

GUILLAUME GIROUD

**CARACTÉRISATION DE LA PROPORTION DE BOIS
D'AUBIER ET DE DURAMEN CHEZ LE BOULEAU À
PAPIER (*BETULA PAPYRIFERA* MARSH.)**

Mémoire présenté
à la Faculté des études supérieures de l'Université Laval
dans le cadre du programme de maîtrise en sciences du bois
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
QUÉBEC

DÉCEMBRE 2005

RÉSUMÉ

Cette étude vise à caractériser les proportions de bois d'aubier et de duramen chez le bouleau à papier (*Betula papyrifera* Marsh.) en relation avec les caractéristiques du feuillage, de la cime et de l'arbre. Les résultats indiquent que la proportion d'aubier est significativement reliée au feuillage, selon la théorie du modèle tubulaire. D'autre part, la probabilité de présence de duramen à hauteur de souche est plus élevée pour des arbres à fort défilement. Les proportions d'aubier et de duramen sont également dépendantes de l'âge de l'arbre. En outre, le développement vertical du duramen à l'intérieur de la tige semble être affecté par l'effet d'empatement et par la base de la cime vivante. Le duramen présente une valeur maximale à une hauteur relative de 9% et décroît par la suite. Finalement, la quasi-totalité du volume de duramen est située sous la base de la cime vivante.

ABSTRACT

This study aims to characterize sapwood and heartwood proportions in White Birch (*Betula papyrifera* Marsh.) in relation with foliage, crown and stem characteristics. The results indicate that sapwood proportion is significantly related to foliage following the pipe model theory. Furthermore, the probability of heartwood presence at stump height is higher for trees with high stem taper. Sapwood and heartwood proportions are also tree age dependant. In addition, the vertical development of heartwood within the stem seems to be affected by the stump effect and by the live crown base. Heartwood shows a maximum value at 9% relative tree height and decreases afterwards. Finally, almost all the heartwood volume is located under the live crown base.

REMERCIEMENTS

Je remercie, tout spécialement, M. Alain Cloutier, professeur et directeur du Centre de recherche sur le bois, de m'avoir proposé ce sujet de maîtrise et de m'avoir supervisé comme directeur de recherche. J'ai grandement apprécié cette collaboration et cette expérience très formatrice.

Nous remercions Développement Économique Canada pour le financement de ce projet, de même que toute l'équipe du Centre de recherche sur le bois pour le soutien administratif et technique. Nous remercions également les responsables de la forêt Montmorency, MM. Paul Bouliane et Serge Lemay, d'avoir bien voulu collaborer à cette étude.

J'aimerais remercier toutes les personnes qui ont participé de loin ou de près à ce projet. Merci à M. Gaétan Daigle (Université Laval, Service de consultation statistique) pour son aide indispensable dans l'élaboration et la vérification des analyses statistiques. Merci à MM. Maxime Frémont (École Supérieure du Bois, France) et Denis Schwendener (Université Laval), pour leur participation très appréciée dans l'inventaire, la récolte et le traitement des données. Finalement, je remercie MM. Camil Poulin (MRNFQ), Christian Godbout (MRNFQ) et Bruno Couture (QWEB) qui ont bien voulu prendre un peu de leur temps pour répondre à mes questions.

Mes derniers remerciements s'adressent à Cynthia pour l'amour, la patience et les conseils qui m'ont permis de réussir avec succès cette maîtrise.

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ	ii
ABSTRACT.....	iii
REMERCIEMENTS.....	iv
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 REVUE DE LITTÉRATURE	2
1.1 Portrait de la ressource.....	2
1.1.1 Description botanique.....	2
1.1.2 Description écologique	5
1.1.3 Inventaire de la ressource disponible.....	11
1.1.4 Aménagement du bouleau blanc.....	19
1.2 Propriétés et qualité du bois.....	22
1.2.1 Structure et apparence du bois.....	22
1.2.2 Notions de biologie du bois	32
1.2.3 Propriétés techniques du bois	39
1.3 Utilisation de la ressource.....	43
1.3.1 Contexte de l'industrie de la transformation des bois feuillus.....	43
1.3.2 Classement et prix du bois.....	48
1.3.3 Applications industrielles du bouleau à papier.....	52
1.4 Objectifs de recherche	57
CHAPITRE 2 MATÉRIEL ET MÉTHODES.....	58
2.1 Description du territoire.....	58
2.1.1 Forêt Montmorency	58
2.1.2 Sélection des sites de récolte	58
2.1.3 Caractéristiques des sites de récolte.....	60
2.2 Matériel.....	63
2.2.1 Inventaire de 150 arbres échantillons	63
2.2.2 Inventaire de 18 arbres échantillons avec duramen	65
2.2.3 Récolte des feuilles	66
2.2.4 Récolte des disques de bois	66
2.3 Méthodes.....	67
2.3.1 Détermination de la compétition relative.....	67
2.3.2 Détermination des paramètres foliaires	67
2.3.3 Détermination des quantités d'aubier et de duramen.....	68
2.4 Analyses statistiques des données.....	73
2.4.1 Relations entre l'aubier et le feuillage (n = 18)	73

2.4.2 Probabilité de présence de duramen (n=150)	77
2.4.3 Proportions d'aubier et de duramen (n=18).....	80
2.4.4 Profil interne des tiges (n =14)	81
CHAPITRE 3 RÉSULTATS ET DISCUSSION.....	82
3.1 Relations entre l'aubier et le feuillage	82
3.1.1 Estimation des paramètres foliaires par arbre entier.....	82
3.1.2 Surface foliaire spécifique (SFS).....	83
3.1.3 Distribution verticale du feuillage	85
3.1.4 Prédiction des paramètres foliaires.....	86
3.1.5 Ratios « paramètres foliaires / surface d'aubier ».....	90
3.2 Probabilité de présence de duramen	92
3.3 Proportions d'aubier et de duramen.....	96
3.3.1 Proportions observées d'aubier et de duramen.....	96
3.3.2 Prédiction du volume d'aubier.....	99
3.3.3 Prédiction du volume de duramen	100
3.3.4 Prédiction des proportions de duramen et d'aubier	101
3.4 Profil interne des tiges	102
3.4.1 Formations anormales de duramen.....	102
3.4.2 Défilement de l'arbre.....	103
3.4.3 Défilement de l'aubier	104
3.4.4 Défilement de l'écorce interne.....	105
3.4.5 Défilement du duramen	106
3.4.6 Distribution verticale du volume de duramen.....	109
CONCLUSIONS	111
BIBLIOGRAPHIE.....	113
ANNEXE 123 Zones de végétation et domaines bioclimatiques du Québec.....	123
ANNEXE 2 Grille de classification des tiges du Ministère des Ressources naturelles et de la Faune du Québec	125
ANNEXE 3 Spécifications des bois de bouleau à papier et de bouleau jaune recherchés par le groupe Transforêt Inc.....	127
ANNEXE 4 Caractéristiques des 18 arbres échantillons.....	131
ANNEXE 5 Résultats des analyses de variance	133
ANNEXE 6 Profil interne des tiges (n=18).....	140
ANNEXE 7 Défilement de la proportion de duramen par arbre échantillon (n=14).....	147
ANNEXE 8 Distribution verticale du volume de duramen par arbre échantillon (n=14).....	149

LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU 1.1 RÉPARTITION DU VOLUME MARCHAND BRUT EN BOULEAUX PAR PROVINCE ET TERRITOIRE DU CANADA (D'APRÈS RNCAN 2005B)	12
TABLEAU 1.2 RÉPARTITION DU VOLUME MARCHAND BRUT PAR GROUPEMENT D'ESPÈCES (D'APRÈS MRNFQ 2005B).....	13
TABLEAU 1.3 RÉPARTITION DU VOLUME MARCHAND BRUT DE BOULEAU À PAPIER PAR RÉGION ADMINISTRATIVE (D'APRÈS MRNFQ 2005B)	14
TABLEAU 1.4 POSSIBILITÉ, ATTRIBUTION, RÉCOLTE ET TAUX D'UTILISATION DU BOULEAU À PAPIER PAR RÉGION ADMINISTRATIVE DU MINISTÈRE DES RESSOURCES NATURELLES ET DE LA FAUNE DU QUÉBEC (D'APRÈS MRNFQ 2005C ET MRNFQ 2005D).....	17
TABLEAU 1.5 RÉPARTITION DU VOLUME RÉCOLTÉ DE BOULEAU À PAPIER PAR CLASSE DE QUALITÉ DE TIGES ET PAR RÉGION ADMINISTRATIVE DU MINISTÈRE (D'APRÈS MRNFQ 2005D).....	18
TABLEAU 1.6 RÉPARTITION DU VOLUME PAR TYPE CELLULAIRE ET PAR ESPÈCE FEUILLUE DE L'EST DU CANADA (D'APRÈS PANSWIN ET DE ZEEUW 1980).....	25
TABLEAU 1.7 COEFFICIENT DE RÉFACTION DE QUELQUES ESPÈCES FEUILLUES DU CANADA (D'APRÈS BASHAM ET MORAWSKY 1964)	27
TABLEAU 1.8 PROPORTION DE BOIS CARIÉ OU ANORMALEMENT COLORÉ CHEZ LE BOULEAU À PAPIER PAR CLASSE D'ÂGES (D'APRÈS BASHAM 1991).....	28
TABLEAU 1.9 FACTEURS INFLUENÇANT LA PROPORTION DE DURAMEN (D'APRÈS TAYLOR ET <i>AL.</i> 2002).....	39
TABLEAU 1.10 PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES ET PHYSIQUES DE QUELQUES ESPÈCES FEUILLUES DE L'EST DU CANADA (D'APRÈS JESSOME 1977).....	40
TABLEAU 1.11 LONGUEUR MOYENNE DES FIBRES ET DES VAISSEAUX DE QUELQUES ESPÈCES FEUILLUES DE L'EST DU CANADA (D'APRÈS PANSWIN ET DE ZEEUW 1980).....	42
TABLEAU 1.12 PROPRIÉTÉS DE FAÇONNAGE DE QUELQUES ESPÈCES FEUILLUES DE L'EST DU CANADA (D'APRÈS Q-WEB 2005).....	43
TABLEAU 1.13 RÉPARTITION DU VOLUME DE FEUILLUS DURS RÉCOLTÉ PAR CLASSE DE QUALITÉ DE TIGES DE 1998 À 2003 (D'APRÈS CÉGFQ 2004)	44
TABLEAU 1.14 SPÉCIFICATIONS REQUISES PAR PRODUIT (D'APRÈS ANONYME 2004)	46

TABLEAU 1.15	IMPORTANCE RELATIVE DES ESPÈCES DE SCIAGES DE FEUILLUS DURS PRODUITS AU QUÉBEC (D'APRÈS MRNFQ 2003B).....	47
TABLEAU 1.16	CLASSEMENT ET PRIX DES GRUMES DE BOULEAU (D'APRÈS ANONYME 2005).....	49
TABLEAU 1.17	PRIX MOYENS DES SCIAGES <i>BOULEAU (BIRCH)</i> ET <i>BOULEAU AUBIER (SAP)</i> POUR LES RÉGIONS <i>NORTH CENTRAL</i> ET <i>NORTHEASTERN</i> DES ÉTATS-UNIS, MARS 2005 (HARDWOOD REVIEW 2005).....	51
TABLEAU 2.1	DENSITÉ (TIGES/HA) ET SURFACE TERRIÈRE TOTALE (M ² /HA) PAR SITE DE RÉCOLTE.....	61
TABLEAU 2.2	INDICE DE QUALITÉ DE STATION (IQS) DU BOULEAU À PAPIER, PAR SITE DE RÉCOLTE, EN FONCTION DE LA HAUTEUR ET DE L'ÂGE DES ARBRES DOMINANTS ET CODOMINANTS	62
TABLEAU 2.3	DÉTERMINATION DES SURFACES DE DURAMEN, D'AUBIER ET D'ÉCORCE INTERNE POUR LE DISQUE DE LA FIGURE 2.9.....	71
TABLEAU 3.1	STATISTIQUES DESCRIPTIVES DES PARAMÈTRES FOLIAIRES PAR ARBRE ENTIER (N=18).....	82
TABLEAU 3.2	RÉSULTATS DU TEST DE DUNCAN POUR LA SURFACE FOLIAIRE SPÉCIFIQUE (M ² /KG) AVEC LE SITE ET LE STATUT SOCIAL DE L'ARBRE (N=36).....	84
TABLEAU 3.3	RÉSULTATS DU TEST DE DUNCAN POUR LA PROPORTION DE SURFACE FOLIAIRE ET DE POIDS FOLIAIRE SEC AVEC LA SECTION DE HOUPPIER ET LE STATUT SOCIAL DE L'ARBRE (N=36)	85
TABLEAU 3.4	RÉSULTATS DES ANALYSES DE RÉGRESSION LINÉAIRE SIMPLE POUR LA SURFACE (SF, M ²) ET LE POIDS FOLIAIRES (PF, KG) AVEC LE DHP (CM), LA SURFACE TRANSVERSALE D'AUBIER À HAUTEUR DE POITRINE (SA, CM ²) ET LE VOLUME TOTAL D'AUBIER (VA, M ³) (Y = A + BX) (N=18).....	86
TABLEAU 3.5	RÉSULTATS DES ANALYSES DE RÉGRESSION LINÉAIRE MULTIPLE POUR LA SURFACE (SF, M ²) ET LE POIDS FOLIAIRES (PF, KG) AVEC LE DHP (CM), LA SURFACE TRANSVERSALE D'AUBIER À HAUTEUR DE POITRINE (SA, CM ²) ET LE VOLUME TOTAL D'AUBIER (VA, M ³) (Y=A+B ₁ X+ B ₂ M1+ B ₃ ICH+ B ₄ SPH)* (N=18).....	87
TABLEAU 3.6	STATISTIQUES DESCRIPTIVES DES RATIOS « SURFACE FOLIAIRE / SURFACE D'AUBIER » (SF/SA) ET « POIDS FOLIAIRE SEC / SURFACE D'AUBIER » (PF/SA) (N=18).....	90
TABLEAU 3.7	MOYENNES DES RATIOS « SURFACE FOLIAIRE / SURFACE D'AUBIER » (SF/SA) ET « POIDS FOLIAIRE SEC / SURFACE D'AUBIER » (PF/SA) SELON LE STATUT SOCIAL DU HOUPPIER (N=18)	90

TABLEAU 3.8	COEFFICIENTS DE CORRÉLATION DE PEARSON ENTRE LES RATIOS « SURFACE FOLIAIRE / SURFACE D'AUBIER » (SF/SA) ET « POIDS FOLIAIRE SEC / SURFACE D'AUBIER » (PF/SA) VERSUS L'ÂGE, LE DHP, LA HAUTEUR TOTALE ET LES INDICES DE COMPÉTITION (N=18).....	91
TABLEAU 3.9	PRÉSENCE OBSERVÉE DE DURAMEN À HAUTEUR DE SOUCHE PAR SITE DE RÉCOLTE (N=150)	92
TABLEAU 3.10	TABLE DE CLASSIFICATION DU MODÈLE LOGISTIQUE APRÈS VALIDATION CROISÉE POUR UN SEUIL DE CLASSEMENT DE 28,8% (N=150).....	95
TABLEAU 3.11	STATISTIQUES DESCRIPTIVES DES VOLUMES D'AUBIER, DE DURAMEN ET D'ÉCORCE INTERNE (M ³) PAR ARBRE ENTIER (N=18).....	96
TABLEAU 3.12	STATISTIQUES DESCRIPTIVES DES PROPORTIONS EN VOLUME D'AUBIER, DE DURAMEN ET D'ÉCORCE INTERNE (%) PAR ARBRE ENTIER (N=18).....	96
TABLEAU 3.13	COEFFICIENTS DE CORRÉLATION DE PEARSON ENTRE LES VOLUMES ET LES PROPORTIONS D'AUBIER ET DE DURAMEN VERSUS LES CARACTÉRISTIQUES DE L'ARBRE, DE LA CIME ET LES INDICES DE COMPÉTITION (N=18).....	97
TABLEAU 3.14	COEFFICIENTS DE CORRÉLATION DE PEARSON ENTRE LES ÉPAISSEURS D'AUBIER, DE DURAMEN ET D'ÉCORCE INTERNE À 130 CM VERSUS LES VOLUMES RESPECTIFS PAR ARBRE ENTIER (N=18).....	98
TABLEAU 3.15	COEFFICIENTS DE CORRÉLATION DE PEARSON ENTRE LES PROPORTIONS DES ÉPAISSEURS D'AUBIER, DE DURAMEN ET D'ÉCORCE INTERNE À 130 CM VERSUS LES PROPORTIONS RESPECTIVES EN VOLUME PAR ARBRE ENTIER (N=18).....	98
TABLEAU 3.16	STATISTIQUES DESCRIPTIVES DES DIMENSIONS DU DURAMEN (N=14).....	107

LISTE DES FIGURES

FIGURE 1.1 CLASSIFICATION TAXONOMIQUE DU BOULEAU BLANC (D'APRÈS USDA 2005).....	3
FIGURE 1.2 TRAITS DISTINCTIFS DU BOULEAU À PAPIER (D'APRÈS MRNFQ 2005A ET RNCAN 2005A).....	5
FIGURE 1.3 DISTRIBUTION DU BOULEAU BLANC EN AMÉRIQUE DU NORD (D'APRÈS SAFFORD ET AL. 1990).....	6
FIGURE 1.4 BOULEAUX À PAPIER ABANDONNÉS SUR LE PARTERRE DE COUPE, FORÊT MONTMORENCY; UNIVERSITÉ LAVAL.....	10
FIGURE 1.5 RÉPARTITION DU VOLUME MARCHAND BRUT DE BOULEAU À PAPIER PAR RÉGION ADMINISTRATIVE (D'APRÈS TABLEAU 1.3).....	15
FIGURE 1.6 JEUNE PLANTATION DE BOULEAUX VERRUQUEUX, PIELAVESI, FINLANDE.....	21
FIGURE 1.7 PHOTOMICROGRAPHIES DU BOIS DE BOULEAU : (1) PLAN TANGENTIEL-RADIAL, 40X, (2) PLAN LONGITUDINAL-RADIAL, 100X (D'APRÈS CLOUTIER 2005A).....	23
FIGURE 1.8 PARENCHYME APOTRACHÉAL : (1) DISPERSÉ, (2) DISPERSÉ EN CHAÎNETTES, (3) TERMINAL (D'APRÈS JANE 1970).....	23
FIGURE 1.9 FACE LONGITUDINALE D'UNE PLANCHETTE DE BOIS D'AUBIER DE BOULEAU.....	25
FIGURE 1.10 COLONNES DE COLORATION DISCONTINUES ET ASSOCIÉES À DES BLESSURES CHEZ UN BOULEAU À PAPIER (D'APRÈS SHIGO 1983).....	29
FIGURE 1.11 SECTIONS TRANSVERSALES DE SCIAGES DE BOULEAU À PAPIER PRÉSENTANT DES FORMES DIVERSES D'ÉCHAUFFURE ET DE POURRITURE, SCIERIE THOMAS-LOUIS TREMBLAY, QUÉBEC.....	30
FIGURE 1.12 SCIAGES DE BOULEAU AVEC TACHES MÉDULLAIRES (D'APRÈS SALOMON 1995).....	31
FIGURE 1.13 SECTION TRANSVERSALE D'UN BOULEAU À PAPIER VENANT D'ÊTRE ABATTU, FORÊT MONTMORENCY; UNIVERSITÉ LAVAL.....	34
FIGURE 1.14 CRITÈRES PRINCIPAUX POUR LE CLASSEMENT D'UNE GRUME DE FEUILLU (D'APRÈS ANONYME 2005).....	48
FIGURE 1.15 SCIAGES DE 8 PIEDS (2,4 M) DE <i>BOULEAU</i> : (1) FAS-CHOIX, (2) N ^o 1 COMMUN ET (3) N ^o 2 COMMUN (D'APRÈS QWEB 2005).....	51
FIGURE 1.16 GRUMES DE BOULEAU À PAPIER EN COURS D'USINAGE, SCIERIE THOMAS-LOUIS TREMBLAY, QUÉBEC.....	53
FIGURE 2.1 LOCALISATION ET CARACTÉRISTIQUES DES SITES DE RÉCOLTE DE LA FORÊT MONTMORENCY; UNIVERSITÉ LAVAL.....	59

FIGURE 2.2 RÉPARTITION DES ESPÈCES FORESTIÈRES, PAR SITE DE RÉCOLTE, EN POURCENTAGE DE LA SURFACE TERRIÈRE	60
FIGURE 2.3 RÉPARTITION DES CLASSES DE DIAMÈTRES, PAR SITE DE RÉCOLTE, EN POURCENTAGE DE LA SURFACE TERRIÈRE.....	61
FIGURE 2.4 INDICE DE QUALITÉ DE STATION DU BOULEAU À PAPIER EN FONCTION DE LA HAUTEUR ET DE L'ÂGE DES ARBRES DOMINANTS ET CODOMINANTS (D'APRÈS POTHIER ET SAVARD 1998)	62
FIGURE 2.5 TECHNIQUES D'INVENTAIRE FORESTIER.....	63
FIGURE 2.6 CLASSEMENT DES CIMES UTILISÉ PAR LE MINISTÈRE DES RESSOURCES NATURELLES ET DE LA FAUNE DU QUÉBEC (D'APRÈS PERRON ET MORIN 2002).....	64
FIGURE 2.7 IDENTIFICATION D'UN DISQUE DE BOIS	66
FIGURE 2.8 ÉTAPES DE L'ANALYSE FOLIAIRE.....	68
FIGURE 2.9 ÉTAPES DU TRAITEMENT D'IMAGES RÉALISÉ AVEC <i>PHOTOSHOP ELEMENTS 2</i>	69
FIGURE 2.10 DÉTERMINATION DU CONTOUR DE LA RÉGION COLORÉE DU DURAMEN.....	70
FIGURE 2.11 DÉTERMINATION DU VOLUME MARCHAND BRUT SELON LES NORMES DU MINISTÈRE DES RESSOURCES NATURELLES ET DE LA FAUNE DU QUÉBEC (PERRON 1996).....	72
FIGURE 3.1 SURFACE FOLIAIRE PAR ARBRE ENTIER EN FONCTION DE LA SURFACE TRANSVERSALE D'AUBIER À HAUTEUR DE POITRINE (N=18).....	89
FIGURE 3.2 POIDS FOLIAIRE SEC PAR ARBRE ENTIER EN FONCTION DE LA SURFACE TRANSVERSALE D'AUBIER À HAUTEUR DE POITRINE (N=18).....	89
FIGURE 3.3 LOGIT DE LA PROBABILITÉ DE PRÉSENCE DE DURAMEN, PAR SITE DE RÉCOLTE, EN FONCTION DU DHP (N=150).....	95
FIGURE 3.4 VOLUME DE DURAMEN PAR ARBRE ENTIER EN FONCTION DE L'ÂGE À HAUTEUR DE SOUCHE (N=18).....	100
FIGURE 3.5 SURFACE TRANSVERSALE TOTALE EN FONCTION DE LA HAUTEUR RELATIVE DE L'ARBRE (N=14).....	103
FIGURE 3.6 SURFACE D'AUBIER EN FONCTION DE LA HAUTEUR RELATIVE DE L'ARBRE (N=14).....	104
FIGURE 3.7 PROPORTION D'AUBIER EN FONCTION DE LA HAUTEUR RELATIVE DE L'ARBRE (N=14).....	105
FIGURE 3.8 SURFACE D'ÉCORCE INTERNE EN FONCTION DE LA HAUTEUR RELATIVE DE L'ARBRE (N=14).....	105

FIGURE 3.9 PROPORTION D'ÉCORCE INTERNE EN FONCTION DE LA HAUTEUR RELATIVE DE L'ARBRE (N=14)	106
FIGURE 3.10 SURFACE DE DURAMEN EN FONCTION DE LA HAUTEUR RELATIVE DE L'ARBRE (N=14).....	106
FIGURE 3.11 PROPORTION DE DURAMEN EN FONCTION DE LA HAUTEUR RELATIVE DE L'ARBRE (N=14)	107
FIGURE 3.12 VOLUME CUMULATIF DE DURAMEN (%) EN FONCTION DE LA HAUTEUR RELATIVE DE L'ARBRE (%) (N=14)	109
FIGURE 3.13 DISTRIBUTION VERTICALE DU DURAMEN	110

INTRODUCTION

Dans l'Est du Canada, le bouleau à papier est une espèce sous-utilisée et souvent délaissée par l'industrie forestière, malgré l'abondance et la disponibilité de la ressource. En effet, la qualité du bois récolté est généralement très faible en raison des courbures et des dimensions réduites des tiges. Cependant, le bouleau à papier est de plus en plus considéré comme une espèce d'avenir pour l'industrie de transformation des bois feuillus, notamment grâce au développement des procédés de sciage et de déroulage non conventionnels.

De manière générale, la couleur, la présence de défauts et par conséquent la valeur de l'aubier et du duramen ont un impact majeur sur l'utilisation finale du bois. Le duramen du bouleau à papier est généralement considéré comme un défaut d'apparence par l'industrie, en raison de sa coloration brun-rougeâtre très prononcée. Il est donc nécessaire de mieux comprendre les mécanismes qui peuvent affecter les proportions d'aubier et de duramen chez cette espèce afin de mieux prévoir la qualité de l'approvisionnement en bois.

L'objectif général de cette étude consiste donc à caractériser les proportions de bois d'aubier et de duramen chez le bouleau à papier en relation avec les caractéristiques du feuillage, de la cime et de l'arbre. Les résultats de cette étude serviront à mieux comprendre le développement de l'aubier et du duramen chez cette espèce et pourront avoir des implications au niveau de l'aménagement du bouleau à papier en général.

CHAPITRE 1 REVUE DE LITTÉRATURE

1.1 Portrait de la ressource

1.1.1 Description botanique

1.1.1.1 Taxonomie

a) Les bouleaux

Le genre Bouleau, de la famille des Bétulacées et de l'ordre des Fagales, compte environ 35 espèces réparties dans les zones tempérées, boréales et arctiques de l'hémisphère nord. En Amérique du Nord, on distingue trois groupes : les bouleaux à écorce foncée, les bouleaux blancs et les bouleaux nains (FNAEC 2005).

Le premier groupe (*Betula* section *Costatae* (Regel) Koehne) est caractérisé par des arbres de grande taille, avec une écorce généralement foncée et relativement serrée ou s'exfoliant avec le temps. Ce sont généralement des arbres mésophytes, c'est-à-dire adaptés à des conditions moyennes d'humidité. En Amérique du Nord, le bouleau jaune (*Betula alleghaniensis*), le bouleau flexible (*B. lenta*) et le bouleau noir (*B. nigra*) sont considérés comme des bouleaux à écorce foncée (FNAEC 2005).

Le deuxième groupe (*Betula* section *Betula*) est le plus circumboréale des trois. On reconnaît les bouleaux blancs par leur écorce blanchâtre qui s'exfolie à maturité. Le bouleau à papier et le bouleau blanc d'Alaska (*B. neoalaskana*) appartiennent à cette catégorie (FNAEC 2005).

Finalement, le troisième groupe inclut des arbrisseaux ou des arbustes des régions froides ou des tourbières humides (*Betula* section *Humiles* W. D. Koch). En Amérique du Nord, le bouleau glanduleux (*B. glandulosa*), le bouleau pumila (*B. pumila*) et le bouleau nana (*B. nana*) sont considérés comme des bouleaux nains (FNAEC 2005).

