la coupe. Cependant, en se basant sur une courte période après la coupe, l'évaluation de l'âge ajusté est à la merci des événements pouvant se produire durant cette période. D'ailleurs, Pothier et al. (1995) ont observé que cette méthode sous-estimait la qualité de station et de façon plus marquée chez les tiges les plus hautes.

Ouellet (1996) utilise une technique d'évaluation indépendante de l'âge pour évaluer le potentiel d'un site. Celle-ci ne nécessite que la mesure de l'accroissement en hauteur et de la

hauteur. L'étude de la fonction d'accroissement potentiel en hauteur en fonction de la hauteur permet donc une évaluation de la qualité de station sans l'aide de l'âge. Toutefois, étant donné que les accroissements en hauteur des tiges résiduelles sont inférieurs à ceux des semis pendant la période d'adaptation, qui peut durer jusqu'à 20 ans, cette technique peut sous-évaluer la qualité de station. Par la suite, cette technique est fiable car l'accroissement à hauteurs comparables ne semble plus être influencé par la taille initiale ou la durée de la période d'oppression.

En général, le caractère particulier des courbes de croissance en hauteur des tiges initialement opprimées aura un impact sur la détermination de la qualité de station, peu importe la méthode d'évaluation. La meilleure solution demeure l'échantillonnage de tiges n'ayant jamais connu de période d'oppression. Le caractère irrégulier de certaines sapinières peut quelques fois permettre de contourner ce problème en sélectionnant des tiges du couvert dominant ou codominant n'ayant apparemment jamais été affectées par la compétition induite de tiges de dimension supérieure (libre de croître). Notons aussi qu'une connaissance plus approfondie du lien entre les groupes éco-forestiers, les phases écologiques et la productivité permettrait de diminuer notre dépendance à l'indice de qualité de station évalué sur la base de l'âge (Tremblay et al. 1997).

CONCLUSION

Méthode

La présente étude se distingue des autres par la comparaison, à dimensions comparables, de l'accroissement après coupe de tiges de différentes tailles initiales. Ainsi, pour bien cerner l'impact de la dimension initiale, une analyse des accroissements à dimensions égales fut utilisée. Pour ce faire, la modélisation de la croissance des tiges individuelles a été réalisée à partir d'un modèle non-linéaire inspiré de l'équation de Chapman-Richards. Afin d'éliminer l'effet des défoliations causées par la tordeuse des bourgeons de l'épinette, les périodes affectées par ce phénomène ont été enlevées. Le modèle consiste en une translation latérale des portions de courbes après chaque période de tordeuse. Il en résulte une estimation de l'évolution des dimensions dendrométriques de chaque arbre en absence de défoliation. Cette procédure a aussi permis d'évaluer l'impact des défoliations sur la croissance lors des deux périodes épidémiques.

Une méthode a aussi été mise au point afin d'évaluer la base de la cime vivante à partir des profils d'accroissements provenant des analyses de tiges. Ainsi, la technique permet d'évaluer la position de la base de la cime efficace qui correspond généralement à la zone où l'accroissement en surface transversale est maximum dans le tronc. Une évaluation de la dimension de la cime à différents moments dans le temps a donc été rendue possible.

Au niveau de la modélisation des volumes marchands des peuplements, un modèle s'ajustant très bien aux données et respectant la logique biologique a été développé. L'utilisation d'une variable qui reflète la dimension des tiges protégées sur les parterres de coupe a permis d'évaluer l'importance de la translation des courbes de production. Ainsi, le modèle pose comme hypothèse que la protection de la régénération contribue essentiellement à réduire la durée de la révolution. Les résultats obtenus montrent que cette technique pourrait s'avérer une avenue de recherche intéressante dans la modélisation de la production de peuplements issus de régénération préétablie.

Survol des résultats obtenus

À la lumière des résultats, les gaules et les petites tiges récoltables de sapin baumier protégées lors de la coupe possèdent une excellente capacité d'adaptation. Ainsi, comparativement à des semis libres de croître, les tiges de dimension supérieure ont généralement conservé ou maintenu leur dominance en terme de dimension après la coupe. Les tiges de hauteur initiale de plus de 5 m lors de la coupe se démarquent particulièrement en terme de diamètre et de volume tout au long de la période étudiée. Au niveau de la hauteur totale, les différences entre les tiges de fortes dimensions initiales et celles de plus petites tailles s'atténuent avec le temps. Ce fait s'explique en partie par la présence d'un délai dans la réaction des tiges dans l'accroissement en hauteur. Ainsi, plus la tige est haute au moment de la coupe, moins la réaction dans l'accroissement en hauteur à l'intérieur des dix premières années sera rapide et prononcée. Au niveau de l'accroissement en diamètre, la réaction positive à l'ouverture du couvert s'est réalisée à l'intérieur des cinq premières années après la coupe, peu importe la dimension initiale.

L'analyse des accroissements après coupe à dimensions comparables a permis de constater que les semis et les tiges de dimension supérieure croissent de façon similaire après une période d'adaptation. Au niveau de l'accroissement en hauteur, cette période peut durer jusqu'à vingt ans. Il semble que la durée est proportionnelle à la dimension des tiges lors de la coupe, les petites gaules réagissant beaucoup plus rapidement que les tiges de plus de 3 m lors de la coupe. Par la suite, il n'y a généralement plus de différence entre les groupes. La même tendance est observée au niveau des accroissements en diamètre, en volume total et spécifiques en volume, sauf que la période d'adaptation est plus courte, soit généralement moins de 10 ans. Toutefois, les moyennes gaules prennent un peu plus de temps pour s'adapter aux nouvelles conditions. À la lumière des résultats et des considérations physiologiques, une meilleure compréhension de l'accroissement de la haute régénération préétablie après la coupe passe essentiellement par une amélioration des connaissances quant aux facteurs qui influencent le temps nécessaire aux tiges pour s'adapter aux nouvelles conditions environnementales. Ainsi, une fois adaptée à son nouvel environnement, l'accroissement d'une tige libérée de son oppression n'est pas fonction de l'âge biologique, mais plutôt de sa dimension.

L'étude des pertes d'accroissements en hauteur et en volume provoquées par la dernière période épidémique de la tordeuse des bourgeons de l'épinette a permis de constater que les diminutions (en %) sont semblables peu importe la dimension des tiges au moment de la coupe. Ainsi l'âge biologique des tiges n'aurait pas d'influence sur la vigueur et par conséquent, sur l'accroissement durant les défoliations. Toutefois, lors de la première période épidémique, certaines tiges ont été un peu plus influencées que les semis quant à l'accroissement en volume total.

Il semble que les caries sont plus fréquentes et plus volumineuses chez les tiges de plus de 5 m lors de la coupe, 47 ans après la coupe. Des volumes de décolorations importants ont aussi été observés chez les plus grandes tiges lors de la coupe. Vu la susceptibilité du sapin au phénomène de la carie, des recherches plus poussées sur le sujet devraient être entreprises, tout particulièrement sur la problématique de la régénération préétablie après la coupe et l'impact des blessures. Au niveau du peuplement, les placettes constituées de tiges de plus de 5 m, même si elles possèdent des proportions de pourriture plus élevées, ont obtenu des volumes nets à l'hectare généralement bien supérieurs à ceux des placettes constituées de semis seulement.

Malgré leur âge parfois élevé, la haute régénération et les petites tiges récoltables ont obtenu des taux de survie élevés (75% et plus) entre la 11^{ième} et la 47^{ième} année après la coupe. Leur position avantageuse dans le couvert leur a permis de mieux survivre que les semis faisant principalement partie des strates inférieures. Le taux de survie semble donc essentiellement tributaire de la position des tiges dans le peuplement et aucunement lié à l'âge biologique. Les tiges de dimension supérieure ont aussi obtenu des dimensions plus imposantes 47 ans après coupe. Ainsi, plus la tige est haute lors de la coupe, plus elle a de chance d'atteindre des dimensions sciages intéressantes. C'est pourquoi, malgré leur faible part du nombre de tiges présentes après la coupe, la haute régénération contribue substantiellement au volume marchand du peuplement.

Au niveau du peuplement, des volumes marchands élevés ont été observés, particulièrement dans les placettes où l'on retrouve une diversité de dimension initiale au moment de la coupe. L'impact de la haute régénération préétablie sur la productivité forestière semble se traduire essentiellement par des gains tangibles en terme de réduction de la longueur de la révolution. En général, lorsque la quantité de haute régénération est suffisante, il semble que le gain sur la révolution correspondrait au temps nécessaire à un peuplement issu d'une coupe totale à atteindre la hauteur de la régénération préétablie protégée. Un indice de hauteur, développé à partir de la moyenne des 1 000 plus grandes tiges à l'hectare après la coupe, s'est avéré une variable efficace pour bien caractériser les parterres de coupe. La protection de la haute régénération permettrait de devancer la prochaine récolte de 10 ans pour un indice de hauteur de 3 m.

À la lumière des résultats, les gaules de sapins baumiers présentent un réel potentiel suite à leur mise en lumière. Leur protection lors des CPRS pourrait permettre des gains de possibilité forestière comparativement à un régime de coupe totale où seule la basse régénération est protégée. Une coupe avec protection des petites tiges marchandes pourrait même être envisagée. Étant donné la susceptibilité du sapin baumier à la carie, une attention particulière doit être accordée aux peuplements issus de hautes régénérations préétablies.

BIBLIOGRAPHIE

- Aho, P.E. 1977. **Decay of grand fir in the Blue Mountains of Oregon and Washington.** USDA For. Serv. Res. Pap. PNW-229. Pacific Northwest Forest and Range Experiment Station, Portland, Oregon.
- Aho, P.E., M.F. Gregory, F.L. Frances. 1987. **Decay fungi and wounding in advance grand and white fir regeneration.** For. Sci. 33: 347-355.
- Anonyme. 1989. **Manuel d'aménagement forestier.** Ministère de l'Énergie et des Ressources.
- Archambault, L. et J. Beaulieu. 1985. **Réduction de croissance en volume occasionnée au sapin baumier, suite à la défoliation par la tordeuse des bourgeons de l'épinette.** For. Chron. 61: 10-13.
- Archambault, L., R.R. Gagnon, G. Pelletier, M. Chabot, L. Bélanger. 1990 **Influence du drainage et de la texture du dépôt sur la vulnérabilité du sapin baumier et de l'épinette blanche aux attaques de la tordeuse des bourgeons de l'épinette.** Can. J. For. Res. 20: 750-756.
- Archibald, D.J. et R.W. Arnup 1993. **The management of black spruce advance growth in northeastern Ontario.** Northeast Sci. and Technol., Ont. Min. Nat. Resour., Timmins, Ont. Tech. Rep. 008. VMAP Rep. No 93-05.
- Assman, E. 1970. **The Principles of Forest Yield Study.** Pergamon Press, Oxford.
- Basham, J.T. 1950. **Interim report on decay relationships of balsam fir (*Abies balsamea* (L.) Mill.) in three regions of Ontario.** Dep. Agric., Domin. Lab. For. Pathol., Mimeogr. Rep.

- Basham, J.T. 1991. **Stem decay in living trees in Ontario's forests: a users' compendium and guide.** For. Can., Ont. Regio, Sault Ste. Marie, Ont. Inf. Rep. 0-X-408.
- Basham, J.T. et Z.J.R. Morawski. 1964. **Cull studies. The defects and associated Basidiomycete fungi in the heartwood of living trees in the forests of Ontario.** Dep. For., For. Entomol. Pathol. Br., Ottawa, Ont. Publ. 1072.
- Baskerville, G.L. et D.A. MacLean. 1979. **Budworm-caused mortality and 20-year recovery in immature balsam fir stands.** Can. J. For. Serv. Marit. For. Res. Cent., Fredericton, N.B., Inf. Rep. M-X-102.
- Batzer, H.O. 1973. **Net effect of spruce budworm defoliation on mortality and growth of balsam fir.** J. For. 71: 34-47.
- Bauce, É. 1996. **One and two year impact of commercial thinning on spruce budworm feeding ecology and host tree foliage production and chemistry.** For. Chron. 72: 393-398.
- Becquey, J. et P. Riou-Nivert. 1987. **L'existence de « zones de stabilité » des peuplements. Conséquences sur la gestion.** Revue forestière française 39: 323-334.
- Bégin, J. 1992. **Productivité du Douglas vert (*Pseudotsuga menziesii* [Mirb.] Franco var. *menziesii* Franco) en relation avec des caractéristiques stationnelles.** Mitteilungen der Eidgenössischen Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft, 2: 173-313.
- Bégin J. 1996. **Anatige.** Faculté de foresterie et de géomatique, Université Laval, Québec.
- Bégin J. et F. Raulier. 1995. **Comparaison de différentes approches, modèles et tailles d'échantillon pour l'établissement de relations hauteur-diamètre locales.** Can. J. For. Res. 25: 1303-1312.