Les principales espèces commerciales sont le bouleau jaune, le bouleau blanc et le bouleau flexible en Amérique du Nord, ainsi que le bouleau verruqueux (*B. pendula* Roth) et le bouleau pubescent (*B. pubescens* Ehrh.) en Europe.

b) Le bouleau blanc

En Amérique du Nord, le bouleau blanc comprend quatre variétés distinctes (figure 1.1) (USDA 2005). Dans ce document, nous utiliserons l'appellation *bouleau à papier* pour décrire le bouleau blanc de l'Est du Canada (*Betula papyrifera* Marsh. var. *papyrifera*) et l'appellation *bouleau blanc* lorsque aucune variété n'est spécifiée.

<p>REGNE <i>Plantae</i> (végétal)</p> <p>SOUS-RÈGNE <i>Tracheobionta</i> (plantes vasculaires)</p> <p>SUPERDIVISION <i>Spermatophyta</i> (plantes à graines)</p> <p>DIVISION <i>Magnoliophyta</i> (plantes à fleurs)</p> <p>CLASSE <i>Magnoliopsida</i> (dicotylédons)</p> <p>SOUS-CLASSE <i>Hamamelidae</i></p> <p>ORDRE <i>Fagales</i></p> <p>FAMILLE <i>Betulaceae</i></p> <p>GENRE <i>Betula</i> L.</p> <p>ESPÈCE <i>Betula papyrifera</i> Marsh. -- <u>Bouleau blanc</u></p> <p>VARIÉTÉ <i>Betula papyrifera</i> Marsh. var. <i>commutata</i> (Regel) Fern -- <u>Bouleau blanc de l'Ouest</u></p> <p>VARIÉTÉ <i>Betula papyrifera</i> Marsh. var. <i>cordifolia</i> (Regel) Fern -- <u>Bouleau à feuilles cordées</u></p> <p>VARIÉTÉ <i>Betula papyrifera</i> Marsh. var. <i>kenaica</i> (W.H. Evans) A. Henry -- <u>Bouleau Kenai</u></p> <p>VARIÉTÉ <i>Betula papyrifera</i> Marsh. var. <i>papyrifera</i> -- <u>Bouleau à papier</u></p>
--

Figure 1.1 Classification taxonomique du bouleau blanc (d'après USDA 2005)

1.1.1.2 Caractéristiques botaniques

a) Caractéristiques botaniques de la famille des Bétulacées

La famille des Bétulacées compte cinq genres (bouleaux, aulnes, ostryers, noisetiers et charmes) et environ 125 espèces, répandues dans toutes les régions extratropicales de l'hémisphère nord. Ce sont des arbres ou arbustes généralement monoïques, c'est-à-dire avec des fleurs mâles et femelles distinctes et présentes sur le même individu (OQLF 2005). Les fleurs mâles et femelles sont en chatons, parfois en groupes pour les fleurs femelles. Les feuilles sont simples, alternes, à nervures rectilignes et à stipules décidues (FNAEC 2005; Marie-Victorin 1995).

b) Caractéristiques botaniques du genre Bouleau

Au Québec, on retrouve trois espèces arborescentes, le bouleau gris (*Betula populifolia* Marsh.), le bouleau à papier et le bouleau jaune et deux espèces arbustives, en région boréale arctique, le bouleau glanduleux et le bouleau pumila (Marie-Victorin 1995).

Le bouleau se reconnaît facilement à son écorce blanchâtre ou jaunâtre qui se détache en de minces feuillets marqués de lenticelles horizontales allongées. Selon la clef des genres de la Flore laurentienne (Marie-Victorin 1995), les bractées des chatons femelles du Bouleau ne sont ni ligneuses, ni foliacées, contrairement aux autres genres de la famille des Bétulacées. Une bractée est une petite feuille ou écaille à l'aisselle de laquelle naît la fleur ou l'inflorescence (OQLF 2005).

c) Caractéristiques botaniques du bouleau à papier

Les principaux traits distinctifs du bouleau à papier sont : 1) son écorce blanche qui s'exfolie facilement à maturité en de larges feuillets; 2) ses feuilles ovées, légèrement acuminées, doublement dentées et entières à la base (figure 1.2) (Farrar 1996; FNAEC 2005; Marie-Victorin 1995).

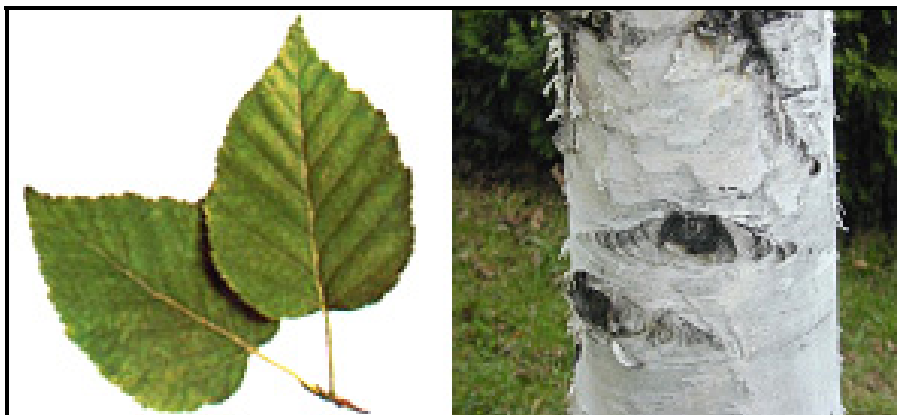


Figure 1.2 Traits distinctifs du bouleau à papier (d'après MRNFQ 2005a et RNCan 2005a)

Dans l'Est du Canada, le bouleau à papier est un arbre de dimensions petites à moyennes, pouvant atteindre 25 m de hauteur, 40 cm de diamètre et 120 ans. Le tronc est généralement élancé, souvent courbé, mais distinct au moins jusqu'au milieu du houppier. La cime, plutôt parsemée, est de forme ovale-étroite. Les branches principales sont peu nombreuses et habituellement ascendantes (Farrar 1996).

1.1.2 Description écologique

1.1.2.1 Habitat écologique

a) Distribution naturelle du bouleau blanc

Aire de distribution

Le bouleau blanc, toutes variétés confondues, est présent dans toutes les régions forestières du Canada, jusqu'à la limite nordique des arbres. On le retrouve également en Alaska et dans la plupart des États du Nord-Est et du Nord-Ouest des États-Unis d'Amérique (figure 1.3) (Farrar 1996 ; Safford et *al.* 1990).

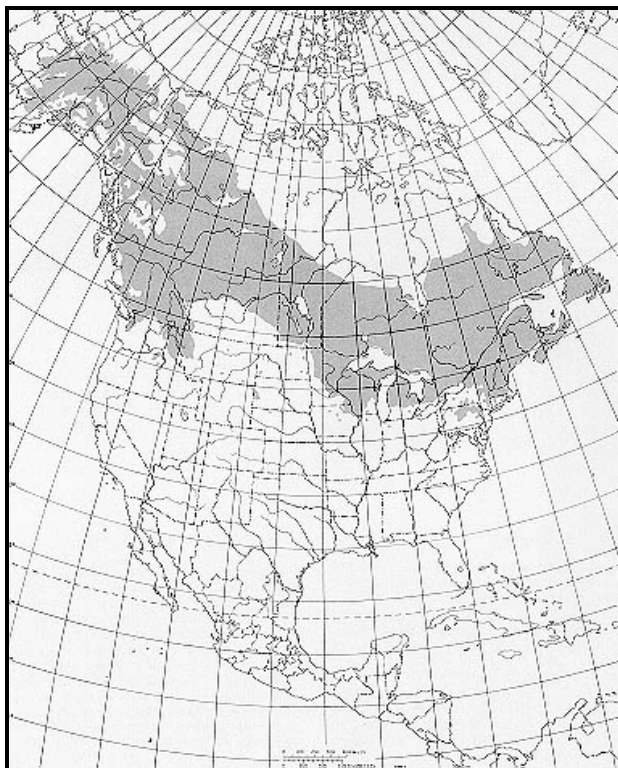


Figure 1.3 Distribution du bouleau blanc en Amérique du Nord (d'après Safford et *al.* 1990)

Distribution selon les zones de végétation du Québec

Le Québec est partagé en trois zones de végétation distinctes : 1) la zone tempérée nordique, dominée par des peuplements feuillus et mixtes; 2) la zone boréale, caractérisée par des peuplements de conifères sempervirents; 3) la zone arctique, marquée par une végétation arbustive et herbacée (annexe 1). Ces trois zones reflètent les grandes subdivisions climatiques québécoises et sont peuplées par une flore distincte. Chaque zone de végétation est subdivisée en sous-zones et en domaines bioclimatiques selon la physionomie de la végétation qui domine les paysages à la fin des successions (MRNFQ 2005e).

Au Québec, le bouleau à papier est omniprésent. On le retrouve aussi bien dans la zone tempérée nordique que dans la zone boréale continue. Cependant, le bouleau à papier est particulièrement abondant dans les domaines bioclimatiques de l'érable à bouleau jaune et de la sapinière à bouleau jaune de l'ouest (voir chapitre 1.1.3, *Inventaire de la ressource disponible*).

b) Climat, sol et topographie

Le bouleau blanc est une espèce nordique adaptée à des étés courts et frais et à des hivers rigoureux et longs. Son aire de distribution se situe entre les isothermes 13 et 21°C du mois de juillet. Le bouleau blanc tolère des niveaux très variés de précipitations, allant de 300 mm/an en Alaska à 1500 mm/an dans certaines régions montagneuses de l'est du continent, comme les Laurentides au Québec. Le bouleau blanc peut pousser sur presque tous les types de sol et dans des conditions topographiques très variées. Cependant, sa croissance est meilleure sur des sols humides, fertiles et bien drainés de type loam sablonneux (Safford et *al.* 1990). Le bouleau blanc est donc une espèce capable de s'adapter à des conditions climatiques, édaphiques et topographiques très variées, ce qui explique principalement l'étendue de sa distribution.

1.1.2.2 Cycle biologique

a) Reproduction et croissance

Chez le bouleau blanc, la production de semences débute vers 15 ans et atteint un niveau maximal entre 40 et 70 ans. En peuplement mature, la production de semences est bonne en moyenne à tous les ans. Les graines de bouleau blanc, légères (3 millions/kg) et ailées, peuvent être dispersées par le vent sur de très grandes distances (Safford et *al.* 1990).

Le taux de germination est optimal sur un sol minéral, mais environ de 50% sur un humus et de 10% sur une litière inadaptée. Les sites ombragés produisent deux fois plus de germinants que des sites complètement ensoleillés. Les graines germent au-dessus du sol, on parle alors de germination épigée (Safford et *al.* 1990).

Les jeunes semis sont habituellement très fragiles, compte tenu de la petite taille des graines. Ils sont très sensibles à l'humidité, à la température, à la lumière et à la qualité du lit de germination. Suite à une coupe forestière, la préparation de terrain par scarifiage ou brûlage dirigé donne un meilleur matériel relatif (*stocking*), en terme de nombre de semis par hectare. Contrairement à la germination, la croissance en hauteur des semis est plus rapide dans un humus, compte tenue de la plus grande disponibilité en substances nutritives (Safford et *al.* 1990).

Le bouleau blanc se régénère également par rejets de souche suite à une coupe forestière ou au passage d'un feu. Les rejets sont généralement plus fréquents lorsque les souches proviennent d'arbres jeunes et vigoureux abattus au printemps (Safford et *al.* 1990).

Sa croissance est très rapide au cours des premières années. D'ailleurs, certains arbres peuvent atteindre 20 cm au dhp (*diamètre à hauteur de poitrine*) dès l'âge de 30 ans. Le bouleau blanc est également une espèce peu longévive et sa croissance ralentit très tôt pour devenir presque négligeable chez certains vieux arbres. Les arbres atteignent leur maturité entre 60 et 90 ans, puis présentent quelques symptômes de dépérissement en vieillissant. À maturité, les arbres mesurent en moyenne 25 à 30 cm au dhp et 21 m de hauteur (Safford et *al.* 1990).

Cependant, la taille d'un arbre à un âge donné varie selon la qualité de station et les conditions climatiques de son lieu de croissance. Quoiqu'il en soit, certains arbres peuvent vivre au-delà de 140 ans, voir 200 ans. On retrouve généralement les individus les plus âgés sur des stations pauvres au climat plutôt froid. Des bouleaux blancs de plus de 200 ans ont été découverts dans les Appalaches au New Hampshire (Godbout 2002; Safford et *al.* 1990).

b) Système racinaire

Le système racinaire est fin et très superficiel. Il n'y a pas de racine pivotante et plus de 60% des radicelles se retrouvent dans les six premiers centimètres du sol. L'enfouissement des racines dépend cependant de l'épaisseur du sol forestier et varie selon les peuplements forestiers et les individus. Des vents violents peuvent endommager un arbre sans le déraciner. Par contre, suite à une coupe partielle, les dommages occasionnés aux racines superficielles sont souvent à l'origine du phénomène de dépérissement ou de mort en cime du bouleau blanc (voir chapitre 1.1.2.3, *Dépérissement du bouleau à papier*) (Godbout 2002; Safford et *al.* 1990).

c) Succession forestière

Le bouleau blanc est une espèce pionnière héliophile. Il peut former des peuplements purs après une coupe forestière sévère, une épidémie d'insectes ou le passage d'un feu. Dans le

domaine de la sapinière à bouleau blanc, cette première étape de la succession forestière dure environ 100 ans (De Grandpré et *al.* 1996; Safford et *al.* 1990).

Dans l'Est du Canada, certaines espèces résineuses sciaphiles, comme le sapin baumier (*Abies balsamea*) et l'épinette (*Picea* spp.), produisent régulièrement des graines et se régénèrent aisément sous le couvert forestier. Au contraire, la régénération en bouleau à papier est limitée par le manque de lumière. Il en va de même pour les tiges de bouleau opprimées ou intermédiaires qui dépérissent progressivement (De Grandpré et *al.* 1996).

À terme, les espèces résineuses prennent le dessus pour former des peuplements mixtes ou résineux. Seuls les bouleaux à papier de la strate dominante, c'est-à-dire les plus vigoureux, survivent. Toutefois, le bouleau à papier peut profiter d'une ouverture du couvert forestier, causée par la mort ou le déracinage d'un arbre, pour se régénérer. De cette manière, il peut se maintenir dans des peuplements à dominance résineuse pour former des pessières ou des sapinières à bouleau blanc (De Grandpré et *al.* 1996).

1.1.2.3 Dépérissement du bouleau à papier

a) Dépérissement historique du bouleau

Au cours des années 1930 et 1940, le bouleau à papier a été affecté par un dépérissement de grande ampleur, dont les origines sont encore peu connues. Les premiers symptômes de dépérissement du bouleau ont été observés dans les Maritimes en 1935, puis la maladie s'est étendue rapidement à tout l'Est du Canada et des États-Unis. Ce dépérissement généralisé a affecté principalement le bouleau à papier et dans une moindre mesure le bouleau jaune (Lachance 1996; Safford et *al.* 1990).

De manière générale, la coloration précoce du feuillage et l'apparition de rameaux morts sont les premiers symptômes de dépérissement observables. On assiste ensuite à la mort en cime qui débute dès l'apparition de quelques branches mortes. Ce phénomène peut s'accroître du haut vers le bas de la cime et se poursuivre jusqu'à la mort de l'arbre sur une période de quelques années (Lachance 1996).

Par définition, il est difficile de préciser la ou les causes exactes d'un dépérissement puisqu'il s'agit d'une maladie complexe. Selon Lachance (1996), des étés plus chauds et

plus secs que la normale ont pu endommager le système racinaire superficiel des bouleaux à papier. D'autre part, des attaques répétées de l'agrile du bouleau (*Agrilus anxius* Gory) ainsi qu'une épidémie virale sont également des causes envisageables (Lachance 1996).

Ce grand dépérissement s'est résorbé dès 1952. Les arbres gravement atteints ont continué de dépérir, tandis que les plus vigoureux ont survécu. De manière générale, les arbres plus âgés ont été durement affectés, tandis que la régénération semble avoir été épargnée. Au cours des années 1950, l'exploitation commerciale du bouleau à papier et du bouleau jaune cessa temporairement dans tout l'Est du Canada (Lachance 1996).

b) Décadence après coupe ou mort en cime

Le phénomène de décadence du bouleau à papier ou de mort en cime intervient après la coupe d'espèces compagnes en peuplements mixtes. Il s'agit d'une détérioration graduelle de l'état de santé d'un arbre qui aboutit à la mort de celui-ci après quelques années. Ce phénomène est également observé chez le bouleau jaune (Godbout 2002).

En effet, après la récolte des espèces résineuses compagnes, les bouleaux à papier sont fréquemment abandonnés dans les aires de coupe faute de débouchés (figure 1.4). Le phénomène de décadence après coupe a déjà été observé et étudié dans la Réserve Faunique des Laurentides au Québec (Tremblay 1999).



Figure 1.4 Bouleaux à papier abandonnés sur le parterre de coupe, Forêt Montmorency; Université Laval

Le processus d'évapotranspiration est considérablement perturbé suite à une coupe forestière. L'ensoleillement direct et l'effet du vent ont tendance à assécher les horizons de surface du sol (Barry et *al.* 1996). Cet assèchement affecte considérablement les bouleaux à papier résiduels en raison de leur enracinement superficiel. D'autre part, les blessures occasionnées au tronc et aux racines, par le passage de la machinerie, sont également des causes majeures du déclin des arbres. Cet affaiblissement soudain profite aux nombreux insectes et micro-organismes qui parasitent généralement le bouleau à papier. Le stress hydrique, les blessures mécaniques et les attaques d'agents pathogènes provoquent le déclin et la mort certaine des bouleaux, quelques années seulement après la coupe (Godbout 2002; McLaughlin 2000; Safford et *al.* 1990).

1.1.3 Inventaire de la ressource disponible

1.1.3.1 Ressource bouleau au Canada

Le Canada possède la troisième plus grande forêt du monde, après la Fédération de Russie et le Brésil (FAO 2005). La superficie totale de ses terres, y compris les eaux douces, avoisine le milliard d'hectares. Environ 40% des terres du Canada sont boisées et la forêt canadienne couvre une superficie totale de 310 millions d'hectares. Près de 89% de cette superficie forestière est classée comme terrain forestier productif. Ce terrain forestier représente un volume marchand brut de 29 milliards de m³, composé à 77% de résineux et à 23% de feuillus. Malgré les limites nordiques du pays, la ressource feuillue est donc abondante au Canada (RNCan 2005b).

Compte tenu de l'immensité du territoire observé, l'inventaire forestier du Canada décrit uniquement la ressource disponible par groupement d'espèces. Les peupliers, les bouleaux et les érables sont les principaux groupements feuillus avec des volumes marchands bruts de 3 787, 1 285 et 706 millions de m³. Après les peupliers, les bouleaux constituent donc le deuxième groupement de feuillus le plus abondant au Canada. Son volume marchand brut équivaut à 20% du volume feuillu total et à près de 5% du volume total toutes espèces confondues (RNCan 2005b).

La province du Québec détient presque la moitié de la ressource disponible en bouleaux en terme de volume marchand brut (tableau 1.1). Plus de 80% de ce volume est localisé au Québec et en Ontario (RNCan 2005b). Ces deux provinces devraient donc bénéficier économiquement de l'exploitation de cette ressource, compte tenu de sa disponibilité.

Tableau 1.1 Répartition du volume marchand brut en bouleaux par province et territoire du Canada (d'après RNCan 2005b)

Province et territoire	Volume marchand brut	
	<i>millions de m³</i>	%
Québec	610	47,5
Ontario	433	33,7
Colombie Britannique	56	4,4
Nouveau Brunswick	49	3,8
Saskatchewan	48	3,7
Alberta	32	2,5
Terre-Neuve et Labrador	32	2,5
Mannitoba	17	1,3
Île du Prince Édouard	3	0,2
Yukon	3	0,2
Territoires du Nord-Ouest	1	0,1
Nouvelle Écosse	0	0,0
Nunavut	0	0,0
Canada	1285	100,0

1.1.3.2 Ressource bouleau à papier au Québec

a) Importance de la ressource

Selon les statistiques forestières du Québec (MRNFQ 2005b), le bouleau à papier représente environ 28% du volume marchand brut feuillu et 10% du volume marchand brut toutes espèces confondues, de la zone d'inventaire intensif (tableau 1.2). Le bouleau à papier est donc la première espèce feuillue de la province en terme de volume. Environ 50% du volume de bouleau à papier provient de forêts mixtes, 36 % de forêts feuillues et 14% de forêts résineuses (MRNFQ 2005b).

Tableau 1.2 Répartition du volume marchand brut par groupement d'espèces (d'après MRNFQ 2005b)

Groupement d'espèces	Volume marchand brut	
	millions m ³	% ¹
Sapin baumier - épinette blanche	704,2	18,6
Mélèze - autres épinettes	1289,8	34,1
Pin gris	210,6	5,6
Autres pins	69,0	1,8
Thuya occidental	98,1	2,6
Pruche du Canada	28,3	0,7
<i>Total résineux</i>	<i>2399,9</i>	<i>63,5</i>
Bouleau à papier	384,3	10,1
Bouleau jaune	185,7	4,9
Peupliers	344,7	9,1
Érables	367,3	9,7
Autres	101,5	2,7
<i>Total feuillus</i>	<i>1383,4</i>	<i>36,5</i>
Total	3783,2	100,0

¹ Pourcentage par rapport au volume total, toutes espèces confondues.

b) Répartition du bouleau à papier par région administrative

En terme de volume disponible, les régions de l'Abitibi-Témiscamingue, du Saguenay-Lac-Saint-Jean et de la Mauricie sont les plus importantes, avec respectivement 77, 60 et 60 millions de m³ (tableau 1.3, figure 1.5). Ces trois régions disposent d'un peu plus de 50% de la ressource totale en bouleau à papier du Québec (MRNFQ 2005b).

Tableau 1.3 Répartition du volume marchand brut de bouleau à papier par région administrative (d'après MRNFQ 2005b)

Région administrative	Volume marchand brut		Densité
	(millions m ³)	(%) ¹	(m ³ /ha)
(1) Bas-Saint-Laurent	14,4	8,8	7,8
(2) Saguenay—Lac-Saint-Jean	60,2	10,7	8,0
(3) Capitale-Nationale	17,0	13,9	10,8
(4) Mauricie	59,7	18,0	19,0
(5) Estrie	3,1	3,5	4,1
(6) Montréal	0,0	4,2	3,2
(7) Outaouais	41,3	11,3	15,2
(8) Abitibi-Témiscamingue	77,0	17,2	15,8
(9) Côte-Nord	31,6	4,8	3,9
(10) Nord-du-Québec	13,4	3,4	2,3
(11) Gaspésie—Îles-de-la-Madeleine	14,7	10,7	9,0
(12) Chaudière-Appalaches	5,7	6,1	5,2
(13) Laval	0,0	5,6	3,3
(14) Lanaudière	19,4	16,8	19,6
(15) Laurentides	24,5	10,1	13,8
(16) Montérégie	0,9	2,1	2,5
(17) Centre-du-Québec	0,7	2,3	2,0
Total	383,5	10,1	9,0

¹ Pourcentage par rapport au volume total, toutes espèces confondues

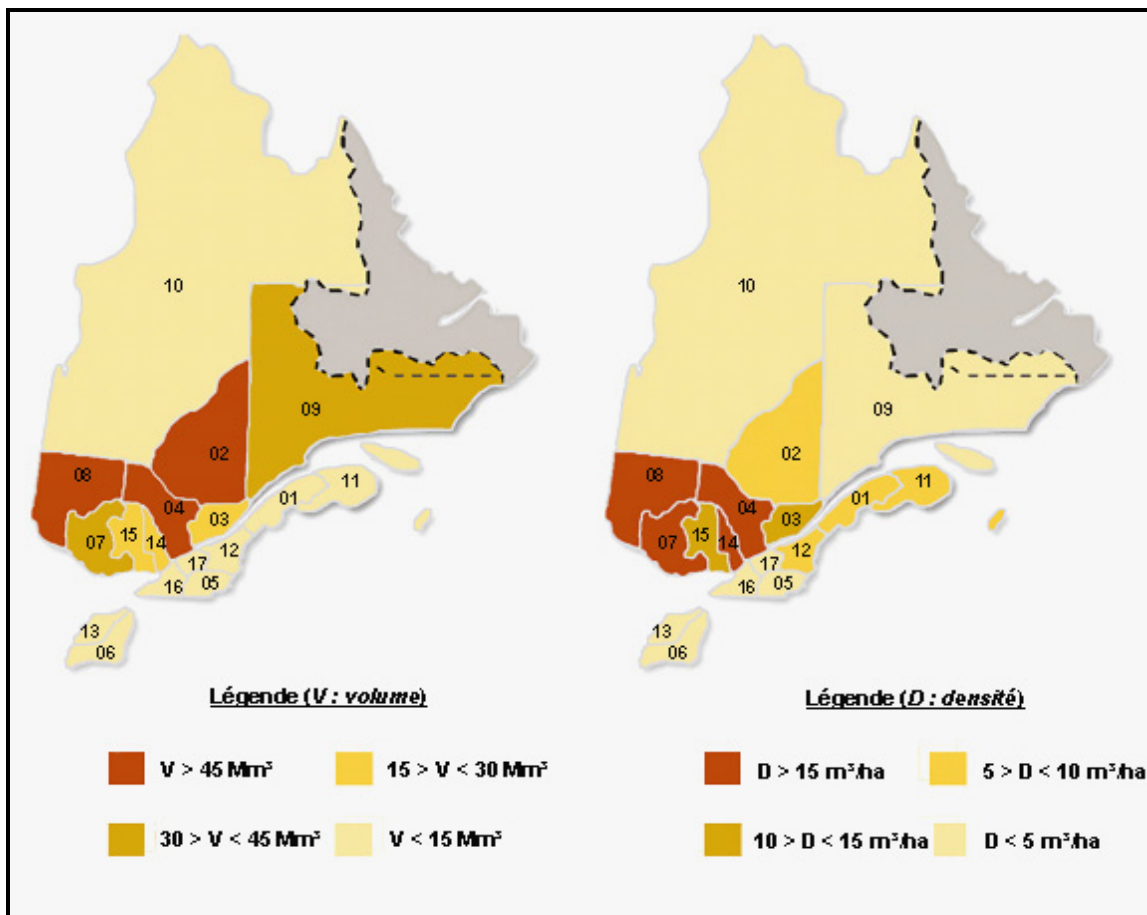


Figure 1.5 Répartition du volume marchand brut de bouleau à papier par région administrative (d'après tableau 1.3)

Les proportions de bouleau à papier sont élevées pour les régions de la Mauricie, de l'Abitibi-Témiscamingue et de Lanaudière avec respectivement 18,0, 17,2 et 16,8% du volume total, toutes espèces confondues (tableau 1.3).

La densité de bouleau à papier, c'est-à-dire le volume marchand brut de cette espèce par hectare de superficie forestière productive (m^3/ha), est en moyenne de $9,0 \text{ m}^3/\text{ha}$ au Québec. La densité est un bon indicateur du potentiel d'exploitation d'une ressource. Par exemple, il serait plus avantageux de construire une usine spécialisée dans la transformation du bouleau à papier en Mauricie ($19 \text{ m}^3/\text{ha}$) plutôt qu'au Saguenay-Lac-Saint-Jean ($8 \text{ m}^3/\text{ha}$), en terme de coûts de transport.