- Bertrand, L., L. Bélanger, R.L. Beauregard, 1992. **Croissance de sapinières à bouleau blanc boréales issues de coupe avec protection de la régénération.** Can. J. For. Res. 22: 1701-1711.
- Blais, J.R. 1958. **The vulnerability of balsam fir to spruce budworm attack in northwestern Ontario, with special reference to the physiological age of the tree.** For. Chron. 33: 405-422.
- Blais, J.R. 1961. **Spruce budworm outbreaks in the Lower St. Lawrence and Gaspé regions.** For. Chron. 37: 192-202.
- Blais, J.R. 1983. **Predicting tree mortality by spruce budworm: a discussion.** For. Chron. 59: 294-297.
- Boudoux, M. 1978. **Tables de rendement empiriques pour l'épinette noire, le sapin baumier et le pin gris au Québec.** Conseillers en gestion des forêts, ministère des Terres et Forêts du Québec, Québec.
- Carmean, W.H. 1972. **Site index curves for upland oaks in the Central States.** For. Sci. 18: 102-120.
- Carmean, W.H. 1978. **Site index curves for northern hardwoods in northern Wisconsin and Upper Michigan.** USDA, For. Serv. North. Cent. For. Exp. Stn. St-Paul, Minn. Res. Rap. NC-160.
- Conseil de la recherche forestière du Québec. 1992. **Avis du comité spécialisé sur la croissance et le rendement des forêts.**

- Corriveau, A. 1971. **Étude comparative de coupes partielles effectuées en 1954 dans les peuplements de sapin baumier de différents âges de la Rivière Épaule, Québec.** Environnement Canada. Centre de recherche des Laurentides, Ste-Foy, Québec. Rapport Q-F-X-21.
- Côté, S. et L. Bélanger. 1991. **Variations de la régénération préétablie dans les sapinières boréales en fonction de leurs caractéristiques écologiques.** Can. J. For. Res. 21: 1779-1795.
- Cremer, K.W., C.J. Borough, F.H. McKinnell, P.R. Carter. 1982. **Effects of stocking and thinning on wind damage in plantations.** N. Z. J. For. Sci. 12: 244-268.
- Crossley, D.I. 1976. **Growth response of spruce and fir to release from suppression.** For. Chron. 52: 189-193.
- Curtis, R.O. 1964. **A stem-analysis approach to site-index curves.** For. Sci. 10: 241-256.
- Davidson, A.G. et D.E. Etheridge. 1963. **Infection of balsam fir, *Abies balsamea* (L.) Mill., by *Stereum sanguinolentum* (Alb. and Schw. ex Fr.).** Can. J. Bot. 41: 759-765.
- Doucet, R. 1988. **La régénération préétablie dans les peuplements forestiers naturels au Québec.** For. Chron. 64: 116-120.
- Doucet, R. et G. Sheedy. 1992. **Mesure des effets réels des traitements sylvicoles: Traitement 1: Coupe avec protection de la régénération ou ensemencement artificiel pour la production prioritaire de résineux. Synthèse des informations disponibles et évaluation des besoins de recherche.** MFO, Serv. Rech. For. Rap. int. 355.

- Duff, G.H. et N.J. Nolan. 1957. **Growth and morphogenesis in the Canadian forest species. II. Specific increments and their relation to the quantity and activity of growth in *Pinus resinosa* Ait.** Can. J. Bot. 35: 527-572.
- Fayle, D.C.F. et C.V. Bentley 1989. **Growth and development of a natural jack pine stand.** Dans: D.C. MacIver, R.B. Street, A.N. Auclair. Climate applications in forest renewal and forest production : Proc. of Forest Climate '86, Nov. 17-20, 1986. Geneva Park, Orillia, Ontario.
- Fayle, D.C.F. et G.B. MacDonald. 1977. **Growth and development of sugar maple as revealed by stem analysis.** Can. J. For. Res. 7: 526-536.
- Fayle, D.C.F. et D.C. MacIver. 1986. **Growth layer analysis as a method of examining tree growth and development responses.** Dans: D.S. Solomon et T.B. Brann. Environmental influences on tree and stand increment. IUFRO, Maine Agric. Exp. Sta., Univ. Maine, Misc. Publ. 691.
- Ferguson, D.E. 1984. **Needed: guidelines for defining acceptable advance regeneration.** USDA For. Serv. Intermountain For. Range Exp. Stn. Res. Note INT-341.
- Ferguson, D.E. et D.L. Adams. 1980. **Response of advance grand fir regeneration to overstory removal in northern Idaho.** For. Sci. 26: 537-545.
- Frank, R.M. 1990. ***Abies Balsamea* (L.) Mill. - Balsam fir.** Dans R.M. Burns et B.H. Honkala. Silvics of north America. Vol 1. Conifers. U.S. Dep. Agric. Handb. No 654.
- Frisque, G., G.F. Weetman, E. Clemmer. 1978. **Analyse, 10 ans après coupe de bois à pâte, des problèmes de régénération dans l'est du Canada.** FERIC, Inst. can. de rech. génie for. Rapport technique RT-23.

- Fye, R.E. et J.B. Thomas. 1963. **Regeneration of balsam fir and spruce about fifteen years following release by spruce budworm attack.** For. Chron. 39: 385-396.
- Gagnon, R. 1985. **Croissance du sapin baumier en relation avec la durée de sa période initiale d'oppression.** Mémoire de maîtrise, Faculté de foresterie et géomatique, Université Laval, Québec.
- Gagnon, R. et M. Chabot. 1988. **Un système d'évaluation de la vulnérabilité des peuplements à la tordeuse des bourgeons de l'épinette : ses fondements, son implantation et son utilisation en aménagement forestier.** L'Aubelle 67: 7-14.
- Gemmell, R. 1995. **Des méthodes de coupe favorisant des forêts inéquiennes.** Opérations forestières 68: 68-72.
- Gerardin, V., D. Bérubé et J.P. Ducruc. 1984. **Cadre écologique de référence de l'Unité de Gestion des Chics-Chocs (partie occidentale): Carte des topo-systèmes et des régions de croissance.** Division de l'inventaire écologique, ministère de l'Environnement du Québec, Québec, contribution No 12.
- Ghent, A.W. 1958. **Studies of regeneration in forest stands devastated by the spruce budworm. II Age, height, growth, and related studies of balsam fir seedlings.** For. Sci. 4: 135-146.
- Gobeil, A.R. 1938. **Domages causés aux forêts de la Gaspésie par les insectes.** Ministère des Terres et Forêts. Bull. 2: 1-16.
- Gouvernement du Québec. 1992. **Instructions relatives à l'application du règlement sur la valeur des traitements sylvicoles admissibles en paiement des droits, exercice 1993-1994.** Ministère des Forêts du Québec, Québec.

- Gouvernement du Québec. 1994. **Stratégie de protection des forêts**. Ministère des Ressources naturelles, Québec.
- Groupe de travail sur les écorégions. 1989. **Régions écoclimatiques du Canada, première approximation**. Env. Canada, Comité canadien de la classification écol. du territoire, Dir. du dév. durable, Série de la classification écologique du territoire No 23.
- Guay R., R. Gagnon, H. Morin. 1992. **A new automatic and interactive tree ring measurement system based on a line scan camera**. For. Chron. 69: 138- 141.
- Hamilton, G.J. 1975. **Forest mensuration handbook**. Her Majesty's Stationery office, London, Forestry Commission No 39.
- Hatcher, R.J. 1960. **Development of balsam fir following a clearcut in Quebec**. Canada, Dep. of North. Aff. and Nat. Res., Forestry Branch, For. Res. Div., Technical Note No 87.
- Hatcher, R.J. 1964. **Balsam fir advance growth after cutting in Quebec**. For. Chron. 40: 86-92.
- Hatcher, R.J. 1966. **Progress report: forest growth survey, Matane River, P.Q.** Can. Dep. For. Res. Branch, For. Res. Div. Tech. Note No 87.
- Hatcher, R.J. 1967. **Response of balsam fir and red spruce to release from hardwood competition**. Woodlands review. Juin 1967.
- Helms, J.A. et R.B. Standiford. 1985. **Predicting release of advance reproduction of mixed conifer species in California following overstory removal**. For. Sci. 31: 3-15.
- Herring, L.J. et D.E. Etheridge. 1976. **Advance amabilis-fir regeneration in the Vancouver Forest District**. British Columbia For. Serv., Environnement Canada, Service des Forêts.

- Horton, B.J. et A. Groot. 1987. **Development of second-growth black spruce stands on peatlands in northeastern Ontario.** COFRDA Rep. No 33001.
- Hunt, K. et R.D. Withney. 1974. **Kraft pulp from decayed *Abies balsamea* from Ontario.** Dep. Environ., Can. For. Serv., Sault Ste. Marie, Ont. Inf. Rep. 0-X-217.
- Jäghagen, K. 1997. **Timber quality and volume increment of advance growth and planted *pinus sylvestris*.** Scand. J. For. Res. 12: 328-335.
- Ker, M.F et C. Bowling. 1991. **Polymorphic site index equations for four New-Brunswick softwood species.** Can. J. For. Res. 21: 728-732.
- Kimmins, J.P. 1971. **Variations in the foliar amino acid composition of flowering and nonflowering balsam fir (*Abies balsamea* (L.) Mill.) and white spruce (*Picea glauca* (Moench) Voss) in relation to outbreaks of the spruce budworm (*Christoneura fumiferana* (Clem.)).** Can. J. Zool. 49: 1005-1011.
- Kramer, P.J. et T.T. Kozlowski. 1979. **Physiology of woody plants.** Academic Press, N.Y.
- Lachance, D., C. Monnier, J.-P. Bérubé et R. Paquet. 1990. **Insectes et maladies des forêts dans la région du Bas-Saint-Laurent/Gaspésie de 1936 à 1987.** Forêt Canada, Région de Québec. Rapport d'information LAU-X-93.
- Larson, P.R. 1963. **Stem form development of forest trees.** For. Sci. Monogr. 5: 1-42.
- Lavallée, A. 1986. **Les caries du sapin baumier dans le centre et le nord-est du Québec.** Centre de Foresterie des Laurentides, rap. LAU-X-70.
- LeBarron, R.K. 1945. **Light cutting in black spruce is practicable.** J. For. 43: 486-489.

- Légère, G. et J.-F. Gingras. 1998. **Évaluation de méthodes de coupe avec protection des petites tiges marchandes.** Inst. can. de rech. génie for. (FERIC), Pointe-Claire, Québec. Rapport technique RT-124.
- Lortie, M. 1968. **Quelques défauts indicateurs de carie chez le sapin baumier.** Fonds de recherches forestières de l'Université Laval. Université Laval, Québec. Bull. No. 11.
- Lussier, J.-M., H. Morin, et R. Gagnon. 1992. **Comparaison de la croissance de marcottes d'épinette noire (*Picea mariana*) adultes après coupe à celle d'individus issus de graine après feu.** Can. J. For. Res. 22: 1524-1535.
- MacArthur, J.D. 1959. **A report on the establishment of observation area No. 15, Matane freehold limits of the Hammermill Paper Company.** Can. Dep. For. Res. Branch., Région de Québec, Québec, rapport interne.
- MacArthur, J.D. 1963. **Impact of mechanized logging on the composition of balsam fir stand in the Gaspé Péninsula.** Pulp. Pap. Mag. Can. 65: WR208-WR210.
- MacDonell, M.R. et A. Groot. 1996. **Uneven-aged silviculture for peatland second-growth black spruce: Biological feasibility.** Nat. Resour. Can., Canadian Forest Service, Great Lakes Forestry Centre, Sault Ste. Marie, ON. NODA/NFP Tech. Rep. TR-36.
- MacLean, D.A. 1980. **Vulnerability of fir-spruce stands during uncontrolled spruce budworm outbreaks: a review and discussion.** For. Chron. 56: 213-221.
- MacLean, D.A., T.L. Hunt, E.S. Eveleigh, M.G. Morgan. 1996. **The relation of balsam fir volume increment to cumulative spruce budworm defoliation.** For. Chron. 72: 533-540.