On peut constater que la densité du bouleau à papier est plus importante pour les régions du Sud-Ouest de la province, situées sur la rive nord du Saint-Laurent (figure 1.5). Ainsi, la

densité de bouleau à papier est plus élevée que la moyenne provinciale pour les régions suivantes, dans l'ordre décroissant : la Lanaudière, la Mauricie, l'Abitibi-Témiscamingue, l'Outaouais, les Laurentides et la Capitale-Nationale. Le potentiel d'exploitation du bouleau à papier est donc plus intéressant pour ces régions.

Finalement, la ressource bouleau à papier est particulièrement abondante, en terme de densité, dans les régions des domaines bioclimatiques de l'érablière à bouleau jaune et de la sapinière à bouleau jaune de l'Ouest (figure 1.5; annexe 1).

c) Possibilité, attributions et récoltes par région administrative du Ministère

Le Ministère des Ressources naturelles et de la Faune du Québec calcule à tous les ans la possibilité forestière et le volume d'attribution par unité d'aménagement. La possibilité forestière, ou possibilité annuelle de coupe à rendement soutenu, est le volume maximal de bois que l'on peut récolter annuellement sur un territoire donné sans en diminuer les capacités de production à long terme (MRNFQ 2003a).

En tenant compte des contraintes d'aménagement, le ministère décide ensuite d'un volume de récolte pour chaque territoire, on parle alors de volume d'attribution. Ce volume est, par définition, inférieure ou égale à la possibilité forestière et doit être récolté par les industriels ayant signé un contrat d'aménagement avec le gouvernement (MRNFQ 2003a).

Finalement, il est à noter que les dix régions forestières du Ministère diffèrent légèrement des régions administratives du gouvernement provincial. Ces régions correspondent aux regroupements des aires communes (MRNFQ 2003a).

Au Québec, la possibilité et l'attribution forestière du bouleau à papier sont respectivement de 4,3 et de 1,3 millions de m³ pour l'exercice 2004-2005 (tableau 1.4) (MRNFQ 2005d). En réalité, le volume de bouleau à papier est également comptabilisé dans la catégorie des feuillus durs, ce qui a pour effet de sous-évaluer les niveaux d'attribution de cette espèce et, au contraire, de surévaluer les volumes alloués en feuillus durs. Dans le cas du bouleau à papier, le niveau de récolte final est un meilleur indicateur de l'utilisation réelle de la ressource. Pour l'exercice 2004-2005, on estime ce niveau de récolte à près de 1,8 millions de m³, soit un taux d'utilisation moyen de la ressource de 41%.

Tableau 1.4 Possibilité, attribution, récolte et taux d'utilisation du bouleau à papier par région administrative du Ministère des Ressources naturelles et de la Faune du Québec (d'après MRNFQ 2005c et MRNFQ 2005d)

Région administrative	Possibilité (m ³)	Attribution (m ³)	Récolte (m ³)	Utilisation (Récolte/Possibilité)
(1) Bas-Saint-Laurent	119 375	0	83 972	70 %
(2) Saguenay – Lac-Saint-Jean	972 859	2 550	432 765	44 %
(3) Capitale-Nationale – Chaudière-Appalaches	149 271	3 500	40 642	27 %
(4) Mauricie – Centre-du-Québec	811 200	222 950	451 813	56 %
(5) Estrie	7 100	1 500	4 153	58 %
(6) Montréal	354 900	246 600	218 128	61 %
(7) Outaouais	501 800	398 800	217 027	43 %
(8) Abitibi-Témiscamingue	884 648	376 000	165 479	19 %
(9) Côte-Nord	431 534	27 500	11 678	3 %
(11) Gaspésie – Îles-de-la-Madeleine	86 900	0	129 622	149 %
Total	4 319 587	1 279 400	1 755 279	41 %

Les régions de la Mauricie - Centre du Québec et du Saguenay ont récolté, à elles-seules, près de 50% du volume total des attributions. D'autre part, les régions de la Gaspésie, du Bas-Saint-Laurent, de Montréal, de l'Estrie et de la Mauricie exploitent plus de 50% de leurs volumes alloués. Le volume de récolte en Gaspésie est supérieur à l'attribution. Il s'agit probablement d'un volume conjoncturel qui s'est ajouté à la possibilité pour l'exercice 2004-2005. La région de la Côte-Nord fait office de mauvais élève avec un taux d'utilisation de la ressource de seulement 3%.

Finalement, environ 59% de la ressource disponible en bouleau à papier n'a pas été récoltée par les bénéficiaires de CAAF, lors de l'exercice 2004-2005. À titre de comparaison, pour l'exercice 2002-2003, les taux d'utilisation du groupe SEPM (sapin, épinettes, pin gris et mélèze) et du groupe des feuillus durs étaient respectivement de 100% et 34,3% (CÉGFPQ 2004).

d) Qualité des tiges par région administrative forestière

Au Québec, on attribue une qualité aux feuillus sur pied, dont le dhp avec écorce est supérieur à 23 cm. Pour cela, on sélectionne une bille de 3,7 m, dans les 5 premiers mètres de l'arbre, présentant le moins de défauts de surface ou de défauts mesurables. On classifie ensuite cette bille selon son potentiel de production de bois de sciage. Il existe une grille de classification comprenant quatre classes de qualité distinctes (A, B, C, D), définies selon le diamètre de la tige, le rendement en débits clairs de la face de classification et le pourcentage de réduction volumétrique acceptable (annexe 2) (MRNFQ 2002a).

Le volume de bouleau à papier récolté au cours de l'exercice 2004-2005 a été réparti selon la grille de classification du ministère (tableau 1.5). On constate que le potentiel de production du bouleau à papier en bois de sciage et déroulage est très limité au Québec. Environ 80% des tiges sont de qualité trituration (D), 20% de qualité sciage (B et C) et moins de 1% de qualité déroulage (A). On n'observe aucune différence notable entre les régions forestières du Ministère en ce qui concerne la qualité des tiges. Cependant, les régions de l'Estrie et de la Côte-Nord ne semblent pas avoir considéré les qualités sciage (C) et sciage supérieur (B) dans leurs grilles de classification.

Tableau 1.5 Répartition du volume récolté de bouleau à papier par classe de qualité de tiges et par région administrative du Ministère (d'après MRNFQ 2005d)

Région	Volume récolté (%)			
	A (déroulage)	B (sciage +)	C (sciage)	D (pâte)
(1) Bas-Saint-Laurent	0,2	3,2	9,0	87,6
(2) Saguenay – Lac-Saint-Jean	0,0	3,2	16,6	80,1
(3) Capitale-Nationale – Chaudière-Appalaches	0,8	5,5	11,0	82,7
(4) Mauricie – Centre-du-Québec	0,4	5,6	16,6	77,4
(5) Estrie	1,3	15,5	0,0	83,3
(6) Montréal	0,4	8,8	17,3	73,5
(7) Outaouais	0,4	7,1	13,3	79,3
(8) Abitibi-Témiscamingue	0,9	3,6	10,8	84,7
(9) Côte-Nord	0,0	0,0	87,8	12,2
(11) Gaspésie – Îles-de-la-Madeleine	0,0	2,4	8,6	89,0
Total	0,3	5,0	15,1	79,5

Les courbures et les faibles dimensions des tiges de bouleau à papier expliquent principalement la qualité médiocre de celles-ci, en comparaison au bouleau jaune et à l'érable à sucre. Ces caractéristiques ne répondent pas aux exigences actuelles en terme de transformation, d'où la proportion importante de tiges de qualité trituration au Québec. Le sciage et le déroulage non-conventionnels sont donc des alternatives très prometteuses pour l'utilisation de la ressource disponible en bouleau à papier.

1.1.4 Aménagement du bouleau blanc

1.1.4.1 Aménagement du bouleau blanc en Amérique du Nord

En Amérique du Nord, les peuplements purs et mixtes de bouleau blanc sont aménagés de manière extensive. Les peuplements purs de bouleaux blancs sont régénérés naturellement, même si dans certains cas un regarnissage s'avère nécessaire. Le terrain est scarifié de manière à préparer le lit de génération et à favoriser la régénération en bouleau blanc. Un dégagement est effectué sur les meilleurs sites de manière à éliminer les mauvaises herbes. La fertilisation ou l'élagage ne sont pas pratiqués. En théorie, des éclaircies précommerciales et commerciales sont recommandées pour maximiser la récolte (Marquis *et al.* 1969; Safford *et al.* 1990).

En réalité, une seule coupe de régénération est pratiquée, dans des classes d'âge de 70 ans et plus, de manière à récolter toutes les tiges marchandes. Le moment et l'intensité d'une éclaircie commerciale dans une bétulaie blanche sont sujets à discussion faute de connaissances et de résultats probants. En effet, il est encore difficile de prévoir si une éclaircie commerciale permettrait d'améliorer le rendement en bois d'œuvre (Godbout 2002).

En peuplements mixtes à dominance résineuse, les pratiques sylvicoles employées visent à optimiser essentiellement la productivité des résineux. Les plus belles tiges de bouleaux blancs sont toutefois récoltées après coupe si le volume est suffisant. Les autres arbres sont abandonnés sur le parterre forestier et dépérissent quelques années après la coupe.

Selon Safford *et al.* (1990), les rendements obtenus en Alaska, en Ontario et en Nouvelle-Angleterre, pour des bétulaies blanches à maturité, sont comparables pour une même

qualité de station. Pour un peuplement de 80 ans, la production totale est d'environ 230 à 270 m³/ha sur des stations riches et d'environ 100 à 185 m³/ha sur des stations pauvres. L'accroissement annuel moyen est donc de 2,9 à 3,4 m³/ha-an sur sites riches et de 1,3 à 2,3 m³/ha-an sur sites pauvres (Safford et *al.* 1990).

1.1.4.2 Aménagement du bouleau blanc en Finlande

Le bouleau verruqueux et le bouleau pubescent sont les deux bouleaux blancs européens. Ces deux espèces présentent des caractéristiques botaniques et écologiques semblables à celles du bouleau à papier. Ce sont des bouleaux de comportement héliophile, peu longévifs, avec une écorce mince et blanche, et un enracinement superficiel. Cependant, leur écorce ne s'exfolie pas et la morphologie de leurs feuilles diffère sensiblement, entre autres caractéristiques. Finalement, le bouleau verruqueux est une espèce mésophile tandis que le bouleau pubescent serait davantage hygrophile (Lemaire et *al.* 1999).

En Finlande, la ressource feuillue, essentiellement du bouleau, est estimée à environ 300 millions de m³, soit 18% de l'inventaire total. Le bouleau croît naturellement en peuplements purs ou en peuplements mixtes avec le pin sylvestre (*Pinus sylvestris* L.) ou l'épinette de Norvège (*Picea abies* Karst.) (Puttonen 1996).

Le bouleau est aménagé en peuplements équiennes à partir d'une régénération naturelle ou artificielle. Des vergers à graines et des semences améliorées sont utilisés pour établir des plantations de bouleaux verruqueux (figure 1.6). La densité de plantation est de 1600 à 2000 tiges/ha sur des stations de qualité bonne à élevée. Une telle densité favorise l'élagage naturel des branches basses et augmente ainsi la qualité des billes destinées au déroulage.

Des scarificateurs à disques sont utilisés pour préparer le terrain et faciliter l'ensemencement. Pour favoriser la régénération naturelle, 10 à 20 semenciers par hectare sont laissés sur le parterre forestier. Finalement, les sites sont protégés et entretenus de manière à minimiser les dommages causés par les campagnols, les orignaux et les mauvaises herbes (Puttonen 1996).

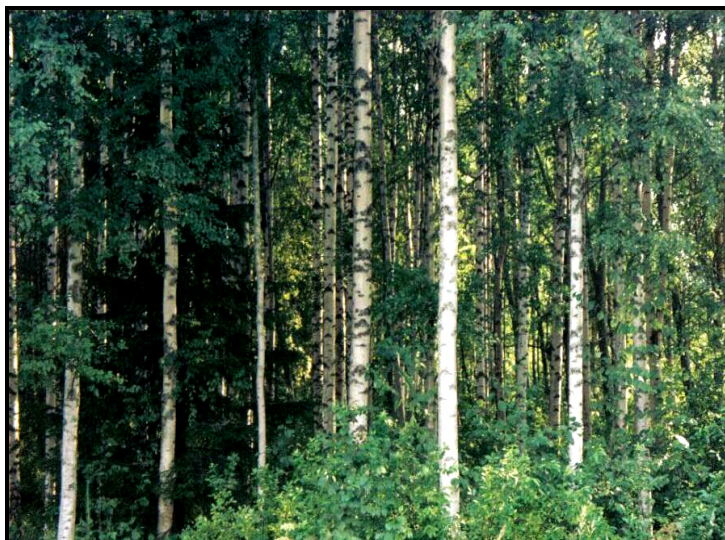


Figure 1.6 Jeune plantation de bouleaux verruqueux, Pielavesi, Finlande

Deux dépressages, ou éclaircies précommerciales, sont recommandés pour les peuplements naturels de bouleaux verruqueux, tandis qu'un seul est nécessaire dans le cas du bouleau pubescent. Une première éclaircie commerciale est réalisée chez le bouleau verruqueux à une hauteur dominante de 14-15 mètres. La récolte est utilisée comme bois à pâte. Une ou deux éclaircies commerciales sont effectuées par la suite (Puttonen 1996).

La production totale d'un peuplement pur de bouleaux verruqueux peut atteindre 550 à 600 m³/ha sur une période de 80 ans, soit un accroissement annuel moyen de 7,5 m³/ha-an. Dans le cas de plantations sur sols fertiles avec du matériel génétiquement amélioré, il est possible de pratiquer une coupe finale à l'âge de 40 ans. Le rendement est alors supérieur à 400 m³/ha, soit un accroissement annuel moyen de 10 m³/ha-an (Puttonen 1996).

La fertilisation s'est avérée inefficace chez le bouleau et l'élagage des branches mortes n'est pas généralisé à cause des problèmes de carie. D'autre part, une faible proportion de bouleaux verruqueux (25%) dans un peuplement d'épinettes de Norvège semble améliorer la croissance en volume du peuplement de 3 à 5 % pour une révolution de 80 à 90 ans. Dans le cas d'un aménagement équienne de pins sylvestres et bouleaux, il est recommandé de conserver 20 à 40 % de bouleaux au cours de la première moitié d'une révolution de 70 à 90 ans (Puttonen 1996).

1.2 Propriétés et qualité du bois

1.2.1 Structure et apparence du bois

1.2.1.1 Structure macroscopique du bois

Selon Panshin et de Zeeuw (1980), il n'est pas possible de dissocier les espèces du genre bouleau selon les caractéristiques macroscopiques et microscopiques du bois. La description présentée ci-dessous s'applique donc au genre bouleau en général.

Chez le bouleau, l'aubier est de couleur blanc crème, tandis que le duramen, plus foncé, est de couleur brunâtre, voir légèrement rougeâtre. Il s'agit d'un bois sans odeur et sans goût particulier (Panshin et de Zeeuw 1980).

Les cernes annuels sont très difficiles à discerner sans loupe. Ils sont toutefois délimités par une mince ligne de tissu fibreux plus dense et par des vaisseaux habituellement plus petits. Le parenchyme ne peut être observé sans loupe (Cloutier 2005a ; Panshin et de Zeeuw 1980).

Le bois de bouleau est un bois à pores diffus. Les vaisseaux, sensiblement de même taille, sont distribués uniformément à l'intérieur des cernes. Ils sont visibles à l'œil nu et apparaissent comme de petits points pâles, manifestement plus larges que les rayons les plus gros. Ils ne sont pas groupés, mais isolés ou disposés en files radiales de 2 à 4 (Cloutier 2005b ; Panshin et de Zeeuw 1980).

1.2.1.2 Structure microscopique du bois

a) Caractéristiques des vaisseaux

En coupe transversale, les vaisseaux sont de peu à modérément nombreux, soit de 16 à 50 vaisseaux/mm². Le diamètre tangentiel des plus gros vaisseaux, en incluant les parois, est de petit à moyen, soit de 51 à 150 μm . Les cloisons terminales des éléments de vaisseaux sont exclusivement perforées en grille (Cloutier 2005a; Panshin et de Zeeuw 1980).

Les ponctuations intervasculaires sont généralement disposées en files obliques. Elles sont de petites tailles, entre 2 et 4 μm de diamètre, et de forme orbiculaire à hexagonale. Les orifices des ponctuations intervasculaires sont fréquemment confluent. Il n'y a pas

d'épaississements spiralés sur les vaisseaux (figure 1.7) (Cloutier 2005a; Panshin et de Zeeuw 1980).

b) Caractéristiques du parenchyme

En coupe transversale, on peut observer du parenchyme longitudinal paratrachéal et du parenchyme longitudinal apotrachéal. Le parenchyme apotrachéal est dispersé, dispersé en chaînettes et terminal (figure 1.8) (Panshin et de Zeeuw 1980). Par définition, le parenchyme apotrachéal est typiquement isolé des vaisseaux, tandis que le parenchyme paratrachéal est associé à ces derniers (Cloutier 2005a).

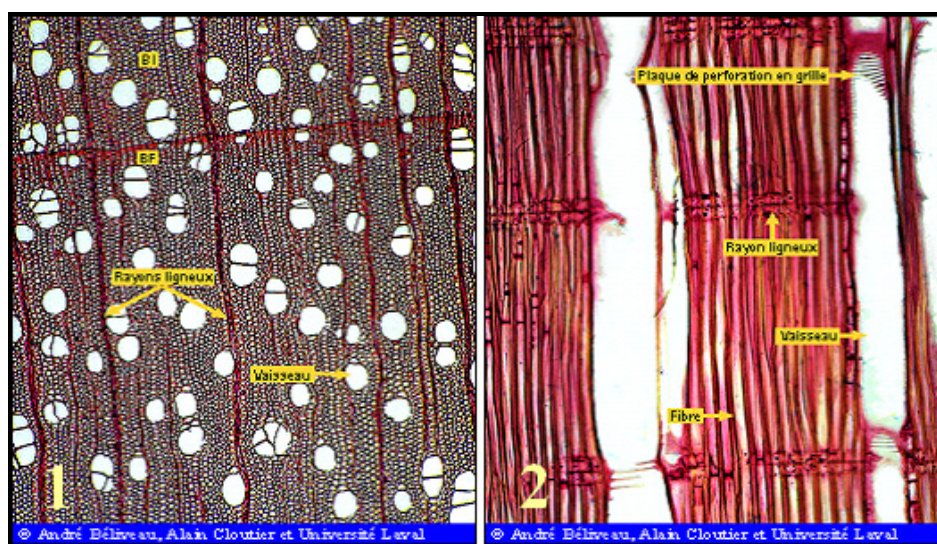


Figure 1.7 Photomicrographies du bois de bouleau : (1) plan tangentiel-radial, 40x, (2) plan longitudinal-radial, 100x (d'après Cloutier 2005a)

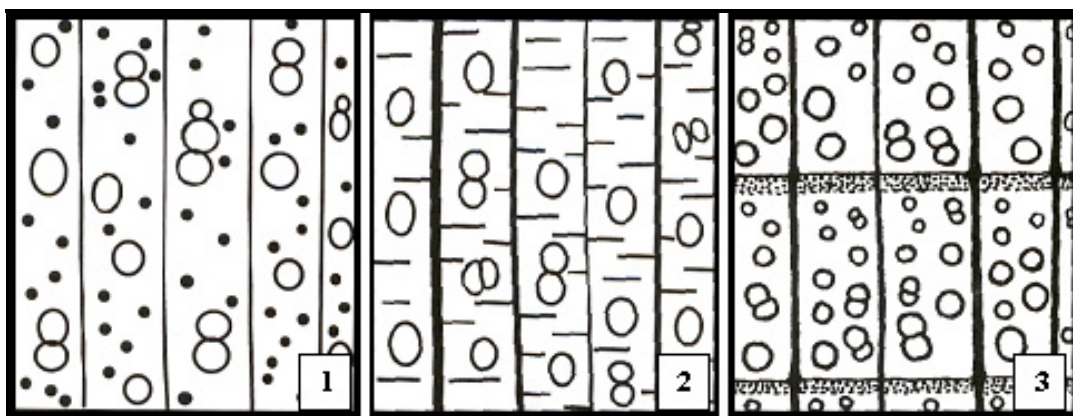


Figure 1.8 Parenchyme apotrachéal : (1) dispersé, (2) dispersé en chaînettes, (3) terminal (d'après Jane 1970)

c) Caractéristiques des fibres

Les fibres du bouleau sont des fibres trachéides, du fait de la présence de ponctuations aréolées. Les parois des fibres sont minces à modérément épaisses et leurs diamètres tangentiels, en incluant les parois, sont de moyens à grossiers, soit de 16 à 30 μm . La longueur moyenne des fibres du bouleau à papier et du bouleau jaune est respectivement de 1,35 mm et de 1,38 mm (Cloutier 2005a; Panshin et de Zeeuw 1980).

d) Caractéristiques des rayons

Les rayons sont homogènes, c'est-à-dire composés uniquement de cellules de parenchyme « couchées », soient des cellules allongées horizontalement. Ils sont non-étagés et de 1 à 5 sériés. Les ponctuations rayons-vaisseaux sont semblables aux ponctuations intervasculaires (Panshin et de Zeeuw 1980).

e) Composition cellulaire

La proportion du volume occupée par les différentes cellules influence les propriétés physiques et mécaniques du bois. On peut constater que la proportion de fibres chez le bouleau à papier est particulièrement élevée, contrairement à la proportion de vaisseaux (tableau 1.6). De ce point de vue, la structure du bois de bouleau à papier diffère nettement de celle du bouleau jaune.

Tableau 1.6 Répartition du volume par type cellulaire et par espèce feuillue de l'Est du Canada (d'après Panshin et de Zeeuw 1980)

Espèce	Cellules du bois			
	Vaisseaux	Fibres	Rayons	Parenchyme longitudinal
Bouleau à papier	10,6	75,7	11,7	2,0
Bouleau jaune	21,4	63,8	10,8	2,0
Cerisier tardif	41,4	41,4	17,2	0,0
Chêne rouge	21,6	43,5	21,4	13,5
Érable à sucre	21,0	61,0	17,9	0,1
Frêne blanc	20,4	61,7	11,9	4,2
Frêne noir	11,6	69,4	12,0	7,0
Noyer cendré	22,6	58,0	10,4	9,0
Noyer noir	21,0	48,7	16,8	13,5
Orme d'Amérique	48,0	34,7	11,3	6,0
Moyenne	24,0	55,8	14,1	5,7

1.2.1.3 Apparence du bois

De part sa structure anatomique, le bouleau a une texture fine et homogène qui s'apparente à celle de l'érable à sucre (*Acer saccharum* Marsh.) (Panshin et de Zeeuw 1980). De plus, le bouleau est reconnu comme un excellent bois d'apparence compte tenu de la couleur blanc-crème de son aubier et de l'uniformité de sa teinte (figure 1.9) (Brière 1992).

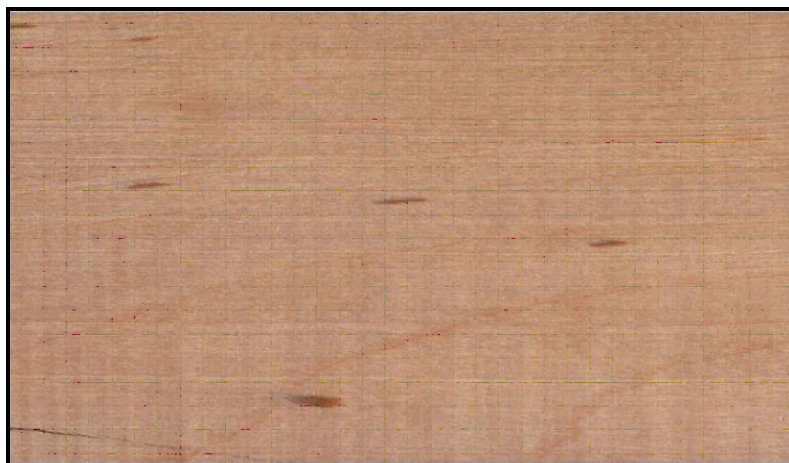


Figure 1.9 Face longitudinale d'une planchette de bois d'aubier de bouleau

En général, le bouleau est donc apprécié pour la qualité esthétique de son bois et on l'utilise surtout pour la fabrication de produits d'apparence comme les meubles, les planchers, les escaliers, les lambris intérieurs et les clôtures par exemple. Finalement, le grain et la texture du bouleau permettent d'agencer diverses composantes sans avoir à tenir compte de l'orientation des plans apparents du bois (Brière 1992).

1.2.1.4 Défauts d'apparence

Toutefois, le bouleau à papier présente quelques défauts plus ou moins importants qui peuvent affecter l'apparence générale de son bois. Comme nous le savons déjà, le duramen du bouleau à papier est relativement foncé. Sa coloration brun-rougeâtre n'est pas très appréciée par l'industrie du sciage et du déroulage en général (Brière 1992). D'ailleurs, il n'existe pas de qualité standard, définie par la NHLA, pour des sciages de bouleau à papier colorés par du duramen, contrairement au bouleau jaune (voir chapitre 1.3.2.2, *Classement et prix des sciages à usage industriel*). De plus, les sciages et les placages présentant des variations de couleur importantes sont généralement déclassés par rapport à ceux de couleur uniforme. D'autre part, la finition du bois de duramen est davantage problématique, sachant que la perméabilité du bois est généralement réduite et qu'il est difficile de modifier la couleur d'un bois déjà très foncée. En conclusion, le duramen coloré peut-être considéré comme le principal défaut d'apparence du bouleau à papier, au sciage et au déroulage, notamment lorsque sa proportion est élevée.

Selon Brière (1992), le bouleau à papier est également caractérisé par un nombre élevé de petits nœuds notamment dans la partie centrale de l'arbre. Ce défaut est davantage problématique lorsque les billes récoltées sont de faibles dimensions.

Il existe également d'autres défauts d'apparence qui ne sont pas reliés au développement naturel de l'arbre. Il s'agit principalement des caries, des colorations et des taches médullaires. Ces défauts sont de nature pathologique et peuvent considérablement affecter l'apparence et les propriétés techniques du bois.

1.2.1.5 Défauts d'apparence de nature pathologique

a) Importance des défauts

Le bouleau à papier est peu affecté par les défauts d'apparence de nature pathologique avant abattage. En effet, son coefficient de réfraction, c'est-à-dire le pourcentage du volume marchand brut sujet à des défauts ou anomalies du bois, est environ trois fois inférieur à celui du bouleau jaune (tableau 1.7) (Allen 1996; Basham et Morawsky 1964).

D'autre part, une enquête réalisée auprès de 26 industriels ontariens, au début des années 1970, a révélé que la présence de défauts chez le bouleau à papier n'était pas un problème majeur pour son utilisation (Basham 1991).

Au cours des années 1950, 936 bouleaux à papier de la région forestière boréale de l'Ontario furent échantillonnés afin de caractériser la présence de défauts chez cette espèce. Les résultats de cette vaste étude ont été analysés par Basham en 1991 (tableau 1.8). Ainsi, la proportion de bois carié serait inférieure à 3% du volume total chez des individus de moins de 100 ans. Cependant, la coloration anormale du bois représenterait environ 70% du volume total des défauts (Basham 1991). Le bouleau à papier est donc une espèce peu vulnérable aux caries, mais très sensible à la coloration du bois.

Tableau 1.7 Coefficient de réfraction de quelques espèces feuillues du Canada (d'après Basham et Morawsky 1964)

Espèce	Coefficient de réfraction (%)
Aulne rouge	4,1
Bouleau à papier	15,0
Bouleau jaune	43,2
Érable à sucre	28,5
Frêne américain	58,4
Hêtre à grandes feuilles	31,2
Peuplier faux-tremble	27,1
Tilleul américain	14,9

Tableau 1.8 Proportion de bois carié ou anormalement coloré chez le bouleau à papier par classe d'âges (d'après Basham 1991)

Classe d'âges	nombre d'arbres	carie (%)	coloration (%)
21-40	2	0,0	0,0
41-60	77	0,9	3,0
61-80	304	1,2	4,8
81-100	284	2,3	9,0
101-120	165	6,7	13,9
121-140	91	8,2	12,4
141+	13	7,7	10,0

b) Cœur rouge ou faux duramen

Les termes « cœur rouge » (*redheart*) et « faux duramen » (*false heartwood*) désignent les colorations rougeâtres anormalement présentes dans la partie centrale d'une tige et observées chez certaines espèces feuillues de la zone tempérée (OQLF 2005). En Europe, le développement du cœur rouge chez le hêtre commun (*Fagus sylvatica* L.) a été très étudié en raison de son impact économique (Knoke 2003, Knoke 2002, Seeling 1998, Sachsse 1991, etc...).

Cependant, il semble exister une certaine confusion dans l'utilisation du terme « cœur rouge », notamment lorsque l'espèce considérée possède naturellement un duramen foncé (Allen 1996). Le cœur rouge est une coloration du bois qui fait suite à une blessure. Il s'agit d'une étape essentielle de l'établissement et du développement de certaines pourritures, telle que définie par Shigo et Marx (1977) avec le modèle de compartimentage du bois ou modèle du CODIT (*Compartmentalization Of Decay In Trees*). Au contraire, la formation du duramen ou duraminisation est un processus naturel initié par l'arbre lui-même.

Le cœur rouge affecte les propriétés du bois et se distingue du vrai duramen par une teneur en humidité plus élevée (Basham 1991). D'autre part, le duramen prend la forme d'un cône continu dans la partie centrale de l'arbre, tandis que le cœur rouge forme des colonnes discontinues de coloration (figure 1.10) (Shigo 1983).



Figure 1.10 Colonnes de coloration discontinues et associées à des blessures chez un bouleau à papier (d'après Shigo 1983)

Les dissections faites par Shigo (1983) montrent une certaine variation dans la hauteur et la largeur des colonnes de coloration (figure 1.10). Ainsi, la taille et la profondeur d'une blessure semblent affecter directement le développement radial et longitudinal de la coloration (Shigo 1983).

c) Échauffure du bois abattu

L'échauffure est une modification légère de la composition chimique du bois qui serait provoquée par l'attaque de champignons, généralement après abattage. Elle se manifeste par un changement de coloration et une modification sensible des propriétés (OQLF 2005). Il s'agit du premier stade de détérioration du bois avant la pourriture. L'échauffure du bois abattu est considérée par l'industrie comme un défaut sévère du bois.

Selon Brière (1992), le bouleau à papier serait très susceptible à l'échauffure du bois abattu, comparé au bouleau jaune et à l'érable à sucre. Les pertes liées à cette détérioration du bois sont maximales lorsque les tiges sont récoltées entre mai et septembre; on parle alors de bois abattus « en sève ». Pour éviter les problèmes liés à l'échauffure du bouleau, on recommande d'arroser en continu les grumes entreposées ou de les transformer dans des délais très courts de une à deux semaines (Brière 1992).

d) Caries du bois sur pied

Les caries, ou pourritures, sont l'étape finale du processus de détérioration du bois provoqué par l'activité de champignons ou d'autres micro-organismes. Les propriétés chimiques et physiques du bois sont alors profondément altérées et le bois carié est généralement impropre à tous usages. Les pourritures peuvent prendre des formes variées (figure 1.11). On subdivise parfois les caries du bois sur pied, aussi appelées caries du cœur, en caries du tronc et en caries des racines (pourridiés) (Rioux 1996).

La carie blanche spongieuse (*Phellinus ignarius*) et la carie brune filandreuse (*Cystostereum murrayi* et *Pholiota aurivella*) sont les deux principales caries du bois sur pied affectant le bouleau à papier. Les caries et les maladies des racines les plus fréquentes sont causées par plusieurs champignons de la famille des *Armillaria*. Les maladies à chancre les plus répandues chez le bouleau sont causées par *Inonotus obliquus*, *Nectria galligena* et *Cerrena unicolor*. Ces champignons infectent l'arbre par de petites blessures ou des branches mortes (Allen 1996 ; Basham 1991; McLaughlin 2000).



Figure 1.11 Sections transversales de sciages de bouleau à papier présentant des formes diverses d'échauffure et de pourriture, scierie Thomas-Louis Tremblay, Québec

e) Taches médullaires

Les taches médullaires (*pith ray flecks* ou *worm tracks*) sont, par définition, des îlots irréguliers de tissu parenchymateux anormal, souvent cicatriciel, noyé dans le bois et qui apparaissent comme des stries sur les faces longitudinales (figures 1.9 et 1.12). Elles sont ordinairement causées par des larves mineuses vivant dans le cambium (OQLF 2005). Ces taches sont parfois confondues à tort, avec des inclusions d'écorce ou des rayons du bois, d'où le qualificatif médullaire.

Les mineuses du cambium du bouleau sont des larves de diptères de la famille des *Agromyzidae*. Ces larves creusent des galeries dans les tissus du xylème en cours de différenciation et entraînent la formation de galeries brunâtres permanentes dans le bois, après cicatrisation du cambium. L'insecte responsable des taches médullaires chez le bouleau est l'agromyze du cambium (*birch miner cambium*, *Phytobia betulivora* en Amérique du nord et *Phytobia betulae* en Scandinavie) (Salomon 1995; Ylioja et al. 2000).



Figure 1.12 Sciages de bouleau avec taches médullaires (d'après Salomon 1995)

Selon les règles du *National Hardwood Lumber Association*, les stries et les taches n'affectent pas le classement du bois débité (NHLA 2003). Par conséquent, les taches médullaires ne sont pas considérées comme un défaut important du bois par l'industrie feuillue nord-américaine. Au contraire, les taches médullaires sont considérées en Finlande comme un défaut sévère qui affecte considérablement la qualité esthétique du bois. Des études ont d'ailleurs été entreprises pour mieux comprendre la biologie de l'agromyze du bouleau afin de contrôler sa population (Ylioja et al. 2000).

1.2.2 Notions de biologie du bois

1.2.2.1 Duraminisation

La duraminisation est le processus de formation du bois de cœur ou duramen. La conversion de l'aubier en duramen est provoquée par la mort des cellules de parenchyme. En s'approchant du duramen, le matériel de réserve contenu dans les cellules vivantes de parenchyme est progressivement dégradé et transformé en composés phénoliques ou extractibles. Lorsque les cellules de parenchyme meurent, les composés phénoliques accumulés dans le cytoplasme sont libérés. Ils imprègnent les parois et les lumens des cellules avoisinantes pour former le duramen. (Taylor et al. 2002).

On ne connaît pas précisément les mécanismes biomoléculaires qui causent le déclin et la mort des cellules de parenchyme. Cependant, une concentration élevée de dioxyde de carbone ou d'éthylène ou encore une dessiccation du bois en général seraient des initiateurs possibles du processus de formation de duramen (Taylor et al. 2002).

Le duramen forme un cône irrégulier mais continu au centre de l'arbre. Une fois sa formation initiée, le diamètre et la hauteur de ce cône continuent de croître pendant la vie de l'arbre. Cependant, il semblerait que le processus de duraminisation soit discontinu avec des périodes d'inactivité au cours de l'année (Taylor et al. 2002). Nobuchi et al. (1984) ont montré que la limite du duramen coloré, chez le *Robinia pseudoacacia*, change de juillet à septembre. Ensuite, le parenchyme, dans le duramen nouvellement formé, meure lentement dès le mois de septembre et pendant toute la période automnale. Quoiqu'il en soit, la proportion d'aubier dans un arbre est dépendante de la croissance du cambium vasculaire et de celle du duramen. Si la croissance cambiale est plus importante que la croissance du

duramen alors la proportion d'aubier dans un arbre devrait augmentée et inversement. Finalement, il est à noter que le processus de duraminisation se produit cellule après cellule, plutôt que cerne après cerne. Ainsi, le patron de duramen n'est pas spatialement uniforme à l'intérieur d'un arbre (Panshin et de Zeeuw 1980).

1.2.2.2 Propriétés et fonctions du bois

a) Propriétés du bois

Bois d'aubier

Le bois d'aubier, légèrement coloré, entoure le duramen lorsque celui-ci est présent (figure 1.13). Plusieurs auteurs définissent l'aubier comme la partie « vivante » du xylème (Panshin et de Zeeuw 1980). Or, du point de vue anatomique, celui-ci est constitué essentiellement de cellules mortes, à l'exception des cellules en différenciation dans la région cambiale et des cellules de parenchyme (Plomion et *al.* 2001).

Bois de duramen

Le bois de duramen est la partie centrale d'un arbre mature. Il est constitué exclusivement de cellules mortes, imprégnées de substances extractibles (Panshin et de Zeeuw 1980). Chez certaines espèces, le duramen se distingue de l'aubier par une couleur plus foncée, tendant généralement vers le brun et le rouge (figure 1.13). La coloration du duramen est due à la présence de substances extractibles colorées dans les parois et les lumens des cellules. Cependant, il est à noter, que la région colorée ne correspond pas exactement au duramen physiologique, c'est-à-dire à la région délimitée par la mort des cellules de parenchyme. Contrairement au bouleau à papier, le bois de duramen n'est pas coloré chez l'épinette, le sapin, la pruche et le peuplier (Panshin et de Zeeuw 1980; Taylor et *al.* 2002).

D'autres éléments caractérisent le duramen. Certains bois de duramen, comme celui du thuya, dégagent des odeurs caractéristiques dues à la présence de produits chimiques aromatisés. Finalement, la duraminisation est fréquemment accompagnée par la formation de thylls dans les vaisseaux des feuillus et par l'aspiration et l'incrustation des ponctuations chez les résineux (Panshin et de Zeeuw 1980).



Figure 1.13 Section transversale d'un bouleau à papier venant d'être abattu, Forêt Montmorency; Université Laval

La perméabilité du duramen est généralement très faible compte tenu de la présence de certains extractibles (gommes, cires ou huiles), de thylles ou d'incrustations. La diminution de la perméabilité affecte la durabilité du bois en réduisant les quantités d'air et d'humidité nécessaires au développement des champignons. Cependant, la durabilité du duramen est due principalement à la présence d'extractibles toxiques capables d'empêcher ou de ralentir la formation de carie (Panshin et de Zeeuw 1980). D'autre part, le duramen est également moins attrayant que l'aubier pour certains pathogènes, parce que les substances nutritives sont peu concentrées et difficilement accessibles (Taylor et *al.* 2002). Les érables, le hêtre ou encore les bouleaux ont des duramens peu ou pas résistants à la carie. Au contraire, les duramens des thuyas, des cyprès, des séquoias et de la plupart des chênes sont classés comme résistants voir très résistants (Panshin et de Zeeuw 1980).

Chez les résineux, le duramen est généralement plus sec que le bois d'aubier. Chez les feuillus, le gradient d'humidité varie selon les espèces. Toutefois, le duramen est plus humide que l'aubier dans le cas des caryers, des frênes, des ormes, des chênes, des noyers, des peupliers et des bouleaux. Chez le bouleau à papier, la teneur en humidité est de 89% pour le duramen et de 72% pour l'aubier (Panshin et de Zeeuw 1980).

Bois intermédiaire

Certains auteurs mentionnent également l'existence d'un bois intermédiaire. Celui-ci est défini comme une zone de transition entre l'aubier et le duramen. Cependant, selon Panshin et de Zeeuw (1980), cette zone n'est pas présente chez tous les bois et n'est pas spécialement visible, c'est à dire colorée, là où elle existe. La zone de transition est surtout caractérisée par une teneur en humidité plus faible que celle de l'aubier et dans certains cas plus faible que celle du duramen. C'est dans cette zone de transition que l'activité métabolique des cellules de parenchyme commence à diminuer (Panshin et de Zeeuw 1980; Taylor et *al.* 2002).

b) Substances extractibles

Définition

La plupart des substances extractibles sont des métabolites secondaires, c'est-à-dire des produits du métabolisme de la plante non-utilisés pour la croissance, contrairement aux métabolites primaires comme les protéines et les glucides. Il s'agit de composés de faible poids moléculaire ne faisant pas parties de la matière ligneuse à proprement parler. Ils peuvent imprégner les parois cellulaires ou constituer des dépôts à la surface des lumens (Stevanovic-Janesic 2004).

Les extractibles représentent une large gamme de composés organiques et les polyphénols (ex : tannins) et les oléorésines (ex : térébenthine) sont les plus importants. On retrouve également des gommes, des graisses, des acides gras, des cires et des hydrocarbures volatils. Les extractibles, selon leurs natures, déterminent les principales propriétés du duramen comme la couleur, l'odeur, la durabilité, la perméabilité et la masse volumique. Ces substances ont également tendance à réduire l'hygroscopicité du bois lorsqu'elles sont présentes en grandes quantités (Cloutier 2005b). D'autre part, les extractibles toxiques responsables de la durabilité du duramen n'interviennent pas nécessairement dans la coloration du bois. En fait, la durabilité n'est pas fonction de la coloration du duramen. Parmi les extractibles toxiques, on retrouve des huiles faiblement colorées, caractéristiques des thuyas, et des tannins fortement colorés, caractéristiques des séquoias (Panshin et de Zeeuw 1980).

Variation de la teneur en extractibles

Les substances extractibles ne représentent qu'une faible proportion de la masse anhydre du bois. Pour les espèces de la zone tempérée, la teneur en extractibles varie de 1 à 10% du poids anhydre du bois. Cependant, chez plusieurs espèces tropicales, cette proportion peut dépasser 30% du poids anhydre (Benabdallah 1996; Cloutier 2005b).

La teneur en substances extractibles varie selon les espèces, selon les individus et à l'intérieur même de l'arbre. À une hauteur donnée, plus on s'éloigne de la moelle et plus la teneur en extractibles augmente dans le duramen. La teneur est maximale au niveau de la transition duramen-aubier. Au contraire, plus la hauteur de l'arbre augmente et plus la teneur en extractibles diminue dans le duramen. Finalement, la proportion d'extractibles est relativement constante dans l'aubier (Taylor et *al.* 2002).

c) Fonctions du bois

Bois d'aubier

Le bois d'aubier est la partie physiologiquement active du xylème, parce qu'il permet le transport de la sève brute des racines vers la cime (Taylor et *al.* 2002). Selon la théorie du modèle tubulaire (*pipe model theory*), une certaine quantité d'aubier est nécessaire à l'approvisionnement du feuillage en eau (Shinozaki et *al.* 1964).

La quantité de feuillage d'un arbre est généralement exprimée en unité de surface (m^2) ou en unité de poids sec (g). La quantité d'aubier est exprimée en unité de surface (cm^2), au dhp ou à la base de la cime vivante, et, parfois, en unité de volume (m^3). Le ratio surface foliaire sur surface d'aubier, m^2 de feuilles par cm^2 d'aubier, est fréquemment utilisé dans la littérature pour caractériser la relation feuillage/aubier d'une espèce pour des conditions environnementales données (Gartner 2002; Margolis et *al.* 1988; Whitehead et *al.* 1984).

En supposant que le feuillage est relié linéairement à l'aubier, on ignore les variations en termes de perméabilité du bois et d'évapotranspiration des feuilles (Gartner 2002). Cependant, les ratios feuillage/aubier sont des moyennes indicatives qui permettent de valider le modèle tubulaire et d'effectuer des comparaisons intéressantes entre différentes espèces.

Finalement, le bois d'aubier est aussi un lieu de réserve en eau et en substances nutritives (Taylor et *al.* 2002). Les cellules vivantes de parenchyme jouent également un rôle actif dans les mécanismes de défense de l'arbre (Shigo et Marx 1977). Toutefois, il y a des coûts associés au maintien de l'aubier dans l'arbre. En effet, les cellules de parenchyme respirent et consomment des quantités considérables d'énergie de « maintenance » : entre 5 et 13% des photosynthétats produits annuellement chez certaines espèces (Ryan et *al.* 1995, cités dans Taylor et *al.* 2002). Ainsi, selon Taylor et *al.* (2002), la quantité d'aubier excédentaire, par rapport à la demande foliaire, serait convertie en duramen afin de réduire les dépenses énergétiques.

Bois de duramen

Le duramen est *a priori* la partie physiologiquement inactive du xylème. Ses cellules mortes sont imprégnées de substances extractibles et sa faible perméabilité ne permet pas le transport de la sève brute (Panshin et de Zeeuw 1980).

En réalité, le rôle physiologique du duramen est encore mal connu. La duraminisation servirait à réguler la proportion d'aubier dans un arbre, en termes de dépenses énergétiques et de transport de la sève brute, afin d'atteindre une quantité d'aubier optimale du point de vue physiologique. Toutefois, les coûts métaboliques reliés à la respiration du parenchyme sont relativement faibles dans les couches internes de l'aubier, tandis que les coûts reliés au processus de duraminisation peuvent être considérables pour les espèces qui accumulent des quantités importantes d'extractibles dans leur duramen. Une analyse des coûts et bénéfices reliés à la formation du duramen permettrait de mieux comprendre les proportions d'aubier et de duramen chez certaines espèces (Taylor et *al.* 2002).

En outre, selon Taylor et *al.* (2002), une quantité importante de substances nutritives serait recyclée à partir du duramen nouvellement formé, selon un mécanisme semblable à la résorption des nutriments des feuilles sénescentes. Ainsi, la formation du duramen permettrait de réacheminer des substances nutritives vers l'aubier.

Finalement, le duramen sert également au support mécanique de l'arbre, mais dans des proportions plus faibles que l'aubier. De manière générale, le duramen ne diffère pas

structurellement de l'aubier. On ne distingue aucune différence majeure en ce qui à trait aux propriétés mécaniques du bois. Cependant, selon Taylor et *al.* (2002), les stress de tension et de compression sont plus élevés pour les cernes les plus externes, si l'on considère un arbre comme une structure cylindrique en porte-à-faux.

d) Facteurs influençant les proportions de bois d'aubier et de duramen

La proportion de duramen dans un arbre varie selon les espèces et selon les individus. Les différences, en termes de génétique et de comportement écologique, expliquent principalement les variations interspécifiques de duramen (Taylor et *al.* 2002).

Taylor et *al.* (2002) décrivent les principaux facteurs qui peuvent influencer les variations intraspécifiques de duramen (tableau 1.9). L'âge de l'arbre et le taux de croissance sont les facteurs les plus importants. De manière générale, plus l'arbre est âgé plus la proportion de duramen est élevée. De même, plus le taux de croissance est important et plus la proportion de duramen est élevée. D'autre part, il semblerait que les facteurs (vigueur, qualité de station et traitements sylvicoles), qui ont tendance à augmenter le taux de croissance, favorisent également la formation de duramen. Mais les résultats obtenus dans la littérature sont parfois contradictoires.

Tableau 1.9 Facteurs influençant la proportion de duramen (d'après Taylor et *al.* 2002)

Facteur	Effet ¹	Références ³	
Caractéristiques de l'arbre	âge	+	1
	taux de croissance	+ parfois -	2
	vigueur et dominance	+ ou -	3
Conditions de croissance	qualité de station	+	4
	climat sec	+	5
	gèle, maladie et pollution	nul ²	6
Traitements sylvicoles	élagage	+	7
	éclaircie, fertilisation	+	8

¹ «+» : effet positif ou «-» : effet négatif sur la proportion de duramen dans un arbre

² aucun effet sur le processus naturel de duraminisation, cependant formation irrégulière de duramen

³ Références citées par Taylor et *al.* (2002) :

- 1) Sellin 1991, 1994, 1996; Hazenberg et Yang 1991a, b; Yang et Hazenberg 1991
- 2) Climent et *al.* 1993; Wilkes 1991 ; Yang et Hazenberg 1992; Hillis 1987; Nair 1999
- 3) Kaufmann et Watkins 1990; De Kort 1993; Sellin 1991, 1994
- 4) Hillis 1987
- 5) Climent et *al.* 2002
- 6) Hillis 1987; Shigo 1984; Shigo et Hillis 1973
- 7) Margolis et *al.* 1988 ; Bergstrom 2000, Langstrom et Hellqvist 1991
- 8) Morling et Valinger 1999 ; Wilkins 1991 ; Yang et Hazenberg 1992

1.2.3 Propriétés techniques du bois

1.2.3.1 Propriétés mécaniques et physiques du bois

De part ses propriétés mécaniques et physiques, le bouleau à papier est un bois de qualité intermédiaire comparé aux autres espèces feuillues de l'Est du Canada (tableau 1.10).

La masse volumique, ou densité basale du bois, est le rapport de la masse anhydre au volume de l'échantillon à l'état de saturation (Goulet et *al.* 2003). Le bouleau à papier possède une masse volumique basale moyenne (506 kg/m³), comparable à celle du cerisier tardif ou de l'érable rouge. Sa masse volumique est légèrement inférieure à celle du bouleau jaune et de l'érable à sucre, de respectivement 10% et 18% (tableau 1.10).

Tableau 1.10 Propriétés mécaniques et physiques de quelques espèces feuillues de l'Est du Canada (d'après Jessome 1977)

Espèce	Densité basale (kg/m ³)	Retrait en direction radiale (β_R) (%)	Retrait en direction tangentielle (β_T) (%)	Anisotropie du bois (β_T / β_R)	Module d'élasticité en flexion parallèle à 12% H (MPa)	Module d'élasticité en compression parallèle à 12% H (MPa)	Dureté à 12% H (N)
Bouleau à papier	506	5,2	7,2	1,4	12900	13400	4320
Bouleau jaune	559	5,8	7,1	1,2	14100	15200	5930
Cerisier tardif	510	4,0	7,1	1,8	11900	12300	4630
Chêne blanc	654	4,7	6,0	1,3	15500	15800	7130
Chêne rouge	581	3,6	6,7	1,9	11900	13700	6170
Érable à sucre	597	4,6	8,8	1,9	14100	15400	7290
Érable rouge	516	3,6	6,0	1,7	11100	13300	4390
Frêne blanc	570	4,2	7,0	1,7	12800	13500	7050
Hêtre à grandes feuilles	590	5,2	10,1	1,9	14000	14600	6490
Peuplier faux-tremble	374	3,6	6,6	1,8	11200	12700	2140
Tilleul d'Amérique	360	6,7	9,3	1,4	9450	13500	2140
Moyenne	529	4,7	7,4	1,6	12632	13945	5244

Le retrait et le gonflement du bois sont les propriétés influençant le plus la stabilité d'un assemblage. La stabilité dimensionnelle d'un bois peut être estimée à partir du rapport du retrait en direction tangentielle sur le retrait en direction radiale (β_T/β_R). Plus ce rapport se rapproche de l'unité, moins le bois a tendance à se déformer suite à des changements de la teneur en humidité (Cloutier 2005b). Encore une fois, on constate que le bouleau à papier occupe une situation intermédiaire en termes de retrait et de gonflement (1,4). Le bouleau à papier est sensiblement aussi stable que le bouleau jaune en général (tableau 1.10).

Les principales propriétés mécaniques du bouleau à papier (modules d'élasticité et de dureté du bois) sont moyennes comparées aux autres espèces feuillues de l'Est du Canada (tableau 1.10). Par conséquent, l'utilisation du bouleau à papier convient dans des conditions impliquant des contraintes moyennes (Brière 1992).

Sa dureté est comparable à celle du cerisier tardif et de l'érable rouge et elle est inférieure de 27% et de 69% à celles du bouleau jaune et de l'érable à sucre. Malgré tout, il semblerait que le bouleau à papier montre une bonne résistance aux chocs, ce qui peut être un avantage pour la fabrication de palettes de manutention (Brière 1992, Hyvarinen 1968).

La perméabilité est la propriété d'un matériau poreux de laisser passer des substances à l'état liquide ou gazeux dans des conditions particulières (OQLF 2005). Cette propriété détermine le comportement du bois lors de l'imprégnation et du séchage. Le bouleau à papier est classé comme assez facile à sécher et comme modérément perméable. Il ne semble pas montrer de problèmes particuliers lors de ces deux applications (Brière 1992, Hyvarinen 1968).

Le pouvoir calorifique d'un matériau est l'énergie dégagée sous forme de chaleur par combustion complète de son unité de masse (Goulet et *al.* 2003). Parmi les espèces feuillues, le bouleau a un excellent rendement énergétique par unité de masse, avec environ 21 MJ/kg à l'état anhydre (Goulet et *al.* 2003). Les résidus du bouleau à papier sont d'ailleurs utilisés pour la cogénération.

Toutefois, il est à noter que la présence de duramen modifie négativement les propriétés mécaniques et physiques du bois. Les propriétés décrites précédemment font références au bois d'aubier.

1.2.3.2 Longueur moyenne des fibres et des vaisseaux

La longueur moyenne des cellules est supposée influencer la résistance d'un bois. Nous savons que des cellules plus longues donnent un papier plus résistant en traction parallèle au plan. Cette caractéristique est donc un élément de qualité important pour le domaine des pâtes et papiers (Cloutier 2005b). Le bouleau à papier est donc une espèce très intéressante pour la mise en pâte compte tenu de la longueur moyenne de ses fibres et de ses vaisseaux (tableau 1.11).

Tableau 1.11 Longueur moyenne des fibres et des vaisseaux de quelques espèces feuillues de l'Est du Canada (d'après Panshin et de Zeeuw 1980)

Espèce	Longueur moyenne (mm)	
	fibres	Vaisseaux
Bouleau à papier	1,35	1,00
Bouleau jaune	1,38	0,84
Chêne blanc	1,39	0,40
Chêne rouge	1,32	0,42
Érable à sucre	0,92	0,41
Érable rouge	0,92	0,42
Frêne noir	1,27	0,27
Hêtre à grandes feuilles	1,28	0,61
Orme d'Amérique	1,55	0,22
Peuplier faux-tremble	1,32	0,67
Moyenne	1,27	0,53

1.2.3.3 Propriétés de façonnage

Finalement, on peut constater que les propriétés de façonnage du bouleau à papier sont bonnes à très bonnes, particulièrement en ce qui a trait à l'usinabilité et à l'application de teinture (tableau 1.12). Ces propriétés sont comparables à des espèces feuillues nobles comme le bouleau jaune ou encore l'érable à sucre.