- Mård, H. 1997. **Damage and growth response in suppressed *Picea abies* after removal of overstorey Birch (*Betula spp.*)**. Scand. J. For. Res. 12: 248-255.
- McCarthy, E.F. 1918. **Accelerated growth of balsam fir in the Adirondacks**. J. For. 16: 304-307.
- McCaughey, W.W. et D.E. Ferguson. 1988. **Response of advance regeneration to release in the Inland Mountain West: a summary**. Dans: W.C. Schmidt. Proceedings, Future Forests of the Mountain West: A stand culture symposium. USDA For. Serv. Gen. Tech. Rep. INT-243.
- McGraw, W.E. 1948. **Growth of balsam fir in Newfoundland**. Pulp Paper Mag. Can. 49: 280-286.
- Ministère des Ressources naturelles du Québec. 1994. **Méthodes de mesurage des bois. Instructions**. Gouvernement du Québec, Québec.
- Ministère des Ressources naturelles du Québec. 1995. **Normes d'inventaire forestier. Les placettes-échantillons permanentes**. Gouvernement du Québec, Service des inventaires forestiers.
- Ministère des Ressources naturelles du Québec. 1997. **Manuel d'aménagement forestier. 3^e édition**. Gouvernement du Québec.
- Ministère des Ressources naturelles du Québec. 1998a. **Instructions relatives à l'application du règlement sur la valeur des traitements sylvicoles admissibles en paiement des droits, exercice 1998-1999**. Gouvernement du Québec, Québec.
- Ministère des Ressources naturelles du Québec. 1998b. **Programme de connaissance des écosystèmes forestiers du Québec méridional. Rapport de classification écologique**.

Sapinière à bouleau blanc de l'est. Gouvernement du Québec, Service de l'évaluation de l'offre/Service de la recherche appliquée.

Morin, H. et R. Gagnon 1991. **Structure et croissance de peuplements d'épinette noire issus de régénération préétablie, une quarantaine d'années après coupe au Lac Saint-Jean, Québec.** For. Chron. 67: 275-283.

Morin, H. et R. Gagnon 1992. **Comparative growth and yield of layer- and seed-origin black spruce (*Picea mariana*) stands in Quebec.** Can. J. For. Res. 22: 465-473.

Morris, R.F. 1948. **How old is a balsam tree?** For. Chron. 24: 106-110.

Mott, D.G., L.D. Nairn, J.A. Cook. 1957. **Radial growth in forest trees and effects of insect defoliation.** For. Sci. 3: 286-304.

Ouellet, F. 1996. **Évolution de la régénération d'épinette noire (*Picea mariana* (Mill.) BSP) à la suite d'une coupe à blanc mécanisée et modélisation de la croissance en phase juvénile.** Mémoire de maîtrise, Faculté de foresterie et géomatique, Université Laval, Québec.

Pâquet, J. et L. Bélanger. 1997. **Public acceptability thresholds of clearcutting to maintain visual quality of boreal balsam fir landscapes.** For. Sci. 43: 46-55.

Paquin, R. et R. Doucet. 1992a. **Productivité de pessières noires boréales régénérées par macottage à la suite de vieilles coupes totales au Québec.** Can. J. For. Res. 22: 601-612.

Paquin, R. et R. Doucet. 1992b. **Croissance en hauteur à long terme de la régénération préétablie dans des pessières noires boréales régénérées par marcottage, au Québec.** Can. J. For. Res. 22: 613-621.

- Peltola, H. et S. Kellomäki. 1993. **A mechanistic model for calculating windthrow and stem breakage of Scots Pines at stand edge.** *Silva Fenn.* 27: 99-111.
- Perron, J-Y. 1985. **Tarif de cubage général, volume marchand brut.** Ministère de l'Énergie et des Ressources. Gouvernement du Québec.
- Petty, J.A. et C. Swain. 1985. **Factors influencing stem breakage of conifers in high winds.** *Forestry* 58: 75-84.
- Petty, J.A. et R. Worrell. 1981. **Stability of coniferous tree stems in relation to damage by snow.** *Forestry* 54: 115-128.
- Plamondon, J.A. 1995. **Productivité et coût d'un système de récolte en bois courts dans une coupe partielle d'épinette noire.** FERIC, Communiqué Technique no Coupe Partielle-7, Pointe-Claire, Québec.
- Plonski, W.L. 1981. **Normal yield tables (metric) for major forest species of Ontario.** Forest Resources Group. Ontario Ministry of Natural Resources.
- Plusquellec, R. 1997. **Croissance juvénile du sapin baumier (*Abies balsamea* L.Mill.) après coupe à blanc mécanisée.** Mémoire de maîtrise. Faculté de foresterie et géomatique. Université Laval, Québec.
- Pominville, P. 1993. **Évolution quinquennale de la régénération protégée lors de récoltes par abattage manuel dans les sapinières.** *For. Chron.* 69: 569-578.
- Pothier, D., R. Doucet, J. Boily. 1995. **The effect of advance regeneration height on future yield of black spruce stands.** *Can. J. For. Res.* 25: 536-544.

- Pothier, D. et F. Savard. 1998. **Actualisation des tables de production pour les principales espèces forestières du Québec.** Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles, Québec.
- Pressler, M.R. 1864. **Das Gesetz der Stammbildung.** Arnoldische Buchhandlung, Leipzig.
- Roe, E.I. 1948. **Early seed production by balsam fir and white spruce.** J. For. 46: 529.
- Rice, W.R. 1989. **Analysing tables of statistical tests.** Evolution 43: 223-225.
- Richards, F.J. 1959. **A flexible growth function for empirical use.** J. Exp. Bot. 10: 290-300.
- Rondeux J. 1993. **La mesure des arbres et des peuplements forestiers.** Les Presses Agronomiques de Gembloux 1993.
- Ruel, J.-C. 1989. **Importance de la régénération préexistante dans les forêts publiques du Québec.** Ann. Sci. For. 46: 345-359.
- Ruel, J.-C., R. Doucet, J. Boily. 1995. **Mortality of balsam fir and black spruce advance growth 3 years after clear-cutting.** Can. J. For. Res. 25: 1528-1537.
- Ruel, J.-C. et R. Doucet. 1998. **Élaboration de classes de qualité pour les inventaires de régénération.** Note de rech. for. no. 91.
- Ruel, J.-C. et M. Huot. 1993. **Impact de la tordeuse des bourgeons de l'épinette [*Christoneura fumiferana* (Clem.)] sur la régénération des sapinières après la coupe à blanc.** For. Chron. 69: 163-172.

- Ruel, J.-C., F. Ouellet, R. Plusquellec et C.-H. Ung. 1998. **Évolution de la régénération de peuplements résineux et mélangés au cours des 30 années après coupe à blanc mécanisée.** For. Chron. 74: 428-443.
- SAS Institute Inc. 1988. **SAS/STAT User's guide, version 6,03.** Sas Institute Inc., Cary.
- Seidel, K.W. 1977. **Suppressed grand fir and Shasta red fir respond well to release.** USDA For. Serv. Pap. PNW-288.
- Seidel, K.W. 1980. **Diameter and height growth of suppressed grand fir saplings after overstory removal.** USDA For. Serv. Res. Pap. PNW-275.
- Shea, S.R. et K.A. Armson. 1972. **Stem analysis of jack pine (*Pinus banksiana* Lamb.): techniques and concepts.** Can. J. For. Res. 2: 392-406.
- Smith, D.M., B.C. Larson, M.J. Kelty, P.M.S. Ashton. 1997. **The practice of silviculture : applied forest ecology.** John Wiley & Sons, Inc., New York.
- Snellgrove, T.A., J.M. Cahill et T.M. Fahey. 1988. **Timber quality considerations for forest managers.** Dans : W.C. Schmidt. Proceedings – Future Forests of the mountain west : a stand culture symposium. Missoula, MT, September 29-October 3, 1986. General Tehnical Report INT-243.
- Spaulding, P. et J.R. Hansbrough. 1944. **Decay in balsam fir in New England and New York.** U.S. Dep. Agric. Tech. Bull. No. 872.
- Spurr, S. et B.V. Barnes. 1980. **Forest Ecology.** 3e ed. John Wiley and Sons, New York.

- Steventon, J.D., K.L. Mackenzie et T.E. Mahon. 1998. **Response of small mammals and birds to partial cutting and clearcutting in northwestern British Columbia.** For. Chron. 74: 703-712.
- Stillwell, M.A. 1956. **Pathological aspects of severe spruce budworm attack.** For. Sci. 2: 174-186.
- Tesch, S.D., K. Baker-Katz, E.J. Korpela, J.W. Mann. 1993. **Recovery of Douglas-fir seedlings and saplings wounded during overstory removal.** Can. J. For. Res. 23: 1684-1694.
- Thibault, D. 1993. **Modélisation de la mortalité du sapin baumier dans les sapinières éclaircies et défoliées par la tordeuse des bourgeons de l'épinette: une approche multivariée.** Mémoire de maîtrise, Faculté de foresterie et géomatique, Université Laval, Québec.
- Thibault, D., J. Bégin, L. Bélanger. 1995. **Relations entre des indicateurs de croissance du sapin baumier en début d'épidémie et sa vulnérabilité à la tordeuse des bourgeons de l'épinette.** Can. J. For. Res. 25: 1292-1302.
- Tremblay, S., J. Bégin et L. Bélanger. 1997. **Productivité de sapinières boréales de seconde venue en relation avec les caractéristiques des stations.** Gouv. du Québec, min. des Ress. nat., Dir. de la rech. for. Mémoire de recherche forestière no. 125.
- Tucker, G.F. et W.H. Emmingham. 1977. **Morphological changes in leaves of residual western hemlock after clear and shelterwood cutting.** For. Sci. 23: 195-203.
- Tucker, G.F., T.M. Hinckley, J. Leverenz, S. Jiang. 1987. **Adjustments of foliar morphology in the acclimation of understory pacific silver fir following clearcutting.** For. Ecol. Manage. 21: 249-268.

- Vézina, P.É. et A. Linteau. 1968. **Growth and yield of balsam fir and black spruce in Québec.** For. Res. Lab., Quebec Region, Inf. Rep. Q-X-2, Canada Dept. of Forestry and Rural Dev.
- Waring, R.H. et W.H. Schlesinger. 1985. **Forest ecosystems: concepts and management.** Academic Press, Orlando, FL.
- Waring, R.H., W.G. Thies et D. Muscato. 1980. **Stem growth per unit of leaf area: a measure of tree vigor.** For. Sci. 26: 112-117.
- Webb, L.S. 1957. **The growth and development of balsam fir in Gaspé.** Pulp. Paper Mag. Can. 58: 206-214.
- Zarnovican, R. 1981. **À propos de l'âge du sapin baumier et de sa détermination.** Can. J. For. Res. 11: 805-811.
- Zeide, B. 1993. **Analysis of growth equations.** For. Sci. 39: 594-616.