Tableau 1.12 Propriétés de façonnage de quelques espèces feuillues de l'Est du Canada (d'après Q-WEB 2005)

Espèce feuillue	Usinabilité	Stabilité	Collage	Sablage	Rétention des vis et des clous	Tenue de la peinture	Teinture
Bouleau à papier	Très bon	Bon	Bon	Bon	Bon	Bon	Très bon
Bouleau jaune	Excellent	Bon	Bon	Bon	Bon	Bon	Très bon
Cerisier tardif	Excellent	Bon	Très bon	Excellent	Passable	Bon	Très bon
Chêne blanc	Bon	Excellent	Bon	Bon	Passable	Bon	Bon
Chêne rouge	Excellent	Très bon	Bon	Bon	Excellent	Bon	Bon
Érable à sucre	Excellent	Bon	Bon	Très bon	Bon	Bon	Bon
Érable rouge	Très bon	Bon	Bon	Bon	Passable	Bon	Très bon
Frêne blanc	Très bon	Très bon	Bon	Passable	Bon	Excellent	Bon
Hêtre à grandes feuilles	Bon	Bon	Très bon	Très bon	Passable	Bon	Bon
Peuplier faux-tremble	Bon	Passable	Bon	Passable	Passable	Bon	Bon
Tilleul d'Amérique	Très bon	Bon	Très bon	Bon	Passable	Excellent	Bon

1.3 Utilisation de la ressource

1.3.1 Contexte de l'industrie de la transformation des bois feuillus

1.3.1.1 Diminution de la qualité de la récolte

On assiste depuis plusieurs années à une diminution manifeste de la qualité des tiges feuillues récoltées en forêt. Selon les données de l'Association déroulage et sciage de feuillus du Québec (ADSFQ), de 1998 à 2003, le volume de feuillus durs de qualité pâte a augmenté de 55%, tandis que le volume de feuillus durs de qualité sciage supérieur a diminué de 44% (tableau 1.13). En conclusion, on constate que la proportion des billes de qualité A et B est en baisse, contrairement à celle des billes de qualité C et D (CÉGFPQ 2004).

Tableau 1.13 Répartition du volume de feuillus durs récolté par classe de qualité de tiges de 1998 à 2003 (d'après CÉGFPQ 2004)

Qualité des billes	Volume récolté (m ³) ¹					
	1998	1999	2000	2001	2002	2003
A (déroulage)	18 570	19 561	16 424	14 355	14 846	12 745
B (sciage +)	725 571	679 277	559 601	503 560	475 718	402 765
C (sciage)	426 200	400 755	471 720	443 560	421 161	418 159
D (trituration)	488 955	557 986	605 736	582 304	719 854	756 369
Total	1 659 296	1 657 579	1 653 481	1 543 779	1 631 579	1 590 038

¹ Volume de feuillus durs récolté par les membres de l'Association déroulage et sciage de feuillus du Québec

Au cours des années 1960, 1970 et 1980, la coupe à diamètre limite a été pratiquée dans la plupart des forêts feuillues du Québec. Cette coupe forestière consiste à récolter tous les arbres marchands dont le diamètre dépasse une certaine limite. Cette pratique s'est traduite rapidement par un écrémage des peuplements feuillus en laissant sur pied les tiges de plus mauvaise qualité, d'où le déficit actuel en feuillus durs de qualité (Legault et *al.* 2004).

À partir des années 1990, dans une perspective de rendement soutenu, le Ministère a décidé de généraliser la pratique du jardinage afin de réhabiliter la forêt feuillue (Legault et *al.* 2004). La coupe de jardinage vise à récolter périodiquement des arbres choisis individuellement, ou par petits groupes, dans un peuplement inéquienne, pour : (1) récolter la production, (2) amener ou maintenir une structure jardinée équilibrée et (3) assurer les soins culturaux nécessaires à la croissance des arbres résiduels et à l'installation de semis (OQLF 2005).

Lorsqu'elle est bien appliquée, la coupe de jardinage permet de reconstituer à moyen terme des peuplements feuillus écrémés dans le passé. Cependant, certains travaux de jardinage ne respectent pas les normes d'intervention et plusieurs industriels forestiers préfèrent récolter les tiges de meilleure qualité plutôt que de recevoir les crédits sylvicoles reliés à la pratique du jardinage, laissant ainsi la forêt se dégrader (MRNFQ 2002b).

1.3.1.2 Situation préoccupante pour l'industrie

L'industrie de la transformation des bois feuillus est particulièrement touchée par la diminution de la qualité de la récolte. Plusieurs usines connaissent une rupture de stock en bois de qualité en provenance des forêts publiques du Québec. Ces entreprises de sciage et de déroulage doivent s'approvisionner dans les forêts privées et importer de plus en plus de bois des États-Unis (CÉGFPQ 2004).

En 2002, le déficit en feuillus durs de qualité sciage était estimé à 192 millions de pmp, soit un million de m³ de bois rond, ou encore 30% de la consommation des secteurs de la deuxième et troisième transformation. Pour pallier à ce déficit, les importations de bois scié sont en forte hausse depuis quelques années. En 2003, les billes importées représentaient 37,6% de l'approvisionnement des scieries québécoises. Depuis 1990, le volume de billes de sciage provenant de l'extérieur du Québec a augmenté de plus de 322%. Cette dépendance vis-à-vis des importations a un impact majeur sur les coûts de production et donc sur la compétitivité à l'échelle internationale pour les industries de deuxième et de troisième transformation de la province (AFMQ 2004).

1.3.1.3 Évolution technologique de l'industrie

a) Rendement en matière et valeur ajoutée au bois

De façon générale, les scieries de bois feuillus sont moins automatisées et optimisées que les scieries de bois résineux. Cependant, les méthodes de production ont évolué depuis les années 1980 et l'industrie vise une augmentation de la productivité par l'apport de nouvelles technologies de pointe adaptées aux besoins particuliers des sciages feuillus. L'intégration de scanneurs et d'optimiseurs, par exemple, devrait permettre d'augmenter le rendement en matière (MRNFQ 2002c, Industrie Canada 2000).

L'industrie de la deuxième et troisième transformation, par le biais de la recherche et développement, tente de valoriser les sciages de feuillus durs en développant de nouveaux produits, de nouvelles techniques et procédés de transformation (MRNFQ 2002c). Il existe un réel potentiel pour les produits à valeur ajoutée notamment dans le développement de marchés niches. L'entreprise finlandaise Korhonen Oy, par exemple, fabrique les meubles de luxe Artek avec du bois de bouleau blanc finlandais. Le coût de fabrication d'une chaise

Artek est de 80 dollars américains alors que le prix de vente est de 8 000 dollars (Blanchet 2004b).

b) Sciage et déroulage non-conventionnels

La demande pour des billes de qualité sciage et déroulage a été très forte au cours des dernières décennies. La qualité de la ressource disponible a considérablement diminué tandis que les importations en provenance des États-Unis ne cessent d'augmenter. L'industrie de la seconde transformation se tourne donc vers des sciages de dimensions ou de classifications autres que celles établies par la NHLA (Giguère 1998).

Une partie importante du volume de feuillus durs de qualité trituration pourrait être utilisée comme bois de sciage non-conventionnel. Le sciage non-conventionnel permet une utilisation plus efficace de la ressource disponible et une diversification des produits, dont la fabrication de petites pièces en bois (Industrie Canada 2000). Selon Industrie Canada (2000), le recours aux billons permettrait de récupérer près de 50% d'une tige contre 35% actuellement avec du sciage conventionnel. Les spécifications requises pour le déroulage et le sciage non-conventionnels varient selon les industries (tableau 1.14).

En 2000, on dénombrait 45 fabricants québécois de bois de sciage non-conventionnel de feuillus durs, dont 34 scieries spécialisées dans la transformation des billons de bouleau à papier (MRNFQ 2000).

Tableau 1.14 Spécifications requises par produit (d'après Anonyme 2004)

Produit	Classe	Qualité	Dimension minimale requise	
			diamètre	longueur
Déroulage	Conventionnel	Moins de 10% du volume en défauts	>28cm	>2,60 m
	Non-conventionnel			>1,30 m
Sciage	Conventionnel	Moins de 50% du volume en défauts	>20cm	>2,54 m
	Non-conventionnel			>1,30 m
Trituration	s.o.	s.o.	>9cm	s.o.

c) Espèces de remplacement

L'érable à sucre, le bouleau jaune et le chêne sont les espèces utilisées traditionnellement pour le sciage et le déroulage. Cependant, les grumes de qualité sciage et déroulage sont de plus en plus rares et de plus en plus chères. Avec l'avènement des techniques de sciage et de déroulage non-conventionnelles, l'industrie s'intéresse désormais aux espèces dites de remplacement (Industrie Canada 2000; MRNFQ 2003b).

À l'échelle du Canada, le bouleau à papier est certainement l'espèce de remplacement la plus prometteuse, compte tenu de la disponibilité de la ressource et de la qualité esthétique de son bois. Localement, d'autres espèces intéressent de plus en plus l'industrie. C'est le cas de l'aulne rouge en Colombie-Britannique, du peuplier faux-tremble en Alberta et de l'érable rouge en Ontario, au Québec et dans les provinces Atlantiques (Industrie Canada 2000)

Au Québec, le bouleau à papier est de plus en plus utilisé pour le sciage contrairement à l'érable à sucre et au bouleau jaune. En 2001, son taux d'utilisation était comparable à celle du bouleau jaune et du chêne (tableau 1.15) (MRNFQ 2003b).

Tableau 1.15 Importance relative des espèces de sciages de feuillus durs produits au Québec (d'après MRNFQ 2003b)

Feuillus durs	Importance relative (%)					
	1996	1997	1998	1999	2000	2001
Érable à sucre	40,3	44,0	40,7	39,0	39,9	36,3
Bouleau jaune	22,8	21,1	20,9	18,3	18,1	18,1
Chêne	13,1	12,0	14,1	14,9	15,5	16,4
Bouleau à papier	12,9	11,8	12,6	17,1	13,3	17,6
Frêne	2,9	2,8	3,0	2,5	3,1	2,5
Hêtre	2,5	3,1	3,3	2,9	3,1	3,3
Tilleul	2,4	2,1	2,0	2,1	2,3	2,1
Autres espèces	3,1	3,1	3,3	3,2	4,7	3,7

1.3.2 Classement et prix du bois

1.3.2.1 Classement et prix des grumes

De façon générale, on classe une grume selon l'utilisation qui peut en être faite : tranchage, déroulage, sciage, palette ou encore pâte. Les grumes de feuillus provenant des forêts publiques sont classées selon les normes du Ministère (voir chapitre 1.1.3.2, *Ressource bouleau à papier au Québec*) (MRNFQ 2002a). Au contraire, les grumes provenant des forêts privées sont classées selon des grades définis par l'acheteur.

Les principaux critères de classement sont la longueur, le diamètre et la qualité du bois, considéré selon le nombre de faces claires de défauts (figure 1.14). Pour des dimensions équivalentes, plus le nombre de faces claires est important et plus le grade et le prix de la grume sont élevés.

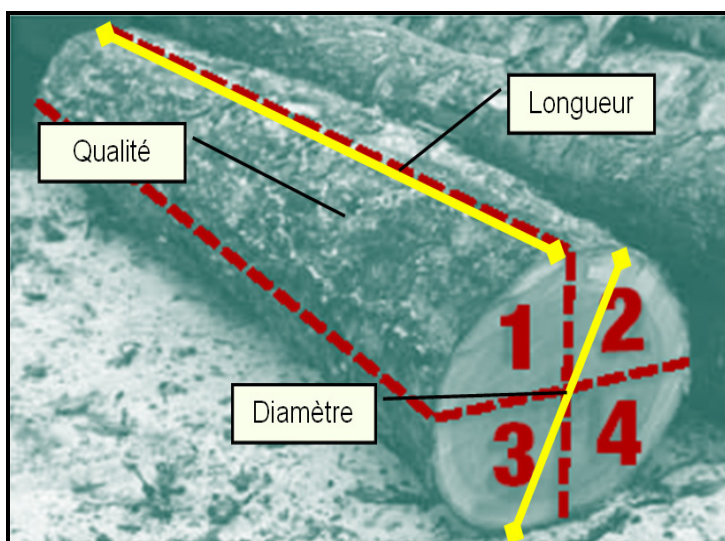


Figure 1.14 Critères principaux pour le classement d'une grume de feuillus (d'après anonyme 2005)

Le Groupe Transforêt Inc. a défini des normes très précises pour le classement des grumes de bouleau (annexe 3). Les spécifications recherchées sont décrites brièvement dans ce qui suit : « Une bille de qualité tranchage a un diamètre minimum de 12 pouces au fin bout ; elle n'a pas de défaut de bout ou de surface ; elle n'a pas de courbure et le fil du bois est droit. Le cœur, ou la partie colorée à la découpe, ne doit pas excéder plus du tiers du diamètre de la bille. Une bille de qualité déroulage peut avoir un diamètre de 10 pouces et plus au fin bout ; elle doit avoir au moins 3 faces claires, ou exemptes de défauts, ou encore 2 faces claires lorsque le diamètre est supérieur à 14 pouces ; une courbure de 1 pouce est tolérée pour les billes de 11 pouces et plus ; le fil du bois peut être légèrement incliné. Le cœur ne doit pas excéder plus de la demie du diamètre de la bille. Une bille de qualité sciage doit avoir un diamètre minimum de 8 pouces au fin bout ; elle doit avoir au moins 1 face claire si le diamètre est de 10 pouces et plus ; la courbure peut atteindre jusqu'à 2 pouces pour les billes de 14 pouces et plus ; les restrictions sur le fil du bois sont moins sévères que pour les qualités précédentes » (Anonyme 2005). L'acheteur établit ensuite une liste de prix (\$/Mpmp) selon le grade et la qualité des grumes (tableau 1.16).

Tableau 1.16 Classement et prix des grumes de bouleau (d'après Anonyme 2005)

Grade	Qualité	Prix (\$/Mpmp) ¹
AA	Tranchage	2300 à 3000
AD		
D1	Déroulage	900 à 2100
D2		
D3		
SS		
S1	Sciage	300 à 750
S2		
SP	Palette	150 à 250
Pâte	Trituration	120 à 150

¹ Prix bord de route, l'acheteur prend en charge le chargement et le transport des billes jusqu'à l'usine

1.3.2.2 Classement et prix des sciages à usage industriel

Le classement du sciage conventionnel des bois feuillus se fait selon les normes du NHLA. Ainsi, les sciages de bouleau sont classés selon trois catégories principales : *bouleau* (*Birch*), *merisier rouge* (*Red Birch*) et *bouleau aubier* (*SAP*). Selon la NHLA, on ne fait pas de tri en fonction de la couleur dans le bouleau à moins d'indications contraires et les commandes doivent spécifier clairement l'espèce désirée. En ce qui concerne le *merisier rouge*, chaque débit doit avoir une face claire de bois de cœur rouge. Pour le *bouleau aubier*, les débits sont sélectionnés en fonction de la couleur. Ils doivent être constitués exclusivement de bois d'aubier (NHLA 2003).

Les sciages de *merisier rouge* se vendent à meilleur prix que ceux de *bouleau*. Le duramen du bouleau jaune est très apprécié pour sa couleur rosâtre. Au contraire, celui du bouleau à papier décline généralement les sciages en raison de sa coloration brun-rougeâtre, très prononcée.

Les grades de sciage sont définis selon la proportion de bois clair pour chaque pièce (figure 1.15). Le classement des sciages de catégorie *bouleau* comprend les grades FAS, FAS 1 face, Choix, n° 1 commun, n° 2 A commun, n° 3 A commun, n° 2 B commun et n° 3 B commun. Le classement des sciages de catégories *merisier rouge* et *bouleau aubier* se limitent aux grades FAS 1 face, Choix, n° 1 commun, n° 2 A commun (NHLA 2003).

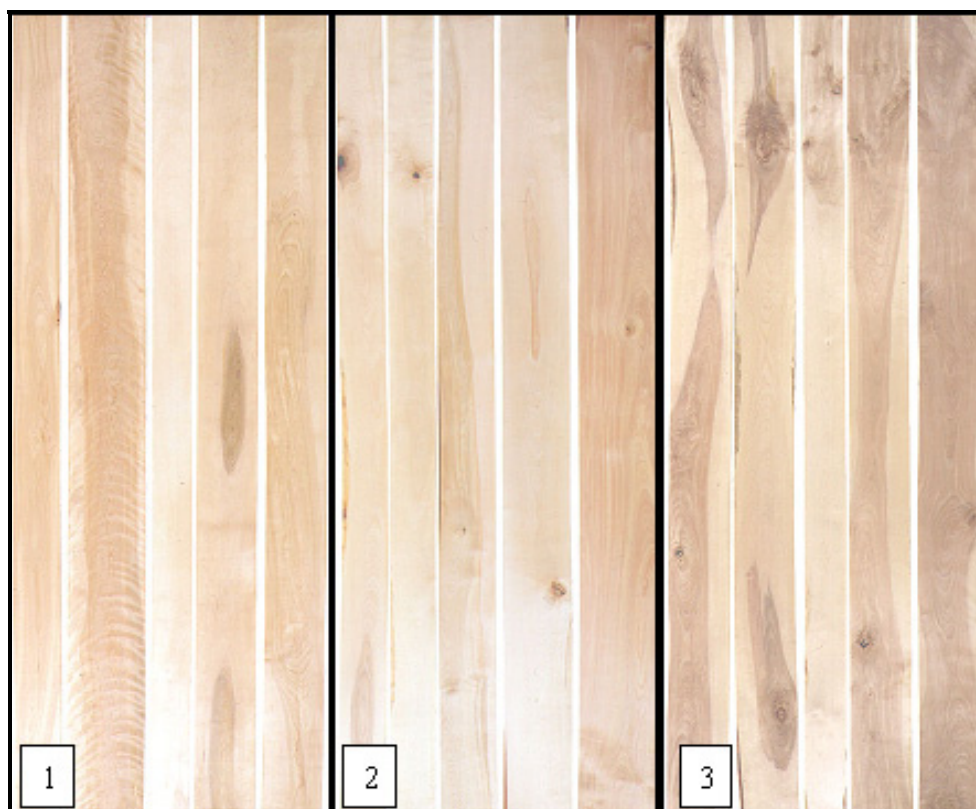


Figure 1.15 Sciages de 8 pieds (2,4 m) de *bouleau* : (1) FAS-Choix, (2) n° 1 commun et (3) n° 2 commun (d'après QWEB 2005)

La valeur d'un sciage dépend donc de son grade (tableau 1.17). En dehors de la catégorie *merisier rouge*, qui ne concerne que le bouleau jaune, on ne fait aucune distinction de prix entre les deux espèces de bouleau.

Tableau 1.17 Prix moyens des sciages *bouleau* (*Birch*) et *bouleau aubier* (*SAP*) pour les régions *North Central* et *Northeastern* des États-unis, mars 2005 (Hardwood Review 2005)

Dimension	Qualité du sciage					
	<i>Choix et meilleur</i>		<i>n.1 commun</i>		<i>n.2 commun</i>	
	<i>Sap</i>	<i>Birch</i>	<i>Sap</i>	<i>Birch</i>	<i>Sap</i>	<i>Birch</i>
4/4 (sec)	2025 ¹	1860	1340	1185	895	800
4/4 (vert)	1455	1285	975	825	-	550
5/4 (sec)	2155	2005	1510	1395	985	915
5/4 (vert)	1455	1315	988	870	-	575

¹ Prix par 1000 pmp, bois brut, FAB usine, en \$US

1.3.3 Applications industrielles du bouleau à papier

1.3.3.1 Industrie de fabrication des placages

Les placages sont fabriqués selon deux modes de transformation des grumes : le déroulage et le tranchage. Les placages déroulés ou tranchés sont utilisés dans la fabrication de meubles, de panneaux composites et de contre-plaqués.

Au Québec, moins de 1% du volume récolté de bouleau à papier est de qualité tranchage ou déroulage (tableau 1.5). De ce fait, l'emploi du bouleau à papier pour la production de placages est très limité et les avis divergent concernant son utilisation. Quoiqu'il en soit, en termes de production et de marché, le bouleau à papier est assimilé au bouleau flexible et au bouleau jaune (Brière 1992; Wiedenbeck et *al.* 2004).

La présence de taches médullaires et de petits nœuds à proximité de la moelle sont considérés comme des défauts qui diminuent la qualité des placages (IWPA 2000). Néanmoins, aux États-Unis, une entreprise a commercialisé avec succès un placage maison où la tache médullaire est considérée comme une marque de caractère (Wiedenbeck et *al.* 2004).

La couleur du duramen et l'uniformité de celle-ci sont des paramètres importants dans la fabrication et la vente des placages. Chez le bouleau à papier, le duramen est considéré comme un défaut mais dans une moindre mesure que chez le frêne ou l'érable à sucre (Wiedenbeck et *al.* 2004). Pour qu'une grume soit de qualité tranchage, son duramen doit faire moins du tiers de la découpe. De plus, il doit être centré et de forme régulière. Récemment, un grade de déroulage s'est développé pour le cœur coloré du bouleau (« *natural color* » *birch veneer*). Pour ce grade de déroulage, les usines s'approvisionnent avec des grumes ayant 50% de duramen à la découpe (Wiedenbeck et *al.* 2004).

On utilise également des billons de bouleau à papier pour du déroulage spécialisé, de plus faible qualité que le déroulage conventionnel (Duchesne et Rancourt 2005 ; Wiedenbeck et *al.* 2004). Le déroulage spécialisé permet la fabrication de petits articles courants comme des bâtonnets, des abaisse-langue, des palettes à peinture, etc... Le bouleau à papier est alors apprécié pour la couleur neutre et la teinte uniforme de son bois (Brière 1992).

Dans une moindre mesure, les placages de bouleau à papier sont utilisés dans la fabrication de produits d'ingénierie comme les placages laminés (LVL, *Laminated Veneer Lumber*) (Ozarska 1999). Le bois en placages stratifiés est un produit d'ingénierie constitué essentiellement de placages de bois et de colle. Il est généralement employé dans les charpentes résidentielles et commerciales (CCB 2005).

1.3.3.2 Industrie du sciage

On distingue ici le sciage classique du débitage de composantes pour l'industrie des palettes de manutention. Le sciage classique fournit le bois nécessaire à la transformation secondaire, afin de satisfaire les besoins en ameublement, en revêtement de sol et en tournage (figure 1.16). La proportion de bouleau à papier utilisée pour la fabrication de sciages est en nette augmentation depuis quelques années, bien que la qualité de l'approvisionnement soit très faible (tableaux 1.5 et 1.15). Le faible volume de qualité sciage oblige les industriels à s'approvisionner sur de grands territoires et plusieurs aires communes, ce qui augmente considérablement les coûts de transport.



Figure 1.16 Grumes de bouleau à papier en cours d'usinage, scierie Thomas-Louis Tremblay, Québec

La couleur du duramen est également un paramètre important dans la fabrication et la vente des sciages selon les normes du NHLA. Comme nous l'avons déjà mentionné, le duramen du bouleau à papier décline généralement les sciages en raison de sa coloration brun-rougeâtre, très prononcée. Il n'existe pas de grade spécifique pour les sciages de duramen contrairement au bouleau jaune (*merisier rouge*).

La fabrication de palettes de manutention transforme une matière de faible qualité en un produit de faible valeur. La transformation est axée sur la productivité en volume plutôt que sur le rendement en qualité. Les palettes doivent être résistantes et flexibles. L'apparence et la couleur du bois sont sans intérêt. La production de composantes de palettes permet de récupérer des sciages de qualités inférieures et de dimensions réduites (Brière 1992; Duchesne et Rancourt 2005).

Dans l'industrie des palettes, les espèces feuillues sont regroupées selon la densité de leur bois. Les bois à faible densité, tel que le peuplier ou le tilleul, appartiennent à la catégorie A. Le bouleau à papier, et tous les autres bois à densité moyenne, appartiennent à la catégorie B. Finalement, les bois à densité élevée appartiennent à la catégorie C (Duchesne et Rancourt 2005).

1.3.3.3 Industrie des pâtes et papiers

Le bouleau à papier est un bois moyennement dense (506 kg/m³) avec une proportion élevée de fibres relativement longues (tableaux 1.6, 1.10 et 1.11). Ce bois présente des propriétés recherchées pour la mise en pâte. Duchesne et Rancourt (2005) résument les principaux processus de mise en pâte du bouleau à papier.

L'industrie des pâtes et papier est un débouché important pour les copeaux et pour une partie importante du bois récolté. En effet, environ 80% du volume récolté de bouleau à papier est de qualité trituration au Québec (tableau 1.5).

Les branches contiennent moins de fibres et davantage de vaisseaux que le tronc. Les fibres et les vaisseaux des branches sont 30 à 50% plus courtes, et plus petites, en diamètre que ceux du tronc. Par conséquent, la pâte fabriquée à partir des branches est plus faible en

terme de résistance mécanique que celle provenant du tronc mais demeure convenable pour la mise en pâte (Safford et *al.* 1990).

Finalement, la quantité d'extractibles colorés peut nuire à la mise en pâte. Plusieurs phases de blanchiment sont alors nécessaires pour atteindre la blancheur finale souhaitée (Panshin et De Zeeuw 1980).

1.3.3.4 Industrie de l'ameublement

Le bois de bouleau à papier est reconnu comme un excellent bois d'apparence pour sa couleur neutre et l'uniformité de sa teinte (figure 1.9). Une enquête a été effectuée récemment sur l'évaluation de l'acceptation des marques de caractère du bouleau blanc dans la chaîne de distribution des produits d'apparence (Lapointe 2004). Les résultats de cette étude indiquent que des panneaux avec une teinte foncée et un niveau faible en marques de caractères sont généralement plus appréciés par les consommateurs et les professionnels. D'autre part, les propriétés de façonnage du bouleau à papier sont très bonnes, notamment pour l'application de teintures et de vernis (tableau 1.12). Le bouleau à papier est donc considéré comme un bois d'apparence de qualité comparable à celle du bouleau jaune et de l'érable à sucre.

L'industrie de l'ameublement utilise une quantité non négligeable de bouleau à papier pour sa production normale. Le bouleau à papier est mélangé au bouleau jaune dans des proportions variables. On assimile généralement ces deux espèces dans la fabrication de meubles et les prix offerts, tant pour la matière première que pour le produit final, sont identiques (Brière 1992).

Il semble que le principal inconvénient relié à l'utilisation du bouleau à papier soit la difficulté de s'approvisionner de façon constante en bois de qualité. D'ailleurs, certains manufacturiers de meubles importent des États-Unis du bouleau à papier de qualité supérieure pour satisfaire leurs besoins (AFMQ 2004).

1.3.3.5 Industrie des planchers et parquets de bois durs

De façon générale, le bouleau à papier semble peu utilisé par l'industrie des planchers et parquets de bois durs (Brière 1992). La dureté de son bois est de loin inférieure à celle du

bouleau jaune et de l'érable à sucre (tableau 1.9). Cette dureté moyenne limite l'utilisation du bouleau à papier pour la fabrication de planchers et de parquets traditionnels (Brière 1992; Duchesne et Rancourt 2005).

Cependant, l'arrivée de nouveaux produits d'ingénierie et de vernis plus résistants tendent à favoriser l'utilisation du bouleau à papier. Les lames de plancher d'ingénierie, par exemple, sont composées d'une planchette de surface de grande qualité, d'un substrat et occasionnellement d'une couche de contrebalancement. Pour le substrat, il est possible d'employer du bois de plus faible qualité comme le bouleau à papier (Blanchet 2004a). D'autre part, certains manufacturiers appliquent désormais des finis de polyuréthane sur les planchers de bois feuillu. Ces finis, composés de particules d'oxyde d'aluminium, améliorent considérablement la résistance mécanique du plancher.

1.3.3.6 Autres applications industrielles

Le bouleau à papier peut être utilisé pour fabriquer n'importe quel produit composite. Quoiqu'il en soit, compte tenu de sa densité, il est plus difficile de produire des fibres, des copeaux ou des particules avec cette espèce, comparé à d'autres espèces feuillues comme le peuplier. Le bouleau à papier est donc un matériau peu utilisé pour la fabrication de produits composites dans l'Est du Canada (Duchesne et Rancourt 2005).

Le tournage industriel fournit à l'industrie du meuble et à la menuiserie de nombreuses pièces tournées telles que des manches, des barreaux de lit et de chaise, des poteaux d'escalier, etc. Il s'agit d'un excellent bois de tournerie compte tenu de sa teinte uniforme et de ses bonnes propriétés de façonnage (Brière 1992). Cependant, de nos jours, il s'agit d'une industrie moins importante et le volume de bouleau à papier utilisé pour le tournage industriel est désormais marginal (Duchesne et Rancourt 2005).

1.4 Objectifs de recherche

L'objectif général de cette étude consiste à caractériser les proportions de bois d'aubier et de duramen chez le bouleau à papier, en relation avec les caractéristiques du feuillage, de la cime et de l'arbre. De façon plus spécifique, nous voulons :

1. Étudier les relations entre la proportion d'aubier et le feuillage ;
2. Développer un modèle permettant de prédire la présence ou l'absence de duramen à partir des caractéristiques biométriques de l'arbre et de son houppier ;
3. Développer des modèles permettant de prédire les proportions d'aubier et de duramen à partir des caractéristiques biométriques de l'arbre et de son houppier ;
4. Discuter du profil interne des tiges et plus particulièrement de la distribution verticale du duramen.

CHAPITRE 2 MATÉRIEL ET MÉTHODES

2.1 Description du territoire

2.1.1 Forêt Montmorency

La forêt Montmorency est la forêt d'enseignement et de recherche de l'université Laval depuis 1963. Cette forêt est située à environ 75 km au nord de la ville de Québec, dans les hautes-terres laurentiennes (47°13'-22' de latitude nord, et 71°05'-11' de longitude ouest). D'une superficie forestière de 6664 hectares, le sapin baumier (*Abies balsamea* (L.) Mill.), le bouleau à papier et l'épinette blanche (*Picea glauca* (Moench) Voss) en sont les principales espèces forestières. La station expérimentale est caractérisée par un relief plutôt accidenté formant un plateau de 750 m d'altitude, traversé par deux rivières principales.

La forêt Montmorency est située dans le domaine de la sapinière à bouleau blanc, en forêt boréale continue (annexe 1). Ce domaine couvre une superficie de 139 700 km² et bénéficie d'une température annuelle moyenne variant entre 0 et 1°C. La saison de croissance est relativement courte, et les précipitations sont généralement inférieures à 1000 mm/an dans la partie ouest et supérieures à 900 mm/an dans la partie est. Ces précipitations, ainsi que leur influence sur le régime des feux et les paysages forestiers, permettent de subdiviser ce domaine en deux régions distinctes : la sapinière boréale humide de l'est et la sapinière boréale sèche de l'ouest (De Grandpré et *al.* 1996). De part son climat froid et humide, la forêt expérimentale fait partie intégrante de la sapinière à bouleau blanc de l'Est.

2.1.2 Sélection des sites de récolte

Nous devons choisir trois sites de récolte semblables en termes de composition forestière, de classes d'âge, de drainage et de pente. À l'aide du logiciel *Arcview 3.2* de *ESRI Inc.*, nous avons effectué des requêtes sélectives dans la base de données de la forêt Montmorency. Au total, une vingtaine de peuplements correspondait à nos critères de sélection. Après vérification sur le terrain, nous avons finalement choisi trois sites de récolte appartenant aux strates « SBB B3 70 » et « SBB C3 70 », soit des sapinières à bouleau blanc de densité de couvert « B » (61 à 80%) et « C » (41 à 60%), de 12 à 17m de

hauteur dominante et de classe d'âge 70 (61 à 80 ans) (figure 2.1). Les trois sites de récolte sont caractérisés par un drainage modéré et par des pentes fortes (31 à 40%).

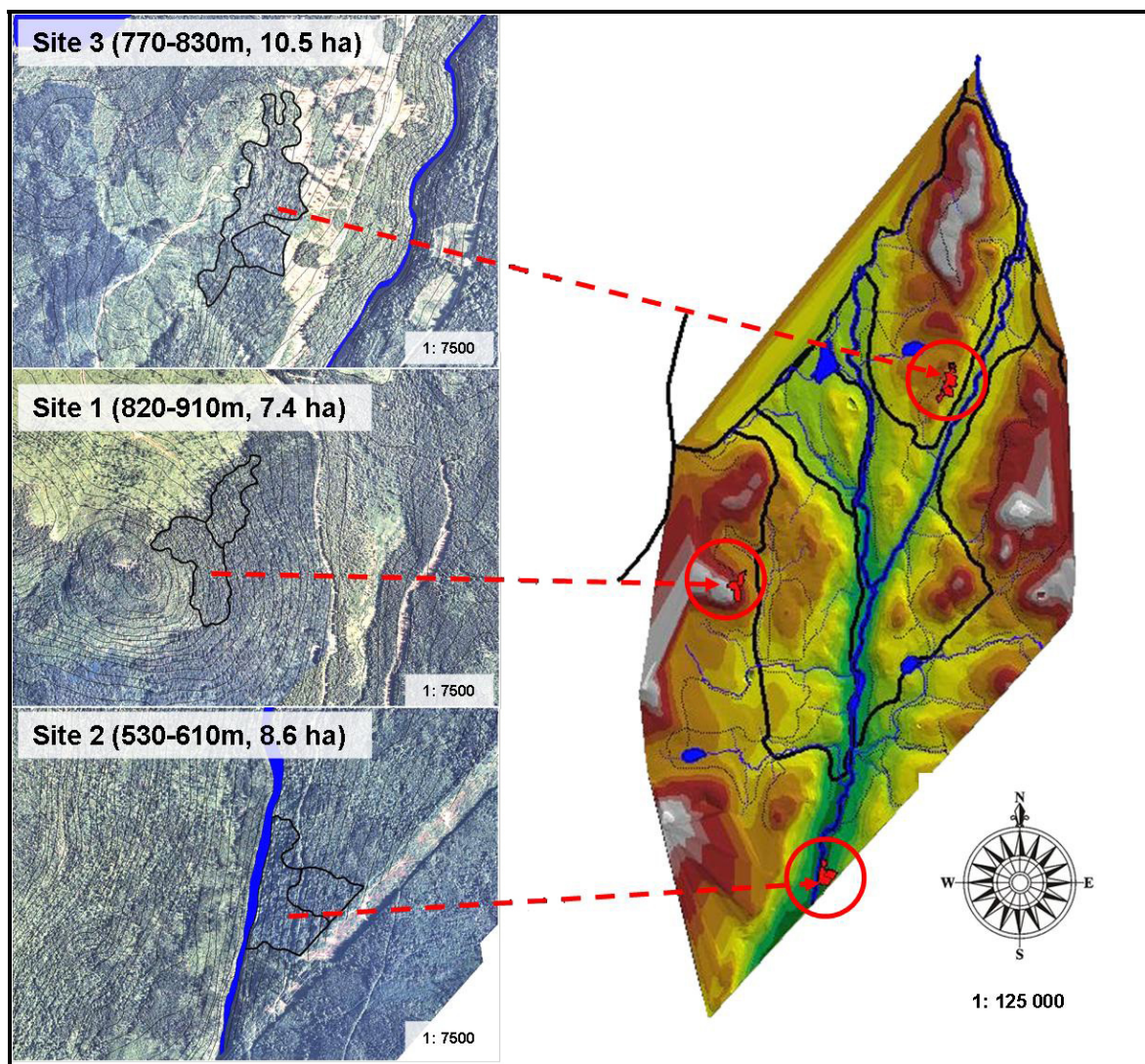


Figure 2.1 Localisation et caractéristiques des sites de récolte de la Forêt Montmorency; Université Laval

2.1.3 Caractéristiques des sites de récolte

2.1.3.1 Composition et structure

À partir des inventaires réalisés sur le terrain, nous avons pu caractériser la composition et la structure des trois sites de récolte. Dans ce chapitre, la composition et la structure forestières sont définies respectivement comme la répartition des espèces arborescentes et arbustives et la répartition des classes de diamètres d'un peuplement, en pourcentage de la surface terrière.

Pour un arbre, la surface terrière (g , en m^2) correspond à la surface de sa section transversale à 1,30 m au-dessus du sol, soit $g = \pi (DHP/2)^2$. Pour un peuplement, la surface terrière (G , en m^2/ha) est alors la somme des surfaces terrières individuelles, ramenée à une unité de superficie.

La répartition des espèces arborescentes et arbustives par site est présentée à la figure 2.2. Les trois sites ont sensiblement la même composition forestière, il s'agit de sapinières à bouleau blanc. Le sapin baumier est l'espèce dominante avec 65% et plus de la surface terrière. Le bouleau à papier est la deuxième espèce en importance avec 21 à 31% de la surface terrière. La proportion de bouleau à papier est légèrement plus élevée dans le site 3. Les autres espèces arborescentes et arbustives, observées dans des proportions plus faibles, sont l'épinette blanche, l'érable rouge et le sorbier d'Amérique (*Sorbus americana*).

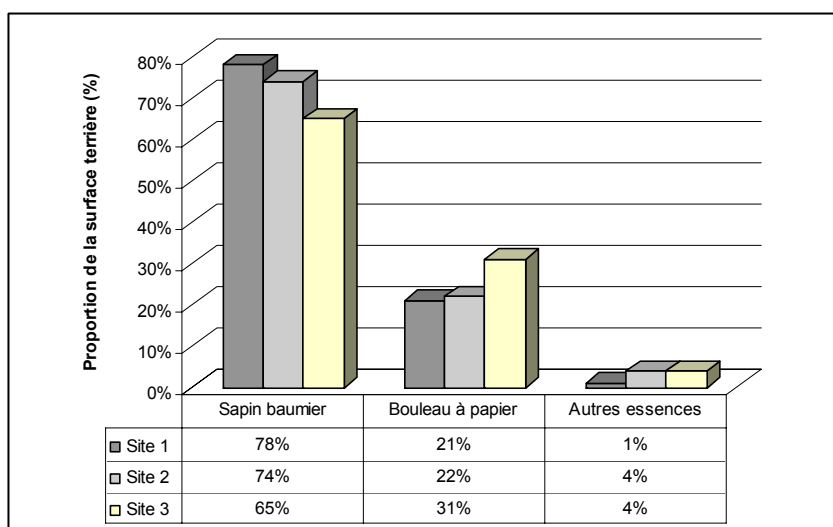


Figure 2.2 Répartition des espèces forestières, par site de récolte, en pourcentage de la surface terrière

La répartition des classes de diamètres par site est présentée à la figure 2.3. Les trois sites ont sensiblement la même structure forestière. La classe de diamètre 15 à 25 cm est la plus importante. La proportion de tiges de moins de 25 cm est également plus élevée pour le site 3.

La densité et la surface terrière par site sont présentées au tableau 2.1. La densité, en nombre de tiges par hectare, est très différente selon le site, tandis que la surface terrière est à peu près similaire. Le site 2 présente la plus faible densité de peuplement et la plus petite surface terrière. Le site 3 a la plus grande densité de peuplement, mais sa surface terrière est identique à celle du site 2.

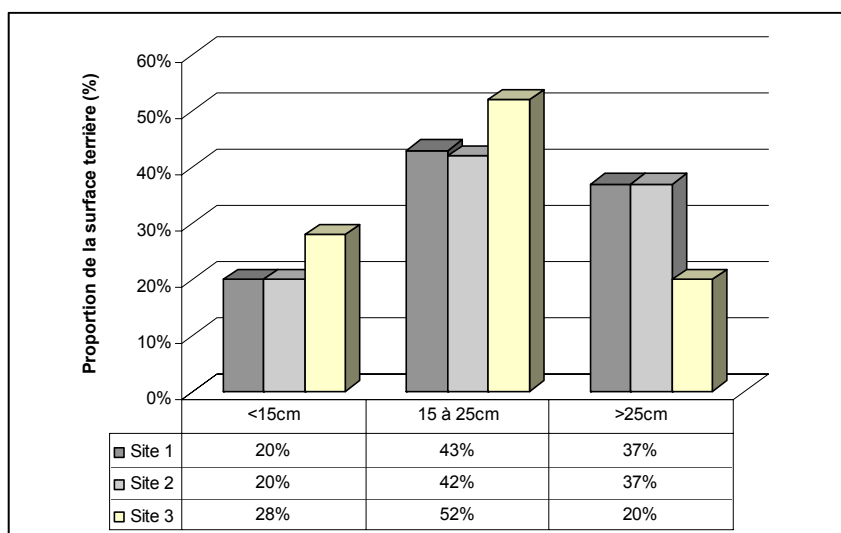


Figure 2.3 Répartition des classes de diamètres, par site de récolte, en pourcentage de la surface terrière

Tableau 2.1 Densité (tiges/ha) et surface terrière totale (m²/ha) par site de récolte

Site	Densité (tiges/ha)	surface terrière (m ² /ha)
1	1815	32,5
2	2918	36,7
3	3946	36,7

2.1.3.2 Indice de qualité de station

L'indice de qualité de station (IQS) correspond à la hauteur moyenne des arbres dominants et codominants d'un peuplement mesurée ou calculée à un âge de référence, généralement de 50 ou 100 ans. L'IQS permet d'évaluer la productivité d'un sol forestier (Perron 1996). Pothier et Savard (1998) ont développé des relations âge-hauteur pour le bouleau à papier, valides pour toutes les régions du Québec. Ils ont défini quatre IQS différents à 50 ans : 12, 15, 18 et 21 mètres (figure 2.4).

L'âge, la hauteur dominante et l'indice de qualité station de chaque site sont présentés au tableau 2.2. Les hauteurs moyennes des trois sites expérimentaux sont sensiblement égales. Les sites 2 et 3 ont le même âge moyen, donc le même niveau de productivité. D'autre part, on peut supposer que le niveau de productivité du site 1 est légèrement plus élevé, puisque son âge moyen est plus faible que celui des deux autres stations.

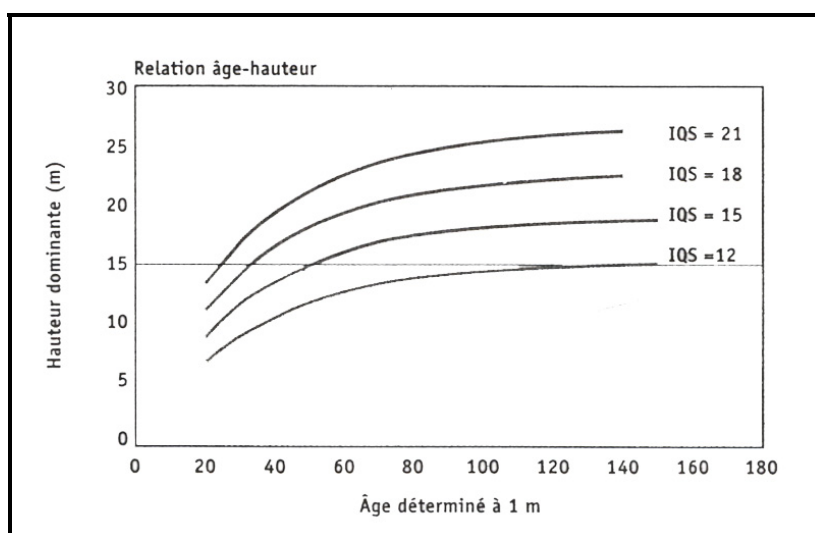


Figure 2.4 Indice de qualité de station du bouleau à papier en fonction de la hauteur et de l'âge des arbres dominants et codominants (d'après Pothier et Savard 1998)

Tableau 2.2 Indice de qualité de station (IQS) du bouleau à papier, par site de récolte, en fonction de la hauteur et de l'âge des arbres dominants et codominants

Site	nombre d'arbres	hauteur moyenne (m)	âge moyen (années)	IQS (m)
1	28	13,7	53,5	12-15
2	45	13,6	58,3	12-15
3	34	13,6	58,6	12-15

Nous avons déterminé l'âge moyen des arbres dominants et codominants à 30 cm au dessus du niveau le plus élevé du sol. Il faudrait donc corriger cet âge pour utiliser correctement les courbes de Pothier et Savard (1998). Sans entrer dans les détails, l'IQS des trois sites expérimentaux se situe probablement entre 12 et 15 mètres, ce qui correspond à un niveau de productivité faible.

2.2 Matériel

2.2.1 Inventaire de 150 arbres échantillons

Dans chaque site, nous avons sélectionné 50 bouleaux à papier selon un plan d'échantillonnage systématique. Pour cela, nous avons préalablement défini des virées avec des placettes à tous les 30 m. À chaque 30 m, le bouleau à papier le plus proche du centre de la placette a été identifié et inventorié. Il devait mesurer plus de 15 cm au dhp et présenter le moins de symptômes de dépérissement possible.

Pour chacun de ces arbres, une carotte a été prélevée à l'aide d'une sonde de Pressler, à 30 cm au dessus du niveau le plus élevé du sol. Lorsque du duramen était observé à la souche, l'arbre était à nouveau sondé à 80 et 130 cm. Les épaisseurs d'écorce, d'aubier et de duramen ont été mesurées au millimètre près pour chaque carotte. De plus, nous avons mesuré les diamètres à 30, 80 et 130 cm, ainsi que la hauteur totale de l'arbre et la hauteur de la base de la cime vivante (figure 2.5).



Figure 2.5 Techniques d'inventaire forestier

L'âge des arbres a été estimé en laboratoire à partir des carottes prélevées à hauteur de souche. Les carottes ont été collées sur un support en bois puis sablées de manière à rendre plus visible les cernes annuels. L'estimé de l'âge cambial a été effectué à l'aide d'une loupe binoculaire.

Le statut social au sein d'une même strate détermine les chances de développement des individus (Schütz 1990). Pour déterminer le statut social des arbres échantillons, nous avons utilisé les normes de classement du Ministère des Ressources naturelles et de la Faune du Québec (figure 2.6) (Perrin et Morin 2002). À chaque placette, nous avons pris la hauteur moyenne de trois arbres dominants, excluant les arbres vétérans, comme hauteur dominante.

À titre expérimental, nous avons utilisé un autre système de classement des cimes défini par Meadows *et al.* (2001). Ce classement, très facile à utiliser sur le terrain, fournit des informations pertinentes sur les conditions de développement du houppier.

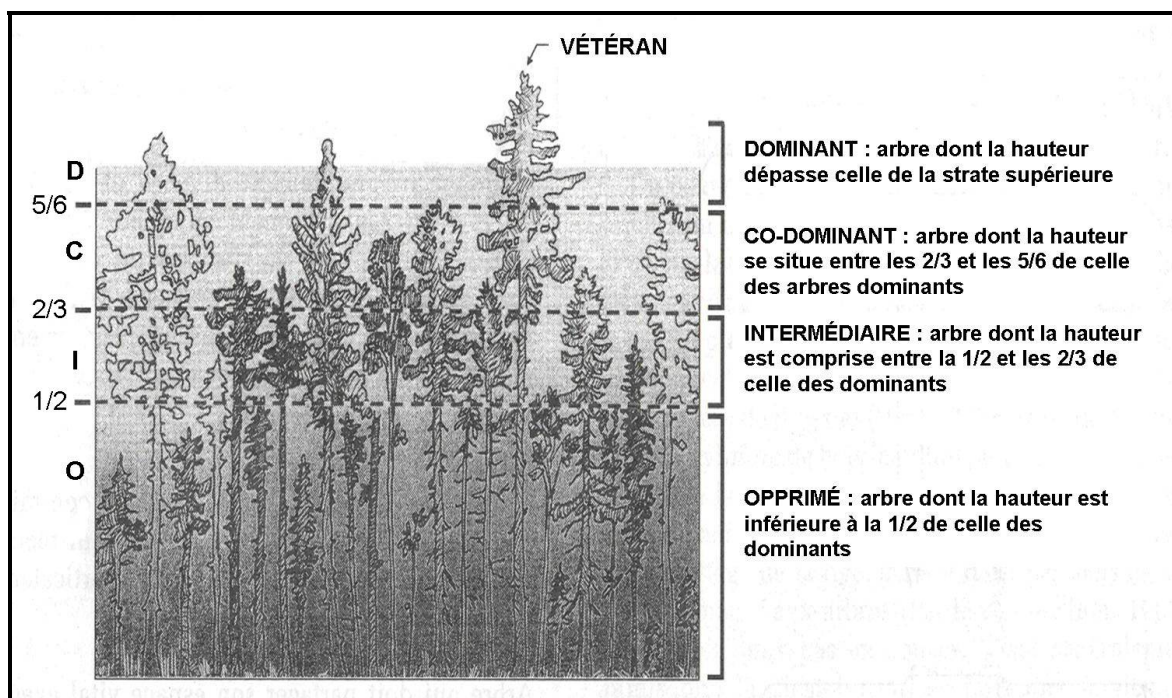


Figure 2.6 Classement des cimes utilisé par le Ministère des Ressources naturelles et de la Faune du Québec (d'après Perron et Morin 2002)

Le système de classement de Meadows et *al.* (2001) est basé sur quatre critères : (1) la quantité de lumière directe atteignant le sommet du houppier, (2) la quantité de lumière directe atteignant les côtés du houppier; (3) la répartition spatiale du houppier et (4) la taille relative de celui-ci en termes de possibilité de croissance latérale et de densité. Par un système de points attribués à chaque critère, on détermine finalement le statut social du houppier sans tenir compte de la hauteur dominante du peuplement.

Finalement, nous avons estimé, à titre indicatif, le degré d'ensoleillement et la proportion de chablis de chaque placette en utilisant quatre intensités de mesure : élevé, moyen, faible et nul.

2.2.2 Inventaire de 18 arbres échantillons avec duramen

Dans chaque site, nous avons effectué un échantillonnage aléatoire stratifié en sélectionnant six arbres avec duramen parmi les 50 arbres échantillons, dont deux arbres par strate dominante, codominante et intermédiaire.

En premier lieu, nous avons tenté de caractériser la morphologie des houppiers. Nous avons donc mesuré, au décimètre près, les longueurs totales et exposées à la lumière directe des rayons cardinaux de chaque houppier. Nous avons ensuite calculé la surface de projection horizontale du houppier en m², selon la formule « πr^2 », où « r » est la longueur moyenne des rayons cardinaux.

Nous avons ensuite déterminé la compétition relative en mesurant les variables, dhp et distance, de tous les arbres compétiteurs dans un rayon de huit mètres autour de chaque arbre échantillon.

Une fois ces mesures terminées, les 18 arbres échantillons ont été abattus. Nous avons ensuite caractérisé le branchage de chaque arbre, en mesurant la hauteur, au dixième de mètre près, et le diamètre basal, au millimètre près, de toutes les branches primaires mortes et vivantes. Le diamètre basal a été mesuré à 15 cm du gros bout pour éviter le renflement à la base de la branche. D'autre part, le bouleau à papier a tendance à former de nombreuses fourches. Nous avons donc décidé d'ignorer les fourches de plus de 9 cm de diamètre, et de

considérer comme branches primaires celles de diamètres inférieurs. Pour finir, nous avons mesuré, au millimètre près, le diamètre basal de toutes les branches secondaires de l'arbre.

2.2.3 Récolte des feuilles

Dans la présente étude, nous avons considéré le premier tiers supérieur de la cime, comme houppier de lumière et les deux tiers restants comme houppier d'ombre. Dans chaque section de houppier, trois branches secondaires, sans duramen à la découpe, ont été sélectionnées proportionnellement à leur diamètre basal. Par la suite, les 108 branches échantillons (trois branches * deux sections de houppier * 18 arbres) ont été effeuillées en totalité. Finalement, les lots de feuilles sans pétiole ont été identifiés par branche, conservés au frais et transportés au laboratoire la journée même pour être analysés.

2.2.4 Récolte des disques de bois

Une fois les feuilles récoltées, les 18 arbres échantillons avec duramen ont été tronçonnés en disques à tous les 50 cm jusqu'à la découpe au fin bout de 9 cm de diamètre avec écorce. Le premier disque fut prélevé à la souche, soit à 30cm au dessus du niveau le plus élevé du sol. Nous avons également prélevé des disques sur les branches à tous les 50 cm jusqu'à la découpe au fin bout de 9 cm de diamètre avec écorce. Sur chacun des disques, nous avons identifié l'arbre, la hauteur et les directions Est et Sud (figure 2.7). Avant d'être analysés, ces disques ont été conservés à -5° Celsius, dans des sacs fermés hermétiquement de manière à conserver l'humidité.

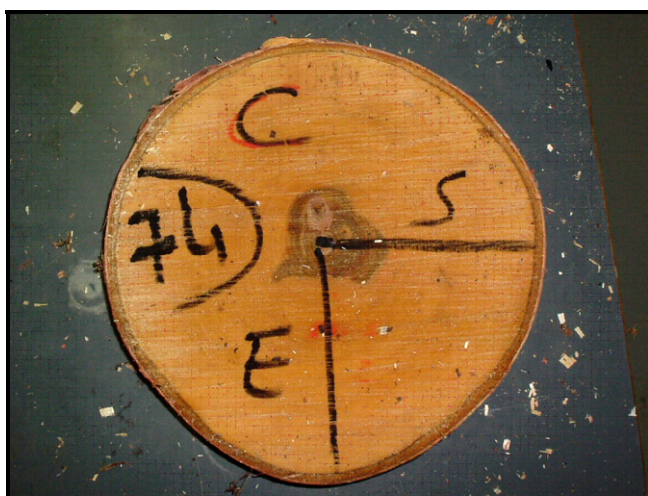


Figure 2.7 Identification d'un disque de bois

2.3 Méthodes

2.3.1 Détermination de la compétition relative

À partir des mesures prélevées sur le terrain, nous avons calculé en laboratoire l'indice de Hegyi (équation 2.1) et la surface terrière (m²/ha) pour évaluer la compétition autour de chaque arbre échantillon.

L'indice de Hegyi est une mesure de compétition dépendante des distances (Hegyi 1974). Son efficacité a déjà été vérifiée et confirmée sur des espèces feuillues nordiques (Holmes et Reed 1991; O'Neal et *al.* 1994).

$$IC_{Hegyi} = \sum_{ij=1}^n \left(\frac{DHP_j}{DHP_i} \right) / DIST_{ij} \quad [2.1]$$

Où :

IC_{Hegyi} : indice de compétition de Hegyi pour l'arbre échantillon « i »;

DHP : diamètre à hauteur de poitrine, au millimètre près;

$DIST_{ij}$: distance entre l'arbre « i » et son compétiteur « j », au décimètre près;

n : nombre d'arbres compétiteurs dans un rayon de huit mètres.

2.3.2 Détermination des paramètres foliaires

2.3.2.1 Estimation du poids foliaire sec d'une branche échantillon

La méthodologie utilisée pour estimer la surface foliaire et le poids foliaire sec d'une branche échantillon est adaptée de Meadows et Hodges (2002). En laboratoire, nous avons mesuré le poids vert, au gramme près, du feuillage de chaque branche secondaire (figure 2.8). Nous avons ensuite sélectionné aléatoirement 30 feuilles par branche. Ce sous-échantillon a été pesé à l'état vert, au centième de gramme près, avant d'être séché pendant 24h à 90°C. Suite au séchage, le sous-échantillon est à nouveau pesé pour obtenir le poids sec. De cette façon, nous avons calculé des ratios « poids vert / poids sec » spécifiques et, par suite logique, des estimations du poids foliaire sec de chaque branche échantillon.



Figure 2.8 Étapes de l'analyse foliaire

2.3.2.2 Estimation de la surface foliaire d'une branche échantillon

Avant d'être séchés, les sous-échantillons de 30 feuilles ont été numérisés. La surface foliaire totale de chaque sous-échantillon a été analysée, au centième de cm^2 près, à l'aide du logiciel *WinFOLIA* de *Regent Instruments Inc.* (figure 2.8). Nous avons donc calculé des ratios « surface foliaire / poids sec » spécifiques et, par suite logique, des estimations de la surface foliaire de chaque branche échantillon.