ANNEXE A. ANALYSES DE TIGES UTILISÉES DANS L'ANALYSE COMPARATIVE DES TIGES INDIVIDUELLES LIBRES DE CROÛTRE

Placette	Arbre	D ₁₀ (mm)	H ₁₀ (m)	Groupe	DHP ₁₉₉₀ (mm)	Hauteur ₁₉₉₀ (m)
1	1	40	3,8	Moyenne gaule	189	14,1
1	2	69	4,5	Moyenne gaule	184	15,4
1	3	52	4,5	Moyenne gaule	186	16,4
1	5	27	2,8	Petite gaule	190	15,6
1	7	191	11,1	Tige récoltable	312	14,9
1	9	33	2,9	Petite gaule	184	15,9
1	10	123	8,9	Tige récoltable	297	17,8
1	11	95	6,5	Grande gaule	292	14,8
1	12	134	7,8	Tige récoltable	342	16,4
1	13	0	1,0	Semis	183	14,1
1	15	3	1,5	Semis	214	15,6
1	16	158	12,1	Tige récoltable	296	19,3
1	17	53	4,2	Moyenne gaule	213	17,1
1	18	83	5,8	Grande gaule	222	16,2
1	19	15	1,9	Petite gaule	156	14,9
1	20	0	0,3	Semis	194	14,7
2	1	0	0,8	Semis	207	14,9
2	2	25	2,4	Petite gaule	160	15,3
2	3	20	2,5	Petite gaule	187	16,4
2	4	38	3,3	Moyenne gaule	192	15,6
2	5	0	0,4	Semis	153	13,1
2	6	22	2,4	Petite gaule	260	16,8
2	7	38	3,1	Moyenne gaule	188	14,8
2	8	8	1,9	Semis	211	15,4
2	9	13	1,9	Petite gaule	163	13,9
2	10	30	3,1	Moyenne gaule	190	15,9
2	12	0	1,0	Semis	260	16,9
2	13	0	0,9	Semis	191	14,8
2	14	17	2,2	Petite gaule	193	14,9
2	15	0	0,8	Semis	216	14,6
2	16	8	1,9	Semis	239	16,6
2	17	15	2,1	Petite gaule	217	14,1
3	1	84	6,7	Grande gaule	242	14,4
3	4	119	9,2	Tige récoltable	268	16,6
3	5	0	0,5	Semis	213	15,4
3	6	85	6,6	Grande gaule	261	16,9
3	8	0	1,2	Semis	203	15,6
3	9	0	0,7	Semis	205	13,3
3	10	50	3,1	Moyenne gaule	185	16,6
3	11	108	8,9	Grande gaule	270	18,6
3	12	0	0,7	Semis	198	16,1
3	13	117	8,6	Tige récoltable	299	19,4
3	16	33	2,9	Petite gaule	189	15,4
3	17	128	10,1	Tige récoltable	292	18,6
3	18	101	6,9	Grande gaule	245	15,4
3	19	0	0,9	Semis	216	16,1
3	21	99	6,1	Grande gaule	265	19,1
3	22	0	1,2	Semis	260	15,1
4	1	0	0,0	Semis	152	14,8
4	7	0	0,0	Semis	201	15,8
4	8	122	9,9	Tige récoltable	288	18,6
4	12	89	7,9	Grande gaule	218	17,1
4	13	17	1,9	Petite gaule	271	16,4
4	16	132	11,1	Tige récoltable	302	19,6
4	17	103	8,5	Grande gaule	300	19,9
4	18	94	7,2	Grande gaule	272	17,9
4	19	50	3,8	Moyenne gaule	200	18,0
4	20	96	5,3	Grande gaule	200	16,7
4	21	103	7,3	Grande gaule	230	16,3
4	22	87	9,2	Grande gaule	248	18,6
4	23	0	0,0	Semis	184	15,6
4	24	119	8,4	Tige récoltable	301	19,3
4	25	117	9,1	Tige récoltable	281	17,6

**Analyses de tiges utilisées dans l'analyse comparative des tiges individuelles libres de
croître (tiges provenant des placettes de semis)**

Placette	Arbre	D ₁₀ (mm)	H ₁₀ (m)	Groupe	DHP ₁₉₉₀ (mm)	Hauteur ₁₉₉₀ (m)
5	1	0	0,3	Semis	150	12,6
5	2	0	0,4	Semis	179	13,3
5	3	0	0,5	Semis	165	14,9
5	4	0	0,5	Semis	165	14,6
6	1	0	0,0	Semis	172	13,4
6	2	0	0,0	Semis	174	14,4
6	3	0	0,0	Semis	202	14,9
6	4	0	0,0	Semis	160	13,9
9	1	0	0,0	Semis	127	11,9
9	2	0	0,0	Semis	118	11,3
9	3	0	0,7	Semis	146	12,4
9	4	0	0,5	Semis	150	12,6
13	1	0	0,0	Semis	257	14,8
13	2	0	0,3	Semis	229	16,3
13	3	0	0,0	Semis	202	12,3
13	4	0	0,0	Semis	233	16,9

ANNEXE B. ANALYSES DE TIGES SUPPLÉMENTAIRES POUR ÉTABLIR LES TARIFS DE CUBAGE

Placette	Arbre	D ₁₀ (mm)	H ₁₀ (m)	Groupe	DHP ₁₉₀₀ (mm)	Hauteur ₁₉₀₀ (m)
1	25	28	2,1	Petite gaule	112	12,2
1	26	34	2,9	Petite gaule	135	7,9
1	28	84	5,4	Grande gaule	234	16,3
1	29	0	1,2	Semis	102	7,3
1	30	166	10,1	Tige récoltable	354	20,6
2	26	0	0,5	Semis	68	5,0
2	27	16	2,1	Petite gaule	136	12,5
2	28	19	2,3	Petite gaule	176	14,8
2	29	0	0,5	Semis	92	11,8
2	30	0	0,3	Semis	75	6,3
3	25	38	3,9	Moyenne gaule	132	15,3
3	26	27	2,3	Petite gaule	160	15,1
3	27	0	0,6	Semis	101	9,6
3	28	92	7,7	Grande gaule	330	19,3
3	29	0	1,2	Semis	135	12,4
4	6	0	0,0	Semis	194	13,3
4	40	0	0,0	Semis	129	10,2
4	41	0	0,0	Semis	67	5,3
4	42	0	0,3	Semis	121	10,9
4	43	0	0,0	Semis	87	8,1
5	1	0	1,0	Semis	251	13,4
5	2	0	0,5	Semis	199	14,4
5	3	0	0,0	Semis	59	6,7
5	4	0	0,5	Semis	106	10,1
5	5	0	0,4	Semis	193	13,9
5	6	0	0,5	Semis	97	12,3
5	7	0	0,0	Semis	42	3,7
5	8	0	0,4	Semis	208	14,3
5	9	0	1,0	Semis	126	11,9
6	1	0	0,0	Semis	202	14,1
6	2	0	0,0	Semis	222	15,6
6	3	0	0,0	Semis	70	6,3
6	4	0	0,0	Semis	144	11,9
6	5	0	0,0	Semis	104	9,6
6	6	0	0,3	Semis	118	12,3
6	7	0	0,0	Semis	101	10,2
6	8	0	0,0	Semis	45	3,8
6	9	0	0,0	Semis	113	10,9
7	1	0	0,4	Semis	138	11,4
7	2	0	0,0	Semis	166	13,1
7	3	0	1,1	Semis	121	8,0
7	4	41	3,2	Moyenne gaule	203	14,3
7	5	0	0,0	Semis	98	11,8
7	7	0	0,2	Semis	82	10,7
7	8	0	0,0	Semis	45	5,6
7	9	0	0,0	Semis	52	4,3
7	10	0	0,0	Semis	191	14,1
7	11	0	0,0	Semis	153	12,6
7	12	63	5,8	Grande gaule	217	13,9
9	1	0	0,0	Semis	100	9,6
9	2	0	0,0	Semis	135	10,6
9	3	0	0,8	Semis	163	13,4
9	4	0	0,4	Semis	195	13,4
9	5	0	0,6	Semis	121	12,6
9	6	0	0,5	Semis	152	11,9
10	1	0	0,5	Semis	109	11,6
10	2	0	0,6	Semis	81	10,4
10	3	0	0,0	Semis	100	10,6
10	4	0	0,6	Semis	158	11,6
10	5	0	0,6	Semis	128	12,6
10	6	0	0,0	Semis	118	11,6
10	7	49	4,7	Moyenne gaule	224	13,3
10	8	0	0,0	Semis	95	7,7
10	9	0	0,0	Semis	188	14,9

Suite annexe B

Placette	Arbre	D ₁₀ (mm)	H ₁₀ (m)	Groupe	DHP ₁₉₈₀ (mm)	Hauteur ₁₉₈₀ (m)
11	1	0	0,8	Semis	229	14,1
11	2	0	0,0	Semis	119	12,4
11	3	0	0,5	Semis	155	14,6
11	4	0	0,6	Semis	155	13,9
11	5	0	0,0	Semis	111	12,1
11	6	1	1,4	Semis	197	14,1
11	7	0	0,6	Semis	225	16,3
11	8	0	0,5	Semis	139	12,1
11	9	0	1,3	Semis	173	14,6
11	10	0	0,7	Semis	200	14,3
12	1	3	1,5	Semis	141	13,3
12	2	0	0,0	Semis	191	14,6
12	3	0	0,0	Semis	156	13,8
12	4	0	0,0	Semis	177	14,1
12	5	0	0,0	Semis	143	12,4
12	6	16	1,8	Petite gaule	99	9,9
12	7	0	0,0	Semis	77	8,6
12	8	8	1,7	Semis	217	15,6
12	9	0	0,0	Semis	129	12,3
12	10	167	12,5	Tige récoltable	329	18,4
12	11	52	3,7	Moyenne gaule	283	15,3
12	12	238	16,5	Tige récoltable	272	16,7
14	1	0	0,0	Semis	210	13,3
14	2	0	0,0	Semis	140	10,6
14	3	0	0,3	Semis	125	11,1
14	4	0	0,0	Semis	76	6,3
14	5	0	0,0	Semis	96	9,0
14	6	0	0,0	Semis	163	13,1
14	7	0	0,5	Semis	188	14,4
14	8	0	0,5	Semis	172	10,3
14	9	0	1,2	Semis	126	12,3
15	1	97	8,1	Grande gaule	248	15,8
15	2	25	2,4	Petite gaule	95	12,0
15	4	0	0,0	Semis	235	13,2
15	5	51	3,8	Moyenne gaule	183	14,3
15	6	0	0,0	Semis	103	8,3
15	7	0	0,5	Semis	155	14,1
15	8	0	0,2	Semis	71	5,4
15	9	0	0,6	Semis	169	13,2
15	10	0	0,4	Semis	195	16,3
15	11	0	0,0	Semis	119	13,1
15	12	0	0,0	Semis	44	4,3
15	13	58	5,0	Grande gaule	225	16,6
16	1	9	1,9	Semis	148	13,6
16	2	4	1,5	Semis	175	13,9
16	3	15	1,9	Petite gaule	133	12,6
16	4	4	1,6	Semis	104	11,4
16	5	25	2,7	Petite gaule	138	13,8
16	6	25	2,7	Petite gaule	172	13,8
16	7	18	2,3	Petite gaule	201	14,4
16	8	0	0,5	Semis	79	8,8