2.3.3 Détermination des quantités d'aubier et de duramen

2.3.3.1 Notions théoriques

La méthodologie utilisée pour déterminer les proportions d'aubier et de duramen d'un arbre repose sur deux constats théoriques. Tout d'abord, nous savons que la conversion de l'aubier en duramen est provoquée par la mort des cellules de parenchyme. En pratique, il serait extrêmement difficile et fastidieux de délimiter exactement cette zone pour chaque disque. Par commodité, nous avons décidé d'utiliser la région du duramen colorée par des substances extractibles. Quoiqu'il en soit, cette distinction ne devrait pas affecter la pertinence de nos résultats basés sur des observations macroscopiques. De plus, nous savons que la coloration du duramen affecte directement l'apparence et l'utilisation du bois chez le bouleau à papier, d'où l'intérêt de la caractériser.

D'autre part, le processus de coloration du duramen ne se fait pas cerne après cerne, mais bien cellule après cellule. En effet, après la mort des cellules de parenchyme, les substances extractibles imprègnent les parois et les lumens des cellules avoisinantes sans se limiter à un cerne quelconque. Ainsi, le patron de coloration du duramen n'est pas spatialement uniforme à l'intérieur d'un arbre. Par souci d'exactitude, nous avons donc décidé de

mesurer directement la surface du duramen coloré, plutôt que de compter le nombre moyen de cernes à l'intérieur de cette région pour chaque disque de bois.

2.3.3.2 Méthodologie

Nous avons développé une méthode de traitement d'images à l'aide du logiciel *Photoshop Element 2* de *Adobe Systems Inc.* L'objectif est de schématiser le plus fidèlement possible les différents constituants du bois (aubier, duramen, écorce interne et nœuds) à partir de l'image numérisée d'un disque. Les disques récoltés en forêt ont été rabotés puis numérisés à haute résolution (400 pixels/po ou 157,5 pixels/cm).

La méthode utilisée pour le traitement d'images comprend trois étapes principales (figure 2.9). La première étape consiste à préparer et nettoyer les images numérisées à haute résolution (disque n°1). Pour cela, nous avons supprimé les zones périphériques sans intérêt, ainsi que l'écorce externe trop difficile à schématiser. Nous avons ensuite appliqué une correction colorimétrique et une amélioration de la luminosité et du contraste (disque n°2). L'étape suivante consiste à sélectionner le duramen (disque n°3), puis l'aubier (disque n°4) et enfin l'écorce interne (disque n°5) avec les outils de sélection semi-automatique (lasso magnétique, baguette magique) de *Photoshop Elements 2*. Nous avons appliqué une couleur différente à chaque sélection de manière à pouvoir les différencier par la suite. La dernière étape consiste à appliquer un filtre médian de 25 pixels de rayon pour uniformiser l'image sans perdre trop de précision.



Figure 2.9 Étapes du traitement d'images réalisé avec *Photoshop Elements 2*

La sélection du duramen est l'étape qui nécessite le plus de précision (figure 2.10). Après avoir ajusté la coloration, la luminosité et le contraste de l'image (image n°2), on doit tracer précisément le contour du duramen avec l'outil lasso magnétique de *Photoshop Elements 2* (image n°3). Cet outil détecte automatiquement le contour d'une zone très contrastée par rapport à son environnement. Une fois le duramen délimité, on applique une couleur arbitraire à la zone de sélection (image n°4).

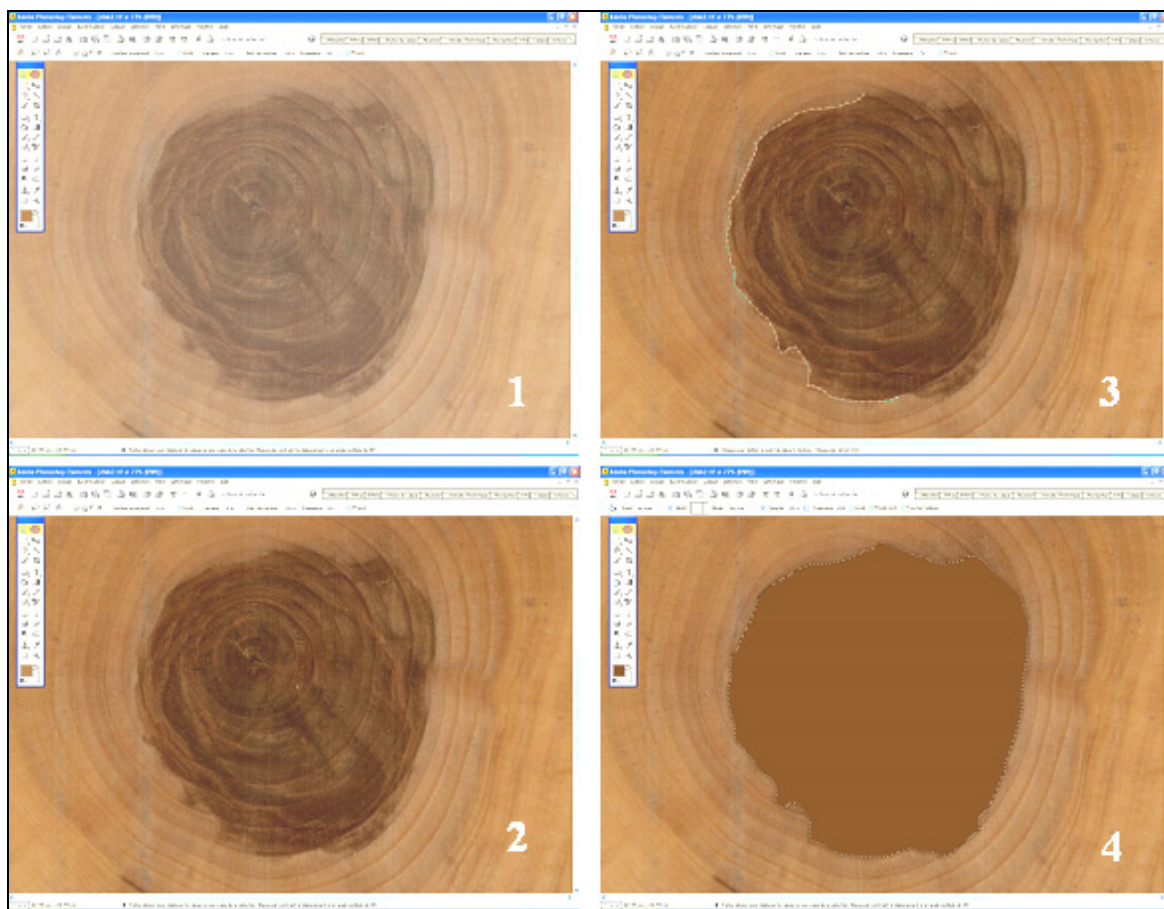


Figure 2.10 Détermination du contour de la région colorée du duramen

2.3.3.3 Détermination des surfaces

Une fois la schématisation terminée, il est possible de connaître le nombre exact de pixels par zone de sélection avec l'option histogramme de *Photoshop Element 2*. Connaissant la résolution de l'image, nous pouvons ensuite calculer précisément les surfaces de duramen, d'aubier et d'écorce interne, au dixième de centimètre carré près (tableau 2.3).

2.3.3.4 Détermination des volumes

À partir des surfaces calculées, il est possible d'estimer les volumes de duramen, d'aubier et d'écorce interne entre deux disques, sachant qu'ils ont été prélevés à tous les 50 cm. Nous avons donc utilisé une formule dérivée de celle de Smalian pour calculer ces volumes :

$$V_{ij} = \left[\frac{S_i + S_j}{2} \right] * L_{ij} \quad [2.2]$$

Où :

V_{ij} : volume de duramen, d'aubier ou d'écorce interne pour le tronçon « ij » (m³);

S_i : surface de duramen, d'aubier ou d'écorce interne à une hauteur « i » (m²);

S_j : surface de duramen, d'aubier ou d'écorce interne à une hauteur « j » (m²);

L_{ij} : distance entre S_i et S_j (0,5 m).

Tableau 2.3 Détermination des surfaces de duramen, d'aubier et d'écorce interne pour le disque de la figure 2.9

Constituant	nombre de pixels	résolution (pixels/cm)	résolution (pixels/cm ²)	inverse (cm ² /pixel)	surface (cm ²)	surface (%)
aubier	7 459 428	157,5	24800	4,03 ^E -05	300,8	78
duramen	1 343 308	157,5	24800	4,03 ^E -05	54,2	14
écorce interne	726 762	157,5	24800	4,03 ^E -05	29,3	8
image	9 505 147	157,5	24800	4,03 ^E -05	383,3	100

Finalement, on obtient le volume total de duramen, d'aubier et d'écorce interne d'un arbre échantillon en faisant la somme des volumes partiels de chaque tronçon. Le volume total calculé pour un arbre échantillon correspond *grosso modo* au volume marchand brut de celui-ci (figure 2.11). Le volume marchand brut, par définition, est le cubage du fût et des branches, sous écorce, depuis la souche jusqu'à une découpe de 9 cm avec écorce (Perron 1996). Cependant, nous avons utilisé une hauteur de souche de 30 cm plutôt que 15 cm, telle que recommandée pour le calcul du volume marchand brut. À partir des volumes calculés, il est possible d'estimer les proportions de duramen, d'aubier et d'écorce interne en fonction du volume marchand brut de l'arbre.

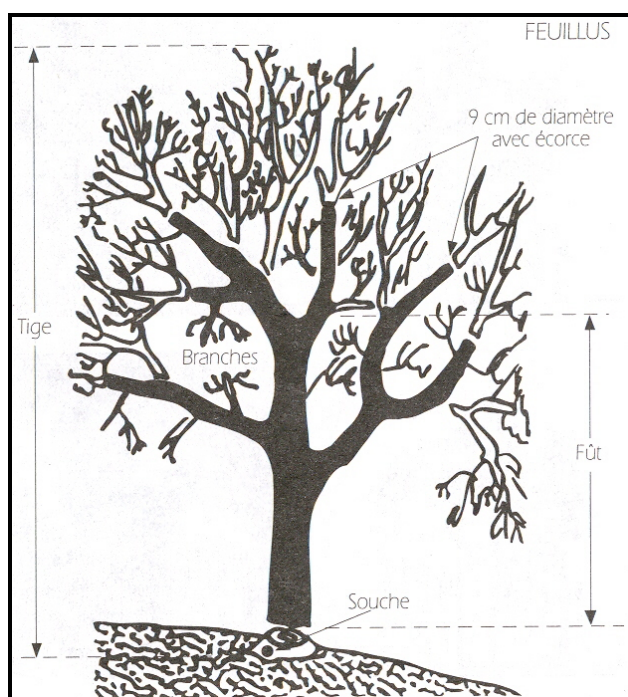


Figure 2.11 Détermination du volume marchand brut selon les normes du Ministère des Ressources naturelles et de la Faune du Québec (Perron 1996)

2.4 Analyses statistiques des données

2.4.1 Relations entre l'aubier et le feuillage (n = 18)

2.4.1.1 Estimation des paramètres foliaires par arbre entier

Nous avons utilisé deux modèles linéaires mixtes pour prédire la surface foliaire et le poids foliaire sec des branches secondaires à partir de leur diamètre basal (proc MIXED; SAS Institute Inc. 2004).

Sur le terrain, nous avons mesuré le diamètre basal des branches secondaires des 18 arbres échantillons. En laboratoire, nous avons déterminé la surface foliaire et le poids foliaire sec de 108 branches échantillons (trois branches * deux sections de houppier * 18 arbres). Cependant, pour simplifier nos modèles statistiques, nous avons utilisé uniquement les moyennes des paramètres foliaires par section de houppier. Nous disposons donc d'une mesure foliaire moyenne par section de houppier correspondant à un diamètre basal moyen, soit au total 36 observations.

La structure des unités expérimentales, c'est-à-dire des branches échantillons, correspond à un plan emboîté-hierarchique (*nested design*). Le site et la section de houppier sont considérés comme des facteurs fixes, tandis que l'arbre est défini comme un facteur aléatoire emboîté dans le site : arbre(site), puisque les arbres échantillon ont été sélectionnés aléatoirement à l'intérieur de chaque site. En outre, nous supposons l'existence d'une corrélation entre les observations moyennes d'un même arbre (corrélation intra-arbre). C'est pourquoi, nous utilisons un modèle mixte linéaire pour prédire la surface foliaire et le poids foliaire sec des branches secondaires.

Le modèle de régression linéaire mixte est une généralisation du modèle de régression linéaire permettant d'obtenir des coefficients de régression aléatoires et de tenir compte de la corrélation entre les variables endogènes (Duchesne 2004).

Le modèle théorique de régression linéaire mixte, peut s'écrire de la manière suivante :

$$Y_{ijk} = A_{ijk} + B_{ijk} X_{ijk} + \varepsilon_{ijk} \quad [2.3]$$

$$\text{ou } Y_{ijk} = (\alpha_i + a_{j(i)}) + (\beta_i + b_{j(i)})X_{ijk} + \varepsilon_{ijk} \quad [2.4]$$

$$\text{ou } Y_{ijk} = \alpha_i + \beta_i X_{ijk} + a_{j(i)} + b_{j(i)} X_{ijk} + \varepsilon_{ijk} \quad [2.5]$$

Où,

Y_{ijk} : mesure foliaire moyenne propre à la section «k» du houppier, de l'arbre «j», du site «i» (cm² ou g);

X_{ijk} : diamètre basal moyen de la section «k» du houppier, de l'arbre «j», du site «i» (mm);

A_{ijk} et B_{ijk} : intercept et pente de l'équation linéaire ;

α_i : composante fixe de l'intercept, propre à chaque site ;

$a_{j(i)}$: composante aléatoire de l'intercept, propre à chaque arbre;

β_i : composante fixe de la pente, propre à chaque site;

$b_{j(i)}$: composante aléatoire de la pente, propre à chaque arbre;

ε_{ijk} : terme d'erreur.

Pour chaque modèle linéaire mixte, nous avons effectué une transformation racine carrée de la variable dépendante, c'est-à-dire de la surface foliaire ou du poids foliaire sec. De cette manière, on obtient des valeurs prédites positives, tout en respectant les postulats de normalité des observations et d'égalité des variances.

Avec les deux modèles linéaires mixtes, nous avons estimé la surface foliaire et le poids foliaire sec pour chaque branche secondaire des 18 arbres échantillons. Par l'addition des mesures foliaires individuelles, nous avons calculé la surface foliaire et le poids foliaire sec par arbre entier.

Nous avons ensuite déterminé les statistiques descriptives (moyenne, écart-type et étendue) des paramètres foliaires par arbre entier (proc MEANS; SAS Institute Inc. 2004).

Une analyse de variance a finalement été effectuée sur ces paramètres en incluant le site de récolte et le statut social de l'arbre comme effets principaux du modèle (proc GLM; SAS Institute Inc. 2004).

2.4.1.2 Surface foliaire spécifique

Nous avons effectué une analyse de variance sur la surface foliaire spécifique, c'est-à-dire sur la surface foliaire par unité de biomasse sèche (m^2/kg), en incluant le site de récolte, le statut social de l'arbre et la section de houppier comme effets principaux du modèle.

Nous avons ensuite utilisé un niveau de signification de $\alpha = 0,05$ et un test de comparaisons multiples de Duncan pour chaque site de récolte de manière à séparer les moyennes selon le statut social de l'arbre (proc GLM, option DUNCAN; SAS Institute Inc. 2004).

2.4.1.3 Distribution verticale du feuillage

Les proportions de feuillage dans chaque section de houppier ont été déterminées de manière à décrire la distribution verticale du feuillage à l'intérieur de la cime. Ces proportions sont exprimées en termes de surface foliaire et de poids foliaire sec.

Une analyse de variance a été effectuée sur ces proportions, en incluant le site de récolte, le statut social de l'arbre et la section de houppier comme effets principaux du modèle. Nous avons utilisé un niveau de signification de $\alpha = 0,05$ et un test de comparaisons multiples de Duncan, pour chaque section de houppier, de manière à séparer les moyennes selon le statut social de l'arbre (proc GLM, option DUNCAN; SAS Institute Inc. 2004).

Nous avons appliqué une transformation angulaire (*arc sine transformation*) sur les proportions de feuillage, de manière à améliorer la symétrie et la normalité des données (équation 2.6) (Sokal et Rohlf 1995).

$$F(p) = \text{ArcSin}\sqrt{p} \quad [2.6]$$

2.4.1.4 Prédiction des paramètres foliaires

Avec des analyses de régression, nous voulons évaluer les trois variables explicatives suivantes, comme estimateur de la surface foliaire et du poids foliaire sec par arbre entier : la surface transversale d'aubier à hauteur de poitrine, le volume total d'aubier et le dhp.

Pour comparer les modèles de régression entre eux, nous avons utilisé les statistiques de l'erreur-type résiduelle (*standard error of the estimate*) et du coefficient de détermination ajusté.

Des régressions linéaires simples ont d'abord été utilisées pour chaque estimateur (proc REG; SAS Institute Inc. 2004). Nous avons ensuite testé plusieurs modèles de régression non-linéaire simple pour vérifier s'ils permettaient d'améliorer la qualité générale de l'ajustement (proc NLIN; SAS Institute Inc. 2004).

Finalement, nous avons effectué des analyses de régression linéaire multiple pour vérifier si l'ajout au modèle linéaire d'une ou de plusieurs autres variables explicatives permettait d'améliorer la précision des estimations. En plus des trois estimateurs, nous avons testé l'ajout des variables explicatives suivantes : âge, hauteur totale, surface de projection horizontale, base et longueur de la cime vivante, quantité de lumière directe atteignant le sommet et les côtés du houppier, répartition spatiale et taille relative du houppier, indice de compétition de Hegyi et surface terrière locale (proc REG; SAS Institute Inc. 2004).

La méthode de sélection « *pas-à-pas* » a été utilisée pour déterminer le ou les variables explicatives et significatives qui seront ajoutées à chaque modèle linéaire multiple (proc REG, option STEPWISE; SAS Institute Inc. 2004).

Finalement, nous avons déterminé les coefficients de corrélation de Pearson de la surface de projection horizontale du houppier avec la surface foliaire et le poids foliaire sec par arbre entier (proc CORR; SAS Institute Inc. 2004).

2.4.1.5 Ratios « paramètres foliaires / surface d'aubier »

Nous avons déterminé les statistiques descriptives (moyenne, écart-type et étendue) des ratios « surface foliaire / surface d'aubier » (SF/SA) et « poids foliaire / surface d'aubier » (PF/SA) par arbre entier (proc MEANS; SAS Institute Inc. 2004).

Nous avons ensuite effectué une analyse de variance sur ces ratios en incluant le site de récolte et le statut social de l'arbre comme effets principaux du modèle (proc GLM; SAS Institute Inc. 2004).

Finalement, nous avons déterminé les coefficients de corrélation de Pearson des ratios SF/SA et PF/SA, par arbre entier, avec les variables explicatives suivantes : âge, dhp, hauteur totale, indice de compétition de Hegyi et surface terrière locale (proc CORR; SAS Institute Inc. 2004).

2.4.2 Probabilité de présence de duramen (n=150)

Nous avons développé un modèle de régression logistique multiple afin de prédire la probabilité de présence de duramen pour un arbre donné (Proc LOGISTIC; SAS Institute Inc. 2004). Pour la construction du modèle logistique, nous avons suivi l'approche proposée par Hosmer et Lemeshow (2000).

La variable dépendante est une variable qualitative dichotomique (présence ou absence de duramen) et nous disposons de plusieurs variables explicatives : âge, dhp, hauteur totale, volume total, surface de projection horizontale, base et longueur de la cime vivante, quantité de lumière directe atteignant le sommet et les côtés du houppier, répartition spatiale et taille relative du houppier, indice de compétition de Hegyi et surface terrière locale.

L'analyse de régression logistique permet de modéliser la probabilité de présence de duramen à partir d'une transformation logit (équation 2.7). À l'aide de cette transformation, la valeur prédite de la probabilité reste dans l'intervalle 0 à 1 (Hosmer et Lemeshow 2000).

Le modèle théorique de régression logistique multiple s'écrit de la manière suivante, en tenant compte de l'effet du site :

$$\text{Logit}(P_{ij}) = \log \left[\frac{P_{ij}}{1 - P_{ij}} \right] = \beta_{0i} + \beta_{1i} X_{1ij} + \beta_{2i} X_{2ij} + \dots + \beta_{Ni} X_{Nij} \quad [2.7]$$

Où,

P_{ij} : probabilité de présence de duramen propre à l'arbre «j» du site «i»;

$X_{1ij} \dots X_{Nij}$: « n » variables explicatives du modèle;

β_{0i} : intercept propre au site « i »;

$\beta_{1i} \dots \beta_{Ni}$: « n » coefficients propres à chacune des « n » variables explicatives.

À partir de la fonction logit, nous pouvons calculer la probabilité de présence de duramen de l'arbre « j » du site « i » (P_{ij}), de même que sa probabilité inverse ($1-P_{ij}$) (Hosmer et Lemeshow 2000):

$$P_{ij} = \frac{e^{\log it[P_{ij}]}}{1 + e^{\log it[P_{ij}]}} \quad [2.8]$$

$$1 - P_{ij} = \frac{1}{1 + e^{\log it[P_{ij}]}} \quad [2.9]$$

Où,

e : fonction exponentielle.

La méthode de sélection « *pas-à-pas* » a été utilisée pour déterminer les variables explicatives et significatives qui seront utilisées dans le modèle de régression logistique (proc LOGISTIC, option STEPWISE; SAS Institute Inc. 2004).

La transformation de la variable dhp ($Tdhp = 10^6/dhp^2$) a permis d'améliorer la précision des estimations du modèle logistique.

À partir des probabilités estimées (P_{ij}) par le modèle logistique, chaque arbre est classé automatiquement dans une des deux catégories suivantes : « présence de duramen » ($y = 1$) ou « absence de duramen » ($y = 0$). Pour cela, nous avons déterminé un seuil de classement (*cutpoint*) qui maximise la sensibilité et la spécificité du test (Hosmer et Lemeshow 2000).

Par définition, la sensibilité d'un modèle est la probabilité de classer un individu dans la catégorie « $y = 1$ », sachant qu'il est effectivement observé dans celle-ci. La spécificité d'un modèle est définie comme la probabilité de classer un individu dans la catégorie « $y = 0$ », sachant qu'il est effectivement observé dans celle-ci. Finalement, on entend par taux de bonnes classifications la probabilité de classer un individu dans une catégorie, sachant qu'il est effectivement observé dans celle-ci (Hosmer et Lemeshow 2000).

Ainsi, si la probabilité calculée d'un arbre est supérieure au seuil de classement, alors l'arbre est classé automatiquement dans la catégorie « présence de duramen ». Au contraire,

si la probabilité estimée est inférieure au seuil de classement, alors l'arbre est classé automatiquement dans la catégorie « absence de duramen ».

Une table de classification a été construite pour illustrer les valeurs observées et les valeurs prédites par le modèle logistique (proc LOGISTIC, option CTABLE; SAS Institute Inc. 2004).

Nous avons ensuite utilisé l'aire sous la courbe ROC (*Receiver Operating Characteristic*) comme indicateur de la capacité du modèle à discriminer les valeurs « $y = 1$ » des valeurs « $y = 0$ », à l'aide des variables explicatives. La courbe ROC est obtenue à partir des valeurs de sensibilité et de spécificité du test (Hosmer et Lemeshow 2000).

Les critères suivants, proposés par Hosmer et Lemeshow (2000), ont servi à évaluer la capacité de discrimination du modèle:

Si	aire ROC = 0,5	il n'y a pas de discrimination
Si	$0,7 \leq \text{aire ROC} < 0,8$	la discrimination est acceptable
Si	$0,8 \leq \text{aire ROC} < 0,9$	la discrimination est excellente
Si	aire ROC $\geq 0,9$	la discrimination est exceptionnelle

D'autre part, nous avons effectué un test de Hosmer-Lemeshow pour évaluer la qualité de l'ajustement du modèle aux données. Si le test est non-significatif, alors l'ajustement est satisfaisant pour toutes les valeurs observées dans l'échantillon des variables explicatives (proc LOGISTIC, option LACKFIT; SAS Institute Inc. 2004).

Des contrastes ont permis de définir des dhp limites pour étudier l'effet de l'interaction du site par la variable transformée du dhp (site*Tdhp) sur le logit de la probabilité de présence de duramen (proc GENMOD, option CONTRAST; SAS Institute Inc. 2004).

Finalement, nous avons effectué une validation croisée selon la technique du « *leave-one-out* », à l'aide d'une macro programmée dans SAS. Cette technique consiste à retirer une observation à la fois et à calculer une valeur prédite à partir du modèle de régression

logistique ajusté aux données restantes. On répète ce processus pour chaque observation et on calcule ensuite la performance moyenne des prédictions. Cette méthode permet d'évaluer la robustesse du modèle statistique (Stone 1974).

2.4.3 Proportions d'aubier et de duramen (n=18)

Nous avons déterminé les statistiques descriptives (moyenne, écart-type et étendue) des volumes et des proportions d'aubier, de duramen et d'écorce interne par arbre entier (proc MEANS; SAS Institute Inc. 2004).

Une analyse de variance a été effectuée sur les volumes et les proportions d'aubier et de duramen en incluant le site de récolte et le statut social de l'arbre comme effets principaux du modèle (proc GLM; SAS Institute Inc. 2004)

Nous avons appliqué une transformation angulaire (*arc sine transformation*) sur les proportions d'aubier et de duramen de manière à améliorer la symétrie et la normalité des données (équation 2.6) (Sokal et Rohlf 1995).

Nous avons déterminé les coefficients de corrélation de Pearson des volumes et des proportions d'aubier et de duramen par arbre entier, avec les variables explicatives suivantes : âge, dhp, hauteur totale, volume total, surface de projection horizontale, base de la cime vivante, longueur de cime, quantité de lumière directe atteignant le sommet et les côtés du houppier, répartition spatiale et taille relative du houppier, indice de compétition de Hegyi et surface terrière locale (proc CORR; SAS Institute Inc. 2004).

Une autre analyse de corrélation a été entreprise pour obtenir les coefficients de Pearson des épaisseurs et des proportions d'aubier, de duramen et d'écorce interne, mesurées à hauteur de poitrine, avec les volumes et les proportions respectives par arbre entier (proc CORR; SAS Institute Inc. 2004).

Des analyses de régression linéaire multiple ont servi à prédire les volumes et les proportions d'aubier et de duramen par arbre entier (proc REG; SAS Institute Inc. 2004).

La méthode de sélection « *pas-à-pas* » a été utilisée pour déterminer les variables explicatives et significatives qui seront utilisées dans chaque modèle linéaire (proc REG, option STEPWISE; SAS Institute Inc. 2004).

Finalement, nous avons utilisé le coefficient de détermination ajusté pour évaluer la qualité de l'ajustement des régressions linéaires multiples.

2.4.4 Profil interne des tiges (n =14)

Des équations polynomiales de degré six ont été utilisées pour tracer des courbes de tendance représentatives du défilement de l'arbre, de l'aubier, du duramen et de l'écorce interne (proc REG; SAS Institute Inc. 2004).

Nous avons ensuite déterminé les statistiques descriptives (moyenne, écart-type et étendue) des dimensions du duramen (hauteur du maximum, hauteur totale et proportion maximale) (proc MEANS; SAS Institute Inc. 2004).