ANNEXE C. ANALYSES DE TIGES RÉCOLTÉES EN 1990 ET 1992

Année	Placette	Arbre	D ₁₀ (mm)	H ₁₀ (m)	Groupe	DRP ₁₉₉₀ (mm)	Hauteur ₁₉₉₀ (m)
1990	3	1	121	9,7	Tige récoltable	282	18,0
1990	3	2	0	0,9	Semis	186	14,9
1990	3	7	62	4,9	Moyenne gaule	303	17,1
1990	3	8	55	4,5	Moyenne gaule	253	16,9
1990	3	9	0	0,0	Semis	164	13,8
1990	3	10	14	1,9	Petite gaule	176	13,0
1990	3	11	26	2,5	Petite gaule	207	14,7
1990	3	12	0	0,6	Semis	183	14,4
1990	3	13	65	4,6	Moyenne gaule	190	16,6
1990	3	16	4	1,4	Semis	224	17,2
1990	4	1	120	8,7	Tige récoltable	309	18,9
1990	4	2	91	7,5	Grande gaule	211	17,8
1990	4	3	105	8,4	Grande gaule	259	16,2
1990	4	5	54	4,8	Moyenne gaule	311	17,2
1990	4	8	110	11,1	Grande gaule	298	19,8
1990	4	10	106	9,8	Grande gaule	328	18,7
1990	4	14	0	0,6	Semis	173	14,7
1990	10	1	0	1,0	Semis	195	12,7
1990	10	4	0	1,0	Semis	143	11,9
1990	10	5	0	0,6	Semis	154	12,7
1990	10	7	0	0,6	Semis	128	11,1
1990	10	8	0	1,1	Semis	202	15,5
1990	10	10	0	0,6	Semis	180	13,1
1990	14	1	21	2,5	Petite gaule	251	15,7
1990	14	4	14	2,1	Petite gaule	172	14,3
1990	14	12	0	0,7	Semis	228	14,1
1990	14	13	20	2,3	Petite gaule	271	15,9
1990	14	14	3	1,5	Semis	307	16,6
1990	14	15	0	0,5	Semis	185	14,9
1990	14	17	76	4,9	Moyenne gaule	241	15,4
1992	1	33	127	9,8	Tige récoltable	304	19,8
1992	1	34	52	4,5	Moyenne gaule	147	11,6
1992	1	35	8	1,6	Semis	154	15,4
1992	1	36	55	4,1	Moyenne gaule	229	16,5
1992	2	5	32	2,6	Petite gaule	268	16,1
1992	2	6	15	2,1	Petite gaule	187	16,1
1992	2	7	12	1,9	Petite gaule	157	15,1
1992	3	79	0	0,6	Semis	84	9,0
1992	4	77	0	0,0	Semis	104	6,5
1992	4	78	0	0,0	Semis	152	13,1
1992	5	80	0	1,0	Semis	234	15,3
1992	5	81	0	0,5	Semis	157	14,5
1992	5	82	0	0,6	Semis	68	6,7
1992	5	83	0	0,0	Semis	126	12,5
1992	6	8	0	0,0	Semis	252	15,1
1992	6	9	0	0,0	Semis	181	15,1
1992	6	11	0	0,0	Semis	68	7,2
1992	6	12	0	0,0	Semis	141	12,3
1992	7	45	0	0,6	Semis	204	14,7
1992	7	46	0	0,0	Semis	157	12,4
1992	7	47	0	0,0	Semis	112	11,1
1992	7	48	0	0,0	Semis	98	8,6
1992	9	25	0	0,6	Semis	168	11,4
1992	9	26	0	0,0	Semis	124	11,2
1992	9	27	0	0,0	Semis	79	9,7
1992	9	28	0	0,0	Semis	73	8,2
1992	10	10	0	0,0	Semis	79	8,8
1992	11	88	0	0,6	Semis	252	16,7
1992	11	89	0	0,6	Semis	186	15,9
1992	11	90	6	1,6	Semis	140	15,2
1992	11	91	0	0,0	Semis	100	11,3
1992	12	0	0	0,3	Semis	112	12,9
1992	12	1	0	0,0	Semis	83	9,9
1992	12	98	0	0,0	Semis	244	15,5
1992	12	99	0	0,0	Semis	173	13,9
1992	14	33	0	0,5	Semis	86	8,9
1992	14	34	9	1,7	Semis	133	13,3
1992	15	2	0	0,0	Semis	123	11,6
1992	15	3	0	0,0	Semis	66	5,4
1992	15	96	0	0,6	Semis	223	15,3
1992	15	97	0	0,6	Semis	165	14,3
1992	16	49	33	2,9	Petite gaule	222	15,1

ANNEXE D. RÉSULTATS DES MODÉLISATIONS, ARBRE PAR ARBRE, DES DIMENSIONS DENDROMÉTRIQUES APRÈS COUPE

Les pages suivantes présentent les résultats des régressions non-linéaires pour les tiges utilisées dans le chapitre 3. Les statistiques associées aux régressions pour chacun des arbres sont présentées sous forme de tableau. Les équations générées sont de la forme suivante :

$$Y = b_{00} \exp (b_0 A) + a_0 [1 - \exp (a_1 A)]^{a_2}$$

$$\text{où } A = AN + X_1 c_1 + X_2 c_2 - X_0$$

AN = nombre d'années après la coupe (année - 1943)

X_0 = nombre d'années établies après coupe

$X_1 = 1$ pour les années entre les deux périodes TBÉ (sinon = 0)

$X_2 = 1$ pour les années après la deuxième période TBÉ (sinon = 0)

$a_0, a_1, a_2, b_{00}, b_0, c_1, c_2$ = coefficients de la régression

Voici la légende : H_{\min} : hauteur minimum (m)

H_{\max} : hauteur maximum (m)

D_{\min} : diamètre séché sans écorce minimum (mm)

D_{\max} : diamètre séché sans écorce maximum (mm)

V_{\min} : volume séché sans écorce minimum (dm³)

V_{\max} : volume séché sans écorce maximum (dm³)

S_{\min} : surface cambiale séché (dm²)

S_{\max} : hauteur maximale (dm²)

SSE : somme carrée des erreur

À noter que, pour la modélisation arbre par arbre, les données de 1991 ont été utilisées. La dimension maximale correspond donc à l'année 1991. La dimension minimale correspond à la dimension lors de la coupe ou la dimension lors de la première apparition pour les tiges postétablies.

Résultat de la modélisation, par arbre, de la hauteur totale après coupe

Placette	Arbre	a_0	a_1	a_2	b_{00}	b_0	H_{min}	H_{max}	SSE	x_0	c_1	c_2
1	1	15,2	-0,042	1,84	4,02	0,0000	3,83	14,38	0,22	0	-0,1	-7,7
1	2	17,9	-0,033	1,56	4,79	0,0000	4,50	15,55	0,47	0	-1,2	-8,7
1	3	6,8	-0,106	3,85	4,85	0,0189	4,50	16,59	0,42	0	-1,7	-8,3
1	5	6,6	-0,124	3,62	2,85	0,0278	2,75	15,88	0,20	0	0,2	-5,1
1	7	4,4	-0,109	8,42	11,24	0,0000	11,14	14,98	0,24	0	-3,4	-11,1
1	9	17,1	-0,040	1,69	3,04	0,0079	2,88	16,07	0,21	0	-0,2	-6,9
1	10	2,6	-0,133	8,88	9,01	0,0138	8,88	17,92	0,15	0	-2,1	-8,7
1	11	2,8	-0,207	17,64	6,90	0,0166	6,50	14,92	0,40	0	-1,5	-13,3
1	12	7,2	-0,056	1,98	8,12	0,0087	7,75	16,46	0,70	0	-1,6	-11,1
1	13	20,6	-0,038	1,73	1,06	0,0000	1,00	14,38	0,35	0	0,8	-8,8
1	15	19,0	-0,056	2,89	1,63	0,0069	1,52	15,88	0,62	0	-1,4	-7,6
1	16	3,2	-0,060	2,30	12,17	0,0076	12,08	19,42	0,05	0	-1,0	-5,4
1	17	16,4	-0,046	1,85	4,53	0,0086	4,17	17,25	0,98	0	-2,6	-11,1
1	18	14,3	-0,039	1,22	5,99	0,0000	5,75	16,31	0,99	0	-0,5	-10,8
1	19	11,6	-0,080	2,80	2,03	0,0198	1,93	15,09	0,22	0	-0,8	-6,4
1	20	16,6	-0,075	2,76	0,37	0,0000	0,33	14,75	0,41	0	-1,4	-7,7
2	1	17,6	-0,059	2,39	0,81	0,0000	0,76	15,10	0,35	0	0,8	-6,5
2	2	13,9	-0,065	2,22	2,62	0,0084	2,38	15,42	0,27	0	-1,0	-7,5
2	3	12,6	-0,069	2,36	2,81	0,0184	2,50	16,59	0,33	0	-0,5	-8,2
2	4	12,8	-0,049	2,11	3,75	0,0142	3,25	15,75	0,65	0	0,1	-7,7
2	5	17,8	-0,052	2,21	0,45	0,0000	0,41	13,38	0,17	0	-0,9	-9,3
2	6	9,2	-0,125	4,21	2,42	0,0296	2,36	16,92	0,26	0	-1,1	-7,2
2	7	6,6	-0,125	4,29	3,20	0,0269	3,08	14,92	0,17	0	-0,7	-10,8
2	8	7,9	-0,102	2,75	1,97	0,0382	1,88	15,75	0,24	0	-0,7	-10,1
2	9	12,1	-0,072	2,50	2,02	0,0155	1,94	14,07	0,27	0	-1,2	-8,5
2	10	20,9	-0,030	1,51	3,23	0,0045	3,13	16,06	0,20	0	0,3	-7,3
2	12	20,6	-0,053	2,43	1,21	0,0104	1,00	17,13	0,18	0	-0,2	-7,2
2	13	18,2	-0,058	2,26	1,07	0,0016	0,93	15,08	0,24	0	-1,3	-10,3
2	14	15,3	-0,058	2,57	2,35	0,0120	2,21	15,13	0,17	0	-0,9	-9,5
2	15	10,5	-0,110	4,82	0,91	0,0406	0,83	14,88	0,28	0	-0,4	-6,7
2	16	17,5	-0,060	2,55	2,03	0,0163	1,88	16,88	0,20	0	-1,0	-10,5
2	17	11,9	-0,082	2,62	2,41	0,0112	2,13	14,38	0,51	0	-0,5	-9,1
3	1	8,7	-0,059	4,90	6,80	0,0098	6,72	14,63	0,31	0	-1,7	-11,1
3	4	5,7	-0,087	6,15	9,14	0,0074	9,16	16,75	0,06	0	-1,5	-9,5
3	5	19,9	-0,043	1,86	0,51	0,0438	0,51	15,75	0,30	0	-3,3	-10,6
3	6	24,2	-0,018	1,19	6,58	0,0000	6,58	17,13	0,38	0	-1,3	-10,7
3	8	12,4	-0,089	3,35	1,24	0,0299	1,24	15,75	0,08	0	-0,3	-6,0
3	9	19,9	-0,038	1,85	0,84	0,0095	0,68	13,63	0,35	0	-0,7	-8,7
3	10	21,8	-0,030	1,43	3,17	0,0031	3,13	16,75	0,20	0	-0,4	-7,7
3	11	6,0	-0,021	0,67	8,82	0,0111	8,88	18,75	0,15	0	2,6	-3,8
3	12	13,0	-0,081	2,44	0,76	0,0422	0,69	16,25	0,14	0	-0,4	-6,5
3	13	2,9	-0,144	7,86	8,80	0,0171	8,63	19,63	0,40	0	-1,6	-9,7
3	16	14,7	-0,058	2,37	3,03	0,0115	2,89	15,60	0,35	0	-2,5	-10,6
3	17	22,3	-0,022	2,13	10,13	0,0033	10,11	18,88	0,18	0	-0,5	-7,8
3	18	1,2	-0,409	466,04	7,12	0,0179	6,92	15,63	0,17	0	-1,6	-8,5
3	19	25,2	-0,034	1,53	1,02	0,0000	0,85	16,38	0,47	0	-1,9	-9,1
3	21	8,2	-0,088	3,39	6,19	0,0149	6,08	19,25	0,12	0	-0,1	-5,1
3	22	10,8	-0,073	2,50	1,20	0,0443	1,21	15,38	0,30	0	-0,6	-10,5
4	1	18,0	-0,063	2,22	0,35	0,0000	0,28	14,92	0,41	1	-3,0	-7,9
4	7	22,9	-0,044	1,68	0,21	0,0000	0,33	15,92	0,47	3	-2,2	-7,6
4	8	3,0	-0,166	20,20	9,94	0,0119	9,88	18,83	0,11	0	-1,2	-8,2
4	12	2,8	-0,141	4,40	7,93	0,0169	7,88	17,25	0,35	0	-3,0	-12,0
4	13	9,2	-0,132	4,21	1,94	0,0342	1,94	16,63	0,34	0	-0,9	-7,9
4	16	1,8	-0,328	359,10	11,22	0,0118	11,13	19,88	0,07	0	-0,3	-8,2
4	17	6,5	-0,073	3,21	8,63	0,0140	8,50	20,13	0,17	0	-2,3	-9,1
4	18	3,1	-0,207	42,38	7,24	0,0177	7,21	18,13	0,07	0	-1,3	-6,6
4	19	12,2	-0,066	1,87	3,92	0,0153	3,83	18,20	0,17	0	-0,8	-6,3
4	20	8,5	-0,094	3,03	5,49	0,0124	5,30	16,76	0,31	0	-1,3	-8,4
4	21	3,3	-0,143	13,79	7,30	0,0171	7,31	16,58	0,08	0	-0,5	-12,2
4	22	6,8	-0,115	10,56	9,15	0,0090	9,18	18,88	0,18	0	-2,2	-10,6
4	23	19,4	-0,065	2,57	0,55	0,0044	0,33	15,75	0,42	0	-1,7	-11,0
4	24	4,5	-0,131	5,87	8,52	0,0139	8,42	19,42	0,19	0	-2,4	-6,6
4	25	3,2785	-0,149	18,91	9,03	0,0118	9,05	17,75	0,06	0	0,0	-7,3

Résultat de la modélisation, par arbre, du diamètre séché sans écorce après coupe

Piaccette	Arbre	a_0	a_1	a_2	b_{00}	b_0	D_{min}	D_{max}	SSE	x_0	c_1	c_2
1	1	158,7	-0,050	1,230	36,25	0,000	35,92	170,78	13,6	0	-2,0	-5,6
1	2	71,6	-0,066	0,897	61,75	0,011	62,08	167,12	2,8	0	-0,7	-4,6
1	3	186,1	-0,030	1,287	48,60	0,000	47,07	169,36	36,8	0	-0,5	-6,5
1	5	123,0	-0,045	1,345	24,80	0,023	24,51	174,05	1,7	0	-0,7	-1,6
1	7	130,1	-0,056	1,644	174,96	0,000	172,34	281,93	27,1	0	-1,9	-8,0
1	9	209,1	-0,030	1,160	31,20	0,000	29,76	166,81	31,5	0	-0,4	-8,1
1	10	188,3	-0,046	1,103	111,29	0,000	111,08	270,24	50,9	0	-1,6	-6,0
1	11	207,3	-0,059	1,798	87,83	0,000	85,79	264,38	20,3	0	-1,6	-5,7
1	12	212,0	-0,057	1,457	122,64	0,000	120,96	309,82	15,5	0	-1,0	-4,3
1	13	170,8	-0,080	1,545	0,08	0,114	0,00	166,66	47,7	2	-1,9	-6,5
1	15	181,2	-0,065	2,087	4,02	0,046	2,99	195,69	7,4	0	-0,5	-2,1
1	16	112,1	-0,048	0,999	142,53	0,004	142,79	268,97	7,0	0	-1,6	-5,9
1	17	98,7	-0,042	0,855	46,91	0,020	47,46	194,53	9,9	0	-0,7	-5,0
1	18	404,9	-0,008	0,882	74,48	0,000	74,38	201,22	14,0	0	-1,4	-7,7
1	19	121,4	-0,076	1,562	13,70	0,014	13,11	141,68	17,2	0	-1,5	-2,2
1	20	198,4	-0,055	1,328	0,05	0,116	0,00	177,18	20,4	5	-0,6	-2,1
2	1	179,8	-0,110	1,834	0,25	0,101	0,00	188,45	19,7	4	-1,3	-4,7
2	2	156,8	-0,041	1,076	23,57	0,000	22,64	144,89	29,1	0	-0,3	-9,2
2	3	216,0	-0,031	1,069	18,51	0,000	17,91	169,99	20,2	0	-1,1	-6,3
2	4	149,4	-0,037	0,889	34,32	0,009	34,64	174,95	6,6	0	-0,8	-3,6
2	5	141,1	-0,077	1,406	0,06	0,128	0,00	139,69	1,9	5	-1,3	-4,1
2	6	226,8	-0,059	1,759	21,78	0,012	20,18	236,48	9,1	0	-0,3	-3,9
2	7	181,1	-0,038	1,203	36,07	0,000	34,42	170,71	25,4	0	0,0	-7,9
2	8	205,5	-0,056	1,373	8,77	0,000	7,40	192,03	14,0	0	-0,4	-3,2
2	9	136,6	-0,090	1,906	13,22	0,006	11,80	147,55	7,9	0	-1,1	-6,3
2	10	123,7	-0,060	1,276	27,96	0,015	27,47	172,67	3,6	0	-0,7	-0,7
2	12	203,9	-0,113	3,280	1,54	0,069	0,00	236,94	36,1	1	-0,7	-0,8
2	13	184,2	-0,063	1,705	0,07	0,117	0,00	174,62	12,9	2	-1,3	-2,6
2	14	169,1	-0,054	1,576	16,65	0,014	15,62	175,30	6,7	0	-1,1	-4,6
2	15	216,0	-0,057	1,486	0,26	0,086	0,00	197,77	4,7	5	0,7	-1,0
2	16	155,3	-0,118	2,966	10,33	0,041	7,31	217,63	59,1	0	-0,5	-3,1
2	17	214,0	-0,058	1,560	16,57	0,000	13,92	197,07	32,9	0	-1,7	-8,0
3	1	180,8	-0,052	1,811	76,51	0,000	75,37	219,08	15,1	0	-1,9	-7,0
3	4	78,4	-0,085	1,413	107,74	0,010	107,34	243,20	13,3	0	-0,1	-4,4
3	5	194,6	-0,054	1,290	0,34	0,113	0,00	196,18	20,4	4	-1,9	-4,0
3	6	113,0	-0,076	1,154	76,73	0,012	76,41	237,33	16,9	0	-0,9	-5,4
3	8	170,7	-0,079	1,813	0,48	0,096	0,00	185,77	44,9	2	-1,0	-4,2
3	9	232,7	-0,051	1,366	0,00	0,928	0,00	186,64	7,0	3	-1,4	-7,5
3	10	168,5	-0,036	1,103	46,35	0,000	45,38	167,65	13,5	0	-0,9	-9,1
3	11	164,9	-0,042	1,082	97,98	0,002	97,47	244,61	7,6	0	-0,7	-4,2
3	12	180,7	-0,073	1,594	0,08	0,120	0,00	180,30	4,3	3	-0,6	-2,4
3	13	185,5	-0,055	1,405	106,91	0,000	105,82	270,91	14,7	0	-0,8	-3,4
3	16	177,4	-0,059	1,879	30,82	0,000	29,37	170,96	30,5	0	-2,0	-10,4
3	17	101,0	-0,062	1,248	115,68	0,009	115,64	265,47	10,2	0	-1,0	-3,8
3	18	144,8	-0,061	1,295	92,08	0,000	91,09	221,96	17,3	0	-0,4	-6,5
3	19	188,9	-0,074	1,606	0,55	0,089	0,00	197,25	7,6	1	-1,3	-5,4
3	21	162,8	-0,063	1,721	90,50	0,001	89,33	240,78	14,8	0	-0,2	-4,5
3	22	251,6	-0,077	1,929	0,18	0,076	0,00	235,90	5,0	2	-0,6	-4,5
4	1	166,7	-0,035	1,038	0,21	0,108	0,00	140,50	35,3	5	-1,1	-2,6
4	7	195,7	-0,071	1,398	0,06	0,137	0,00	183,34	3,8	7	-0,9	-4,9
4	8	83,7	-0,103	2,500	111,13	0,011	109,77	261,38	13,2	0	-1,0	-4,8
4	12	111,7	-0,086	1,573	81,09	0,002	80,58	197,02	4,3	0	-0,6	-4,6
4	13	188,1	-0,110	2,886	15,97	0,030	15,33	245,69	22,1	0	-1,3	-2,8
4	16	121,8	-0,064	1,260	120,27	0,006	119,35	273,72	10,7	0	-1,1	-3,2
4	17	90,7	-0,119	2,153	93,36	0,016	93,02	272,43	8,5	0	-1,8	-5,7
4	18	97,3	-0,086	1,588	84,52	0,015	84,83	247,40	4,7	0	-1,9	-7,9
4	19	133,2	-0,033	0,983	45,11	0,014	44,82	182,17	6,0	0	-0,7	-5,2
4	20	120,6	-0,045	1,385	87,99	0,000	86,53	180,98	12,7	0	-1,0	-7,5
4	21	61,2	-0,107	2,462	93,46	0,011	92,61	209,24	8,0	0	-1,4	-5,4
4	22	94,1	-0,110	4,317	78,43	0,013	77,98	225,16	8,0	0	-1,4	-4,8
4	23	225,3	-0,048	1,442	1,47	0,000	0,00	167,33	21,5	5	-1,4	-7,6
4	24	130,1	-0,084	1,729	108,25	0,008	107,50	272,91	7,4	0	-0,9	-6,3
4	25	93,121	-0,127	2,876	106,74	0,010	105,31	254,76	12,132	0	-1,0	-4,4

Résultat de la modélisation, par arbre, du volume brut séché après coupe

Placette	Arbre	a_0	a_1	a_2	b_{00}	b_0	V_{min}	V_{max}	SSE	x_0	c_1	c_2
1	1	251.0	-0.040	2,609	4.14	0.025	2.35	153.62	80.4	0	-2.8	-6.6
1	2	702.0	-0.009	1,433	8.65	0.037	6.93	169.31	19.7	0	-1.6	-5.3
1	3	141.5	-0.072	4,466	5.91	0.060	4.18	186.06	19.3	0	-2.2	-6.0
1	5	1538.5	-0.012	2,435	0.99	0.032	0.97	184.82	6.1	0	-0.9	-3.4
1	7	410.6	-0.054	2,312	147.95	0.006	137.85	497.99	444.7	0	-3.0	-7.5
1	9	228.2	-0.057	3,957	3.10	0.026	1.46	166.81	22.3	0	-1.7	-5.4
1	10	765.9	-0.023	1,530	59.84	0.010	56.42	456.19	65.7	0	-2.1	-5.5
1	11	530.1	-0.050	2,974	24.42	0.016	19.96	406.51	261.1	0	-2.5	-5.5
1	12	1019.2	-0.028	1,812	45.28	0.014	41.31	629.41	97.5	0	-1.3	-4.2
1	13	227.8	-0.057	3,988	0.75	0.045	0.10	146.74	24.6	2	-1.7	-7.1
1	15	617.0	-0.037	4,601	0.49	0.054	0.19	227.83	3.2	0	-1.4	-3.8
1	16	3688.7	-0.003	0,898	88.94	-0.068	90.31	521.57	99.6	0	-1.8	-4.5
1	17	1178.5	-0.012	2,029	6.07	0.055	3.82	251.17	30.3	0	-1.7	-5.4
1	18	512.4	-0.029	2,111	14.61	0.021	10.25	272.89	83.6	0	-2.3	-6.6
1	19	147.5	-0.057	3,851	0.88	0.048	0.48	116.27	2.0	0	-0.9	-2.6
1	20	351.9	-0.048	3,971	0.70	0.030	0.05	184.96	12.7	5	-0.3	-3.6
2	1	224.2	-0.069	3,800	0.59	0.088	0.22	188.90	4.9	4	-1.0	-5.4
2	2	152.9	-0.071	4,479	2.41	0.006	0.86	124.63	17.4	0	-2.0	-5.9
2	3	290.2	-0.050	3,820	1.90	0.020	0.71	182.36	18.4	0	-2.0	-5.2
2	4	242.5	-0.040	2,697	4.14	0.050	2.19	178.88	21.4	0	-1.7	-4.8
2	5	173.3	-0.046	3,213	0.29	0.077	0.07	98.58	1.0	5	-1.3	-5.6
2	6	594.9	-0.047	3,934	1.51	0.029	0.92	346.80	10.0	0	-0.5	-4.4
2	7	211.2	-0.058	3,878	3.16	0.055	1.89	174.47	9.5	0	-1.5	-7.2
2	8	343.7	-0.048	3,585	1.19	0.023	0.39	223.25	9.3	0	-0.7	-3.5
2	9	142.8	-0.070	4,479	0.99	0.021	0.46	111.68	5.6	0	-1.5	-7.2
2	10	467.8	-0.024	2,310	1.74	0.039	1.21	191.55	8.7	0	-0.7	-1.9
2	12	625.5	-0.047	4,592	0.28	0.024	0.13	337.27	19.1	1	-0.2	-3.0
2	13	379.8	-0.043	4,291	0.53	0.031	0.06	182.60	11.2	2	-0.9	-3.7
2	14	341.7	-0.044	3,947	1.40	0.025	0.78	180.82	13.3	0	-1.5	-5.4
2	15	441.1	-0.041	3,558	0.47	0.038	0.13	208.89	6.0	5	-0.1	-2.9
2	16	736.1	-0.032	3,344	0.41	-0.385	0.21	300.92	24.0	0	-0.1	-3.0
2	17	255.2	-0.075	5,106	2.08	0.019	0.67	205.93	40.7	0	-2.3	-6.5
3	1	337.2	-0.043	2,663	20.85	0.017	18.83	243.27	102.8	0	-2.8	-7.5
3	4	112.4	-0.079	2,220	42.67	0.041	41.12	350.22	28.2	0	-1.0	-5.5
3	5	3537.8	-0.013	3,016	0.82	0.074	0.08	227.73	13.1	4	-2.1	-5.9
3	6	221.3	-0.045	1,740	18.78	0.051	17.44	325.11	25.2	0	-1.3	-5.9
3	8	534.6	-0.032	3,468	0.56	0.038	0.18	188.95	6.5	2	-0.7	-4.6
3	9	276.7	-0.058	4,340	0.92	0.037	0.15	167.81	13.0	3	-2.2	-7.2
3	10	232.4	-0.049	3,070	5.01	0.025	3.24	163.14	17.2	0	-1.8	-7.2
3	11	773.6	-0.019	1,382	39.21	0.008	37.07	402.21	24.9	0	-0.7	-4.2
3	12	343.8	-0.046	3,673	0.29	0.105	0.09	214.96	12.2	3	-0.5	-3.3
3	13	722.5	-0.029	1,790	39.84	0.025	37.35	521.41	63.8	0	-1.0	-4.2
3	16	221.4	-0.077	5,660	3.06	0.025	1.42	177.03	79.7	0	-3.2	-8.0
3	17	351.7	-0.021	1,262	57.91	0.034	57.54	447.31	34.4	0	-1.1	-4.1
3	18	423.9	-0.030	1,687	26.62	0.012	24.55	291.86	19.4	0	-1.1	-4.6
3	19	963.9	-0.023	2,974	0.35	0.039	0.11	232.60	15.2	1	-1.5	-5.9
3	21	322.1	-0.064	3,407	24.83	0.039	22.18	394.34	57.9	0	-1.2	-4.3
3	22	453.0	-0.056	4,250	0.83	-0.006	0.17	289.11	20.4	2	-1.1	-4.7
4	1	487.2	-0.032	4,186	0.90	0.059	0.04	124.55	9.4	5	-0.2	-3.8
4	7	528.8	-0.036	3,081	0.31	0.092	0.09	196.34	4.7	7	-1.3	-5.9
4	8	296.7	-0.057	2,666	50.35	0.039	47.79	507.22	107.3	0	-1.2	-4.5
4	12	272.7	-0.046	1,875	21.68	0.016	20.12	243.23	26.5	0	-1.1	-5.9
4	13	320.9	-0.081	5,877	0.85	0.100	0.51	345.78	28.2	0	-1.2	-3.5
4	16	633.5	-0.021	1,373	61.16	0.029	59.03	542.19	46.1	0	-1.1	-3.9
4	17	790.1	-0.019	1,546	28.25	0.045	29.21	513.75	68.1	0	-1.7	-5.5
4	18	692.3	-0.018	1,645	23.17	0.048	22.44	392.61	150.8	0	-2.6	-7.9
4	19	639.9	-0.024	2,377	5.39	0.046	3.69	250.15	19.9	0	-1.2	-5.7
4	20	281.6	-0.053	2,927	19.84	0.011	16.88	226.81	67.9	0	-1.9	-7.2
4	21	609.4	-0.024	2,069	28.36	0.016	27.22	289.54	65.4	0	-1.9	-5.9
4	22	518.9	-0.040	2,983	25.41	0.021	24.27	341.67	25.7	0	-1.6	-5.5
4	23	280.1	-0.064	4,931	0.08	-25.802	0.07	169.04	39.0	5	-1.5	-6.4
4	24	1630.4	-0.015	1,606	41.33	0.012	39.53	552.93	74.5	0	-1.1	-6.0
4	25	203.4	-0.086	3,252	42.08	0.041	40.01	426.68	54.6	0	-1.5	-5.2

Résultat de la modélisation, par arbre, de la surface cambiale séchée après coupe

Placette	Arbre	a_0	a_1	a_2	b_{00}	b_0	S_{min}	S_{max}	SSE	x_0	c_1	c_2
1	1	668	-0,040	2,105	36,56	0,010	29,5	470,2	519,7	0	-2,3	-7,3
1	2	2266	-0,007	1,067	61,74	-0,109	54,3	521,1	321,8	0	-1,6	-6,3
1	3	439	-0,066	3,286	51,16	0,034	42,0	558,6	312,7	0	-1,9	-6,4
1	5	1269	-0,022	2,035	17,74	0,028	15,9	547,1	42,5	0	-0,3	-3,4
1	7	599	-0,041	1,838	419,82	0,004	404,9	872,9	1501,5	0	-3,3	-8,5
1	9	549	-0,063	3,339	29,98	0,027	20,3	523,6	308,3	0	-1,4	-5,7
1	10	1901	-0,013	0,892	217,25	-0,116	217,5	881,1	184,6	0	-2,2	-6,2
1	11	819	-0,055	2,595	125,57	0,009	110,6	788,9	1329,1	0	-2,5	-6,8
1	12	1370	-0,030	1,511	183,68	0,002	171,7	1020,0	592,8	0	-1,7	-5,6
1	13	666	-0,052	2,701	6,86	0,015	3,4	460,8	246,6	2	-1,3	-7,4
1	15	1095	-0,042	3,602	7,23	0,034	5,0	605,8	63,4	0	-1,6	-4,8
1	16	2157	-0,012	0,865	327,17	-0,058	327,9	1009,1	281,5	0	-1,7	-4,6
1	17	854	-0,032	1,958	50,12	0,035	38,9	663,3	493,9	0	-2,6	-7,1
1	18	1268	-0,025	1,482	84,84	-0,011	72,5	685,6	950,3	0	-1,9	-7,5
1	19	523	-0,055	2,899	12,04	0,017	9,4	426,0	35,2	0	-0,7	-3,6
1	20	828	-0,048	2,551	5,25	0,016	1,9	531,5	176,1	5	-1,1	-5,2
2	1	654	-0,061	2,593	6,62	0,038	4,8	532,0	47,5	4	-0,7	-5,8
2	2	498	-0,068	3,309	22,12	0,018	13,5	448,1	341,9	0	-1,7	-6,7
2	3	710	-0,052	2,943	20,71	0,023	12,7	558,5	231,1	0	-1,5	-5,7
2	4	784	-0,034	2,057	35,57	0,021	25,2	533,9	475,2	0	-1,3	-5,8
2	5	567	-0,047	2,376	4,92	0,016	2,4	366,4	30,8	5	-1,3	-6,3
2	6	1092	-0,047	2,876	16,57	0,015	13,9	763,7	68,3	0	-0,4	-4,8
2	7	523	-0,062	3,217	30,45	0,033	23,7	515,5	165,5	0	-1,2	-7,6
2	8	842	-0,046	2,625	12,50	0,016	7,7	591,7	115,0	0	-0,5	-5,2
2	9	488	-0,065	3,243	12,10	0,014	9,0	398,7	73,7	0	-1,4	-7,8
2	10	839	-0,032	1,976	23,46	0,026	19,1	563,3	96,9	0	-0,7	-3,2
2	12	1136	-0,051	3,452	5,15	0,014	3,5	753,9	135,3	1	-0,5	-4,2
2	13	863	-0,045	2,964	5,29	0,020	2,6	527,8	191,2	2	-1,0	-5,2
2	14	734	-0,051	3,323	16,91	0,024	12,3	526,5	163,4	0	-1,5	-6,5
2	15	927	-0,042	2,485	5,36	0,024	4,0	553,3	39,5	5	-0,2	-4,2
2	16	1203	-0,040	2,704	7,34	-0,007	6,0	713,4	244,7	0	-0,5	-4,4
2	17	609	-0,076	3,776	19,45	0,014	11,2	543,8	384,3	0	-1,8	-6,7
3	1	672	-0,039	2,201	118,63	0,013	114,0	583,0	325,4	0	-2,7	-8,6
3	4	756	-0,016	1,252	193,78	0,020	193,1	761,9	32,7	0	-1,1	-5,9
3	5	5592	-0,010	1,914	5,44	0,005	2,8	595,1	244,4	4	-2,9	-7,4
3	6	604	-0,031	1,314	106,07	0,028	104,6	735,5	156,6	0	-1,2	-6,2
3	8	964	-0,039	2,678	6,58	0,029	4,8	545,3	55,1	2	-0,4	-4,7
3	9	657	-0,056	2,965	7,79	0,028	4,0	463,3	71,7	3	-2,1	-7,6
3	10	690	-0,045	2,302	37,50	0,015	31,1	525,0	168,2	0	-1,5	-7,6
3	11	1356	-0,023	1,043	183,20	-0,069	182,9	866,5	60,6	0	-0,4	-3,8
3	12	806	-0,047	2,592	4,92	0,062	3,1	596,5	53,6	3	-0,4	-4,2
3	13	1646	-0,022	1,433	185,31	0,002	178,9	1016,1	225,2	0	-1,1	-5,1
3	16	625	-0,068	3,750	26,51	0,018	20,4	527,2	478,4	0	-3,0	-8,7
3	17	6668	-0,002	1,076	247,07	0,018	245,2	904,4	134,1	0	-1,4	-5,2
3	18	942	-0,025	1,417	133,91	0,004	129,4	668,3	104,0	0	-1,6	-5,6
3	19	1616	-0,026	2,198	5,52	0,019	3,3	623,6	222,7	1	-1,7	-6,6
3	21	770	-0,054	2,707	125,00	0,020	117,1	874,4	381,2	0	-0,7	-4,8
3	22	941	-0,052	2,921	7,48	0,018	4,5	649,6	113,1	2	-1,1	-6,0
4	1	1036	-0,032	2,473	6,33	0,025	1,7	443,4	233,6	5	-2,1	-5,9
4	7	1202	-0,035	2,190	5,39	0,020	3,0	565,1	61,4	7	-1,6	-6,4
4	8	5926	-0,003	0,865	216,84	-0,144	216,4	986,7	257,8	0	-1,3	-5,7
4	12	939	-0,030	1,030	127,41	-0,141	126,0	650,6	143,7	0	-1,4	-7,1
4	13	652	-0,084	4,309	10,49	0,065	9,9	750,5	69,3	0	-1,0	-4,9
4	16	2318	-0,012	0,895	251,39	-0,098	251,9	1046,2	84,2	0	-1,7	-5,3
4	17	5686	-0,005	1,224	157,15	0,008	158,6	1007,7	149,9	0	-1,8	-6,2
4	18	11901	-0,003	1,340	130,60	0,016	127,6	836,1	642,1	0	-2,8	-8,9
4	19	1131	-0,029	1,924	42,91	0,025	36,5	691,3	154,7	0	-0,9	-5,9
4	20	620	-0,058	2,630	100,49	0,012	92,8	629,1	239,8	0	-1,8	-7,7
4	21	790	-0,039	2,207	146,75	0,011	141,8	696,2	407,2	0	-2,3	-7,5
4	22	749	-0,050	2,974	156,69	0,016	152,9	804,3	160,3	0	-2,0	-6,6
4	23	743	-0,062	3,275	7,36	0,019	2,8	516,6	296,6	5	-1,5	-7,3
4	24	3515	-0,008	0,994	185,16	-0,113	183,2	1038,3	179,3	0	-1,3	-6,7
4	25	636	-0,043	1,871	192,35	0,018	189,2	867,1	182,4	0	-1,2	-5,9

ANNEXE E. ANALYSES DE COMPARAISONS MULTIPLES SUR LES ACCROISSEMENTS APRÈS COUPE À DIMENSIONS COMPARABLES

Les pages suivantes présentent les résultats des tests de comparaison multiple réalisés pour l'analyse de l'accroissement à dimensions comparables chez les tiges libres de croître. Pour chacune des analyses de variance par classes de hauteur ou de volume, les résultats des comparaisons entre les groupes de régénération sont présentés sous forme de tableau.

Légende :

Codes utilisés dans les comparaisons :

s : semis libres de croître

pg : petites gaules

mg : moyennes gaules

gg : grandes gaules

tr : tiges récoltables

* : présence d'une différence significative

au seuil $\alpha=5\%$ /(nombre de groupes)

X : absence de différence significative

L'absence de code (* ou X) indique qu'il y au moins un des 2 groupes de régénération de la comparaison qui est absent.

Les niveaux de signification du modèle et des sources de variation, calculés par PROC GLM, sont présentés pour chaque ANOVA réalisée. Les sources de variation sont le groupe de régénération et le pourcentage de cime (PCE). Ce dernier est utilisé comme covariable dans toutes les analyses sauf pour l'accroissement en hauteur. Lorsque le groupe de régénération ou le pourcentage de cime est hautement significatif ($Pr>F$ inférieure à 0,01), le code ** est présenté.

Accroissement en hauteur en fonction de la hauteur

comparaison	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0	8,5	9,0	9,5	10,0
s/pg	*	*	*	*	*	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
s/mg			*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	X	X
s/gg								*	*	*	*	*	*	*	*	*
s/tr														*	*	*
pg/mg			*	*	*	*	*	*	*	*	X	X	X	X	X	X
pg/gg								*	*	*	*	*	*	*	*	*
pg/tr														*	*	*
mg/gg								*	*	*	*	*	*	*	*	X
mg/tr														*	*	*
gg/tr														*	*	*
modèle (P > F)	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001
R ²	0,61	0,58	0,66	0,66	0,60	0,61	0,56	0,51	0,59	0,64	0,68	0,66	0,60	0,68	0,68	0,65

comparaison	10,5	11,0	11,5	12,0	12,5	13,0	13,5	14,0	14,5	15,0	15,5	16,0	16,5	17,0	17,5	18,0	18,5
s/pg	X	X	X	X	X	X	*	*	X	X	X	X	X				
s/mg	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X				
s/gg	*	*	*	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X				
s/tr	*	*	*	*	*	*	X	X	X	X	X	X	X				
pg/mg	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X				
pg/gg	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X				
pg/tr	*	*	*	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X				
mg/gg	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X				
mg/tr	*	*	*	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X				
gg/tr	*	*	*	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
modèle (P > F)	0,0001	0,0001	0,0001	0,0007	0,0042	0,0284	0,0484	0,0864	0,3201	0,1792	0,0676	0,1666	0,1177	0,1821	0,1824	0,3391	0,6652
R ²	0,60	0,47	0,41	0,28	0,23	0,17	0,15	0,13	0,08	0,12	0,20	0,19	0,26	0,13	0,16	0,09	0,02

Accroissement en diamètre en à hauteur et à pourcentage de cime comparables

Comparaison	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0	8,5	9,0	9,5	10,0	
s/pg	*		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
s/mg		*		X	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	
s/gg									X	X	X	X	X	X	X	X	
s/tr														X	*	X	
pg/mg			X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
pg/gg								X	X	X	X	X	X	X	X	X	
pg/tr										X	X	X	X	X	*	X	
mg/gg									X	X	X	X	*	*	*	*	
mg/tr														*	*	*	
gg/tr														X	*	X	
modèle (P > F)	0,0032	0,0262	0,0007	0,0004	0,0003	0,0001	0,0001	0,0003	0,0001	0,0007	0,0001	0,0001	0,0002	0,0004	0,0001	0,0001	
R ²	0,41	0,75	0,44	0,44	0,44	0,49	0,46	0,42	0,46	0,38	0,42	0,40	0,38	0,36	0,39	0,37	
PCE	0,47	0,90	0,04	**	**	**	**	0,04	0,02	0,08	**	**	**	0,03	0,05	**	
GRUPE	**	0,01	0,04	0,05	0,01	**	**	0,02	0,02	0,03	0,04	0,05	0,02	**	**	**	
<hr/>																	
Comparaison	10,5	11,0	11,5	12,0	12,5	13,0	13,5	14,0	14,5	15,0	15,5	16,0	16,5	17,0	17,5	18,0	18,5
s/pg	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
s/mg	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
s/gg	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
s/tr	*	*	*	X	*	*	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
pg/mg	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
pg/gg	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
pg/tr	*	*	*	*	*	*	*	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
mg/gg	*	*	*	X	*	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
mg/tr	*	*	*	*	*	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
gg/tr	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
modèle (P > F)	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0023	0,0275	0,0622	0,2025	0,1770	0,9130	0,4316	0,3582	0,6302
R ²	0,46	0,45	0,43	0,44	0,51	0,55	0,46	0,41	0,30	0,23	0,23	0,22	0,27	0,02	0,15	0,20	0,12
PCE	**	**	**	**	**	**	**	**	**	0,02	0,07	0,07	0,10	0,89	0,32	0,23	0,35
GRUPE	**	**	**	0,01	0,01	0,02	0,05	0,10	0,24	0,55	0,26	0,64	0,39	0,79	0,66	0,75	0,87

Accroissement spécifique en volume à hauteur et pourcentage de cime comparables

Comparaison	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0	8,5	9,0	9,5	10,0
s/pg	*	*	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
s/mg			*	*	*	*	*	X	X	X	X	X	X	X	X	X
s/gg									*	*	*	X	X	X	X	X
s/tr														X	X	X
pg/mg			X	*	*	*	*	*	*	X	X	X	X	X	X	X
pg/gg									*	*	*	X	X	X	X	X
pg/tr														X	X	X
mg/gg									X	X	X	X	X	X	X	X
mg/tr														X	X	X
gg/tr														X	X	X
modèle (P > F)	0,0027	0,0082	0,0006	0,0001	0,0004	0,0001	0,0006	0,0030	0,0001	0,0001	0,0003	0,0021	0,0128	0,1525	0,0836	0,0261
R ²	0,42	0,32	0,45	0,50	0,43	0,48	0,38	0,32	0,50	0,45	0,38	0,31	0,25	0,15	0,17	0,21
PCE	0,43	0,96	0,09	**	0,01	**	0,03	0,08	0,15	0,58	0,05	0,02	0,07	0,62	0,19	0,02
GROUPE	**	**	**	**	**	**	**	0,02	**	**	**	0,16	0,15	0,18	0,18	0,29

Comparaison	10,5	11,0	11,5	12,0	12,5	13,0	13,5	14,0	14,5	15,0	15,5	16,0	16,5	17,0	17,5	18,0	18,5
s/pg	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X				
s/mg	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X				
s/gg	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X				
s/tr	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X				
pg/mg	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X				
pg/gg	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X				
pg/tr	X	X	X	X	X	X	X	*	X	X	X	X	X				
mg/gg	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X				
mg/tr	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X				
gg/tr	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
modèle (P > F)	0,0009	0,0004	0,0004	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0010	0,0022	0,0054	0,0101	0,2245	0,8954	0,7329	0,5978	0,6751
R ²	0,31	0,33	0,32	0,38	0,43	0,45	0,37	0,38	0,32	0,32	0,34	0,40	0,25	0,02	0,06	0,11	0,12
PCE	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	0,01	**	0,07	0,98	0,48	0,34	0,55
GROUPE	0,14	0,16	0,20	0,17	0,17	0,14	0,11	0,07	0,24	0,29	0,28	0,32	0,56	0,68	0,97	0,91	0,46

Accroissement en volume à volume et pourcentage de cime comparables

Comparaison	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170
s/pg	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
s/mg	*	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
s/gg	X	X	*	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
s/tr					*	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
pg/mg	*	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
pg/gg	X	X	*	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
pg/tr					*	X	X	X	*	*	*	*	*	*	*	*	*
mg/gg	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
mg/tr					X	X	X	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
gg/tr					*	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
modèle (P > F)	0,0001	0,3410	0,0001	0,0057	0,0005	0,0003	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001
R ²	0,53	0,11	0,54	0,26	0,34	0,34	0,39	0,45	0,52	0,54	0,54	0,56	0,53	0,50	0,48	0,44	0,44
PCE	0,04	0,97	0,02	0,13	0,02	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**
GRUPE	**	0,22	**	0,02	**	0,10	0,14	0,06	0,01	**	0,02	0,02	0,04	0,05	0,10	0,34	0,16

Comparaison	180	190	200	210	220	230	240	250	260	270	280	290	300	310	320	330	340
s/pg	X	X	X	X	X												
s/mg	X	X	X	X	X												
s/gg	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
s/tr	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
pg/mg	X	X	X	X	X												
pg/gg	X	X	X	X	X												
pg/tr	X	X	X	X	X												
mg/gg	X	X	X	X	X												
mg/tr	X	X	X	X	X												
gg/tr	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
modèle (P > F)	0,0001	0,0001	0,0006	0,0475	0,0888	0,0381	0,0276	0,0316	0,0820	0,0849	0,1097	0,1427	0,1216	0,2425	0,1450	0,3946	0,4084
R ²	0,46	0,48	0,39	0,27	0,22	0,25	0,28	0,28	0,26	0,26	0,26	0,23	0,25	0,19	0,20	0,12	0,11
PCE	**	**	**	0,05	0,14	0,14	0,10	0,38	0,42	0,51	0,17	0,29	0,26	0,53	0,41	0,39	0,42
GRUPE	0,24	0,28	0,40	0,47	0,26	0,17	0,14	0,05	0,11	0,08	0,25	0,20	0,16	0,16	0,09	0,30	0,27

Accroissement en volume à volume et pourcentage de cime comparables (suite)

Comparaison	350	360	370	380	390	400	410	420	430	440
S/pg										
s/mg										
s/gg										
s/tr										
pg/mg										
pg/gg										
pg/tr										
mg/gg										
mg/tr										
gg/tr	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
modèle (P > F)	0,3532	0,2846	0,2452	0,2706	0,2897	0,2937	0,3028	0,3238	0,3253	0,5623
R ²	0,13	0,16	0,18	0,18	0,19	0,18	0,18	0,17	0,17	0,11
PCE	0,37	0,24	0,20	0,16	0,17	0,18	0,18	0,20	0,20	0,57
GRUPE	0,23	0,33	0,33	0,53	0,50	0,47	0,45	0,41	0,39	0,34

**ANNEXE F. RÉSULTATS DE LA MODÉLISATION DU VOLUME
MARCHAND À PARTIR DU MODÈLE PAR PLACETTE.**

Non-Linear Least Squares Summary Statistics Dependent Variable VR

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square
Regression	16	990935,0	61933,44
Residual	40	15910,0	397,75
Uncorrected Total	56	1006845,0	
(Corrected Total)	55	426965,6	

Parameter	Estimate	Asymptotic Std. Error	Asymptotic 95%	
			Confidence	Interval
			Lower	Upper
B1	298,922942	33,77721697	230,66	367,19
B2	-0,0189062	0,005065373	-0,029	-0,009
B3	4,4842815	1,064198771	2,333	6,635
C1	16,6006297	2,606139976	11,333	21,868
C2	14,4480783	2,613131431	9,167	19,729
C3	8,9972386	2,587588608	3,768	14,227
C4	-2,4802084	2,813492029	-8,166	3,206
C5	7,1690165	2,733394197	1,645	12,693
C7	-1,0318172	2,998466425	-7,092	5,028
C9	-3,2006247	3,227272087	-9,723	3,322
C10	3,2850299	2,953727841	-2,685	9,255
C11	15,8028091	2,656795247	10,433	21,172
C12	10,4793472	2,672433488	5,0782	15,881
C14	7,6474930	2,694403344	2,202	13,093
C15	5,4903683	2,685151355	0,063	10,917
C16	5,6460703	2,870312573	-0,155	11,447

**ANNEXE G. RÉSULTATS DE LA MODÉLISATION DU VOLUME
MARCHAND À PARTIR DU MODÈLE AVEC L'INDICE DE HAUTEUR.**

Non-Linear Least Squares Summary Statistics Dependent Variable VR

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square
Regression	4	961759,1	240439,78
Residual	52	45085,9	867,04
Uncorrected Total	56	1006845,0	
(Corrected Total)	55	426965,6	

Parameter	Estimate	Asymptotic Std. Error	Asymptotic 95% Confidence Interval	
			Lower	Upper
B1	289,422193	65,69596926	157,59	421,25
B2	-0,0282307	0,006825290	-0,042	-0,015
B3	6,0674195	1,858205139	2,339	9,796
B4	3,4041160	0,568899724	2,263	4,546