Une analyse de variance a été effectuée sur les dimensions du duramen en incluant le site de récolte comme effet principal du modèle (proc GLM; SAS Institute Inc. 2004).

Finalement, nous avons déterminé les coefficients de corrélation de Pearson de la hauteur totale de duramen avec la proportion maximale de duramen et la hauteur de la base de la cime vivante (proc CORR; SAS Institute Inc. 2004).

CHAPITRE 3 RÉSULTATS ET DISCUSSION

3.1 Relations entre l'aubier et le feuillage

3.1.1 Estimation des paramètres foliaires par arbre entier

Dans chaque section de houppier, nous disposons de trois branches échantillons, pour lesquelles nous connaissons les diamètres basaux (X_{ijk}) et les paramètres foliaires (Y_{ijk}). Connaissant ces variables, nous avons déterminé les coefficients de régression (A_{ijk} et B_{ijk}) propres à chaque section de houppier. De cette manière, nous avons construit deux modèles linéaires mixtes qui permettent de prédire la surface foliaire et le poids foliaire sec de n'importe quelle branche secondaire (voir chapitre 2.4.1.1 *Estimation des paramètres foliaires par arbre entier*).

Connaissant le diamètre basal (X_{ijk}) et la position « site/arbre/houppier » (« ijk ») de toutes les branches secondaires, nous avons calculé leurs paramètres foliaires respectifs par extrapolation. Finalement, l'addition des mesures foliaires individuelles donne tout simplement la surface foliaire et le poids foliaire sec par arbre entier.

Les deux modèles linéaires mixtes expliquent respectivement 81 % et 80 % de la variance de la surface foliaire et du poids foliaire sec des branches échantillons.

Les valeurs calculées par arbre entier et les moyennes par site sont résumées à l'annexe 4. Les statistiques descriptives des paramètres foliaires par arbre entier sont présentées au tableau 3.1.

Tableau 3.1 Statistiques descriptives des paramètres foliaires par arbre entier (n=18)

Paramètre foliaire		moyenne (écart type)	étendue
Surface foliaire	(m ²)	108,7 (68,7)	21,5 - 314,3
Poids foliaire sec	(kg)	4,8 (2,9)	1,1 - 13,4

Les paramètres foliaires moyens sont plus élevés dans le site 3, en raison de deux arbres de fortes dimensions (arbres 127 et 138, annexe 4). Cependant, les analyses de variance ne révèlent aucune différence significative des mesures foliaires selon le site de récolte et le statut social de l'arbre (annexe 5, tableaux A5-1 et A5-2). En outre, la variabilité est importante à l'intérieur des sites, c'est-à-dire entre les arbres. Nous pouvons supposer que la surface foliaire et le poids foliaire sec varient principalement selon les caractéristiques individuelles des arbres échantillonnés.

3.1.2 Surface foliaire spécifique (SFS)

Les valeurs calculées par arbre entier et les moyennes par site sont résumées à l'annexe 4. D'après les résultats de l'analyse de variance, la SFS diffère significativement selon la section de houppier et selon le statut social de l'arbre en fonction du site (annexe 5, tableau A5-3).

L'effet de la section de houppier sur la SFS est hautement significatif ($p = 0,004$) (annexe 5, tableau A5-3). En effet, la SFS du houppier d'ombre ($22,0 \text{ m}^2/\text{kg}$) est significativement plus élevée que celle du houppier de lumière ($18,4 \text{ m}^2/\text{kg}$). Par conséquent, les feuilles du houppier d'ombre ont, en moyenne, une plus grande surface par unité de poids que les feuilles du houppier de lumière.

En général, on observe des changements importants, en ce qui concerne l'anatomie et la morphologie des feuilles, en fonction de la position dans la cime et de la taille de l'arbre. On distingue ainsi les feuilles d'ombre des feuilles de lumière, généralement plus petites et plus épaisses. Ces dernières se situent dans les parties du houppier les plus exposées à la lumière, contrairement aux feuilles d'ombre habituellement présentes à l'intérieur de la cime ou dans sa partie inférieure (Ashton *et al.* 1998; Meadows et Hodges 2001).

Ainsi, tel que suggéré par Meadows et Hodges (2001), on peut supposer que la SFS du houppier d'ombre est significativement plus élevée que celle du houppier de lumière, en raison d'une proportion plus importante de feuilles d'ombre dans cette région de la cime.

Ashton *et al.* (1998) ont analysé les caractéristiques anatomiques et morphologiques des feuilles de plusieurs bouleaux blancs provenant du nord de la Colombie-Britannique. À titre

de comparaison, ils obtiennent une SFS moyenne de 55,2 cm² par gramme de matière humide pour des arbres de 145 ans en moyenne. Dans notre étude, la SFS moyenne des 108 branches échantillonnées est de 202,3 cm² par gramme de matière sèche. Sachant que le taux d'humidité moyen contenu dans nos feuilles avoisinait les 195%, nous pouvons estimer notre SFS moyenne à 67,4 cm² par gramme de matière humide. La SFS moyenne obtenue par Ashton et *al.* (1998) est donc similaire à celle obtenue dans cette étude, bien que légèrement inférieure.

D'autre part, l'effet de l'interaction du statut social de l'arbre avec le site est marginalement significatif ($p=0,07$) (annexe 5, tableau A5-3). Les résultats du test de Duncan sont présentés au tableau 3.2. La SFS des arbres codominants est significativement différente de celle des arbres dominants et intermédiaires dans le site 3. Cependant, les différences de SFS ne sont pas significatives pour les sites 1 et 2.

Selon Meadows et Hodges (2001), la proportion de feuilles de lumière devrait être plus importante pour un arbre dominant que pour un arbre sous couvert forestier, compte tenu de son exposition au soleil. Par conséquent, la SFS totale d'un arbre dominant devrait être plus faible que celle d'un arbre sous couvert forestier. Cependant, nos résultats ne permettent pas de valider cette hypothèse.

Tableau 3.2 Résultats du test de Duncan pour la surface foliaire spécifique (m²/kg) avec le site et le statut social de l'arbre (n=36)

Statut social	Site 1	Site 2	Site 3
Dominant	21,9 a	15,7 a	17,2 a
Codominant	22,3 a	19,8 a	25,6 b
Intermédiaire	19,0 a	23,1 a	17,4 a

Les moyennes dans une colonne suivies de la même lettre ne sont pas significativement différentes à un niveau de probabilité de 0,05%

3.1.3 Distribution verticale du feuillage

D'après les résultats de l'analyse de variance, les proportions de surface foliaire et de poids foliaire sec sont significativement différentes selon la section de houppier en fonction du statut social de l'arbre (annexe 5, tableaux A5-4 et A5-5). L'effet de l'interaction de la section de houppier avec le statut social de l'arbre est hautement significatif ($p < 0,0001$). Au contraire, l'effet du site n'est pas significatif.

Les résultats du test de Duncan sont présentés au tableau 3.3. Les proportions de surface et de poids foliaires sont significativement plus importantes dans le houppier de lumière pour les arbres dominants et codominants. Au contraire, ces proportions sont significativement plus importantes dans le houppier d'ombre pour les arbres intermédiaires.

La compétition entre les cimes peut expliquer les différences observées en ce qui a trait à la distribution verticale du feuillage. En effet, la compétition entre les cimes est plus élevée dans la partie inférieure du houppier, pour les arbres dominants et codominants, et dans la partie supérieure, pour les arbres intermédiaires. C'est pourquoi le feuillage se développe et se concentre davantage dans la partie supérieure du houppier pour les arbres dominants et codominants et dans la partie inférieure pour les arbres intermédiaires.

Tableau 3.3 Résultats du test de Duncan pour la proportion de surface foliaire et de poids foliaire sec avec la section de houppier et le statut social de l'arbre (n=36)

Proportion	Position	Section de houppier	
		<i>ombre</i>	<i>lumière</i>
Surface foliaire	Dominant	0,26 a	0,74 a
	Codominant	0,40 a	0,60 a
	Intermédiaire	0,60 b	0,40 b
Poids foliaire	Dominant	0,26 a	0,75 a
	Codominant	0,41 a	0,60 a
	Intermédiaire	0,59 b	0,41 b

Les moyennes dans une colonne suivies de la même lettre ne sont pas significativement différentes à un niveau de probabilité de 0,05%

Selon Meadows et Hodges (2001), une concentration plus importante du feuillage dans la partie exposée du houppier, chez les arbres dominants et codominants, induit une quantité plus importante de feuilles de lumière. Logiquement, la SFS totale devrait être plus faible pour ces individus. Inversement, une concentration plus importante du feuillage dans la partie ombragée du houppier, chez les arbres intermédiaires, induit une quantité plus importante de feuilles d'ombre. Par suite logique, la SFS totale de ces individus devrait être plus élevée. Cela dit, nous n'avons observé aucune différence significative de la SFS selon le statut social des arbres échantillons, tel qu'indiqué précédemment.

3.1.4 Prédiction des paramètres foliaires

Les résultats des analyses de régression linéaire simple sont présentés au tableau 3.4. Ces analyses révèlent que la surface transversale d'aubier est le meilleur estimateur de la surface et du poids foliaires. En effet, on obtient l'erreur-type résiduelle la plus faible, de même que le coefficient de détermination ajusté le plus élevé, lorsque la surface transversale d'aubier est utilisée pour prédire les paramètres foliaires. Le volume total d'aubier est également un estimateur fiable, tandis que le dhp est clairement l'estimateur le moins précis des trois.

Tableau 3.4 Résultats des analyses de régression linéaire simple pour la surface (SF, m²) et le poids foliaires (PF, kg) avec le dhp (cm), la surface transversale d'aubier à hauteur de poitrine (SA, cm²) et le volume total d'aubier (VA, m³) ($Y = a + bX$) (n=18)

Y	X	a	b	r ² ajusté	e.-t. r.
SF	DHP	-244,40	15,18	0,67	39,29
	SA	-59,82	0,45	0,83	29,00
	VA	-59,58	926,49	0,77	32,86
PF	DHP	-10,31	0,65	0,69	1,63
	SA	-2,42	0,02	0,84	1,18
	VA	-2,45	39,76	0,80	1,32

* e.-t.r. : erreur-type résiduelle (*standard error of the estimate*), en m² pour la surface foliaire et en kg pour le poids foliaire

D'autre part, les modèles de régression non-linéaire simple se sont avérés inadéquats pour prédire les paramètres foliaires. Dans certains cas, la qualité de l'ajustement était inférieure au modèle linéaire et, dans d'autres cas, les coefficients du modèle étaient tous non-significatifs.

Les résultats des analyses de régression linéaire multiple sont présentés au tableau 3.5. L'ajout d'une variable indépendante a permis d'améliorer significativement la précision des modèles linéaires pour prédire la surface et le poids foliaires. Le modèle linéaire multiple utilisant la surface transversale d'aubier comme estimateur principal est à nouveau le plus précis pour prédire les paramètres foliaires, compte tenu de la qualité de son ajustement.

Le pourcentage de lumière directe atteignant le sommet du houppier (M1) est la seule variable significative à entrer dans le modèle linéaire utilisant le dhp comme estimateur principal des paramètres foliaires (tableau 3.5). Pour un dhp donné, si M1 augmente alors la surface et le poids foliaires augmentent également. En effet, plus l'exposition d'un arbre au soleil est importante et plus le développement de la cime est favorisé.

Tableau 3.5 Résultats des analyses de régression linéaire multiple pour la surface (SF, m²) et le poids foliaires (PF, kg) avec le dhp (cm), la surface transversale d'aubier à hauteur de poitrine (SA, cm²) et le volume total d'aubier (VA, m³) ($Y=a+b_1X+ b_2M1+ b_3ICH+ b_4SPH$)* (n=18)

Y	X	a	b1	b2	b3	b4	r ² ajusté	e.-t. r.**
SF	DHP	-487,79	14,95	25,71	n.s.	n.s.	0,76	33,44
	SA	n.s.	0,43	n.s.	-6,75	n.s.	0,89	22,82
	VA	-66,92	663,33	n.s.	n.s.	2,57	0,83	28,49
PF	DHP	-20,63	0,64	1,09	n.s.	n.s.	0,78	1,37
	SA	n.s.	0,02	n.s.	-0,30	n.s.	0,92	0,85
	VA	-2,75	28,96	n.s.	n.s.	0,11	0,85	1,13

* M1 : pourcentage de lumière directe atteignant le sommet du houppier; ICH : indice de compétition de Hegyi; SPH : surface de projection horizontale du houppier (m²)

** e.-t.r. : erreur-type résiduelle (*standard error of the estimate*), en m² pour la surface foliaire et en kg pour le poids foliaire

L'indice de compétition de Hegyi (ICH) est la seule variable significative à entrer dans le modèle linéaire utilisant la surface d'aubier comme estimateur principal des paramètres foliaires (tableau 3.5). Pour une surface d'aubier donnée, si ICH augmente alors la surface et le poids foliaires diminuent. En effet, plus la compétition autour d'un arbre est importante et plus le développement de la cime est limité.

La surface de projection horizontale du houppier (SPH) est la seule variable significative à entrer dans le modèle linéaire utilisant le volume total d'aubier comme estimateur principal des paramètres foliaires (tableau 3.5). Pour un volume d'aubier donné, si SPH augmente alors la surface et le poids foliaires augmentent également. En effet, la variable SPH est une mesure indirecte du feuillage. Elle est d'ailleurs fortement corrélée à la surface foliaire ($r = 0.804^{**}$) et au poids foliaire sec ($r = 0,808^{**}$) des 18 arbres échantillons. C'est pourquoi SPH améliore la précision des estimations du modèle.

En conclusion, les modèles linéaires utilisant la surface transversale d'aubier à hauteur de poitrine sont les plus précis pour prédire les paramètres foliaires. Cependant, l'indice de compétition de Hegyi nécessite un inventaire très long et fastidieux. D'autre part, l'ajout de cette variable n'améliore que légèrement la qualité de l'ajustement des modèles linéaires. Si les ressources sont limitées, nous recommandons l'utilisation des modèles linéaires simples utilisant uniquement la surface d'aubier pour prédire la surface et le poids foliaires par arbre entier. Les relations linéaires entre les paramètres foliaires et la surface transversale d'aubier à hauteur de poitrine sont représentées graphiquement aux figures 3.1 et 3.2.

Pour obtenir des estimations foliaires rapidement et sans mesures destructives, nous recommandons l'utilisation du modèle linéaire multiple utilisant le dhp et le pourcentage de lumière directe atteignant le sommet du houppier. Quelques minutes suffisent pour mesurer ces deux variables sur le terrain et la précision du modèle final pour l'estimation des paramètres foliaires reste acceptable.

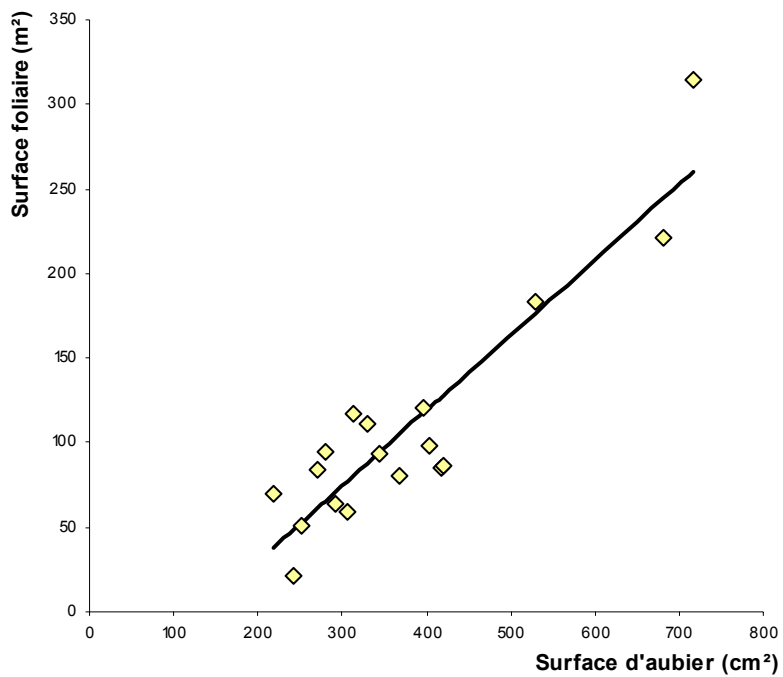


Figure 3.1 Surface foliaire par arbre entier en fonction de la surface transversale d'aubier à hauteur de poitrine (n=18)

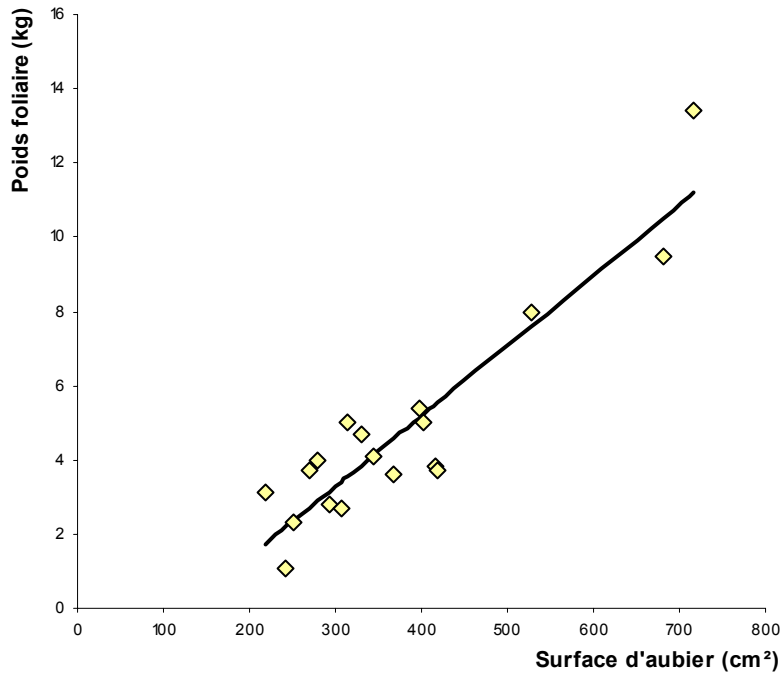


Figure 3.2 Poids foliaire sec par arbre entier en fonction de la surface transversale d'aubier à hauteur de poitrine (n=18)

3.1.5 Ratios « paramètres foliaires / surface d'aubier »

Compte tenu que la surface transversale d'aubier à hauteur de poitrine est la variable indépendante qui explique le mieux les variations de surface et de poids foliaires, nous nous sommes principalement intéressés aux ratios « surface foliaire / surface d'aubier » (SF/SA) et « poids foliaire sec / surface d'aubier » (PF/SA), par arbre entier. Les ratios par arbre entier et les moyennes par site sont résumés à l'annexe 4. Les statistiques descriptives de ces ratios sont présentées au tableau 3.6.

Les analyses de variance ne révèlent aucune différence significative des ratios SF/SA et PF/SA selon le site ou le statut social du houppier (annexe 5, tableaux A5-6 et A5-7). Toutefois, la variabilité est importante à l'intérieur des sites, c'est-à-dire entre les arbres. Nous pouvons supposer que les ratios varient principalement selon les caractéristiques individuelles des arbres échantillonnés. Les moyennes des ratios SF/SA et PF/SA selon le statut social du houppier sont présentées au tableau 3.7.

Tableau 3.6 Statistiques descriptives des ratios « surface foliaire / surface d'aubier » (SF/SA) et « poids foliaire sec / surface d'aubier » (PF/SA) (n=18)

Ratio	moyenne (écart type)	étendue
SF / SA (m ² /cm ²)	0,274 (0,020)	0,089 - 0,439
PF / SA (kg/cm ²)	0,012 (0,001)	0,005 - 0,019

Tableau 3.7 Moyennes des ratios « surface foliaire / surface d'aubier » (SF/SA) et « poids foliaire sec / surface d'aubier » (PF/SA) selon le statut social du houppier (n=18)

Statut social	SF/SA	PF/SA
Dominant	0,328	0,014
Codominant	0,268	0,012
Intermédiaire	0,228	0,010

Selon O'Hara et Valappil (1995), le tissu conducteur d'un arbre sous couvert forestier, en raison d'une demande plus faible en évapotranspiration, peut supporter une quantité plus élevée de feuillage qu'un arbre dominant de la même espèce. Par conséquent, un arbre sous couvert forestier devrait avoir des ratios SF/SA et PF/SA plus élevés qu'un arbre dominant de la même espèce. Bien que logique, cette hypothèse ne semble pas être vérifiable dans notre cas. De même, O'Hara et Valappil (1995) et Meadows et Hodges (2001) n'ont trouvé aucune différence significative des ratios SF/SA et PF/SA selon le statut social de l'arbre. Meadows et Hodges (2001) ont cependant observé des résultats similaires aux nôtres, chez le chêne digité (*Quercus falcata* var. *pagodifolia* Raf.). Bien qu'aucun effet significatif n'ait été observé, les auteurs ont constaté une tendance dans les moyennes vers une diminution des ratios SF/SA et PF/SA avec le statut social de l'arbre.

Les coefficients de corrélation de Pearson, des ratios foliaires en fonction des caractéristiques de l'arbre et de la compétition, sont présentés au tableau 3.8. Selon McDowell et al. (2002), le ratio SF/SA par arbre entier décroît avec l'âge et la hauteur totale de l'arbre en raison d'une diminution de la conductance hydraulique. Toutefois, dans la présente étude, la hauteur totale de l'arbre et le dhp sont significativement et positivement corrélés avec les ratios SF/SA et PF/SA, tandis que les corrélations avec l'âge ne sont pas significatives.

Tableau 3.8 Coefficients de corrélation de Pearson entre les ratios « surface foliaire / surface d'aubier » (SF/SA) et « poids foliaire sec / surface d'aubier » (PF/SA) versus l'âge, le dhp, la hauteur totale et les indices de compétition (n=18)

Variable		SF/SA	PF/SA
Arbre	Âge	0,299 ^{n.s.}	0,338 ^{n.s.}
	Dhp	0,537 *	0,551 *
	hauteur totale	0,511 *	0,542 *
Compétition	hegyi	-0,622 **	-0,673 **
	surface terrière	-0,218 ^{n.s.}	-0,242 ^{n.s.}

** : hautement significatif ($p < 0,01$), * : significatif ($p < 0,05$) et ^{n.s.} : non significatif ($p > 0,05$)

On observe également une corrélation significative et négative entre les ratios SF/SA et PF/SA et l'indice de compétition Hegyi (tableau 3.8). Plus l'indice de compétition de Hegyi est élevé et moins l'arbre produit de feuilles par unité de surface d'aubier. En effet, ce résultat confirme que, peu importe la surface d'aubier, le développement du houppier et de son feuillage est limité par la compétition environnante. D'ailleurs, Keane et Weetman (1986) ont également observé, chez le pin lodgepole (*Pinus contorta* Dougl. ex Loud.), une influence négative de la densité de peuplement sur le ratio SF/SA.

3.2 Probabilité de présence de duramen

La présence observée de duramen, à hauteur de souche et par site de récolte, est résumée au tableau 3.9. Parmi les 150 arbres échantillonnés, seulement 41 bouleaux ont du duramen à hauteur de souche. En outre, la proportion de bouleau avec duramen varie peu d'un site à l'autre.

Suite à la procédure de sélection « *pas-à-pas* », la hauteur totale de l'arbre et le dhp sont les deux seules variables indépendantes à entrer significativement dans le modèle. D'autre part, l'effet de l'interaction « *site*tdhp* » sur le logit de la probabilité de présence de duramen s'est révélé significatif ($p=0,02$) (équation 3.1).

Tableau 3.9 Présence observée de duramen à hauteur de souche par site de récolte (n=150)

Site	fréquence		proportion
	<i>avec duramen</i>	<i>sans duramen</i>	<i>avec duramen</i>
1	16	34	0,32
2	12	38	0,24
3	13	37	0,26
Total	41	109	0,27

$$\text{Logit}(P_{ij}) = \log \left[\frac{P_{ij}}{1 - P_{ij}} \right] = \beta_{0i} + \beta_{1i} Tdhp_{ij} + \beta_2 Ht_{ij} \quad [3.1]$$

Où,

P_{ij} : probabilité de présence de duramen propre à l'arbre «j» du site «i»;

$Tdhp_{ij}$: dhp transformé ($Tdhp = 10^6/dhp^2$) de l'arbre «j» du site «i» (mm^{-2});

Ht_{ij} : hauteur totale de l'arbre «j» du site «i» (m) ;

β_{0i} : intercept propre au site « i »;

β_{1i} : coefficient de la variable $Tdhp_{ij}$;

β_2 : coefficient de la variable Ht_{ij} .

Finalement, le modèle logistique général forme trois équations distinctes, puisque nous avons des coefficients propres à chaque site (β_{0i} et β_{1i}) (équations 3.2, 3.3 et 3.4) :

$$\text{Site 1 : } \quad \text{Logit}(P_{1j}) = 15,51 - 0,37 * Tdhp_{1j} - 0,56 * Ht_{1j} \quad [3.2]$$

$$\text{Site 2 : } \quad \text{Logit}(P_{2j}) = 9,25 - 0,12 * Tdhp_{2j} - 0,56 * Ht_{2j} \quad [3.3]$$

$$\text{Site 3 : } \quad \text{Logit}(P_{3j}) = 13,34 - 0,34 * Tdhp_{3j} - 0,56 * Ht_{3j} \quad [3.4]$$

Ainsi, quelque soit le site et pour une hauteur d'arbre donnée, la probabilité de présence de duramen sera plus élevée pour un arbre avec un plus gros dhp. D'autre part, quelque soit le site et pour un dhp donné, la probabilité de présence de duramen sera plus élevée pour un arbre plus petit. En d'autres mots, la probabilité de présence de duramen est plus élevée pour un arbre à fort défilement que pour un arbre à faible défilement.

De manière générale, plus un arbre est grand et plus il est exposé directement à la lumière du soleil. Par conséquent, dans de telles conditions, l'arbre a besoin d'une quantité maximale d'aubier pour satisfaire une demande élevée en évapotranspiration. Cette

hypothèse permet d'expliquer le fait que la hauteur de l'arbre affecte négativement la probabilité de présence de duramen.

Dans ce modèle, la contribution du dhp au modèle logistique s'est avérée plus significative que celle de l'âge, bien que l'âge d'un arbre soit généralement relié à la formation et au développement du duramen. Il se peut que les différences d'âge, observées pour les 150 arbres échantillons, soient trop faibles pour influencer significativement la probabilité de présence de duramen.

Nous avons déterminé des dhp limites concernant l'effet significatif de l'interaction du site par la variable transformée du dhp (site*dhp) sur le logit de la probabilité de présence de duramen :

Si	$dhp < 186 \text{ mm}$	Il y a un effet significatif de l'interaction
Si	$186 \leq dhp \leq 229 \text{ mm}$	Il n'y a aucun effet significatif de l'interaction
Si	$dhp > 229 \text{ mm}$	Il y a un effet significatif de l'interaction

Les valeurs du logit de la probabilité de présence de duramen, par site de récolte, en fonction du dhp sont représentées graphiquement à la figure 3.3. D'après la figure 3.3, pour des dhp inférieurs à 186 mm, les arbres des sites 1 et 3 sont moins susceptibles d'avoir du duramen que ceux du site 2. Au contraire, pour des diamètres supérieurs à 229 mm, les arbres des sites 1 et 3 sont plus susceptibles d'avoir du duramen que ceux du site 2. L'effet de l'interaction est non-significatif entre 186 et 229 mm.

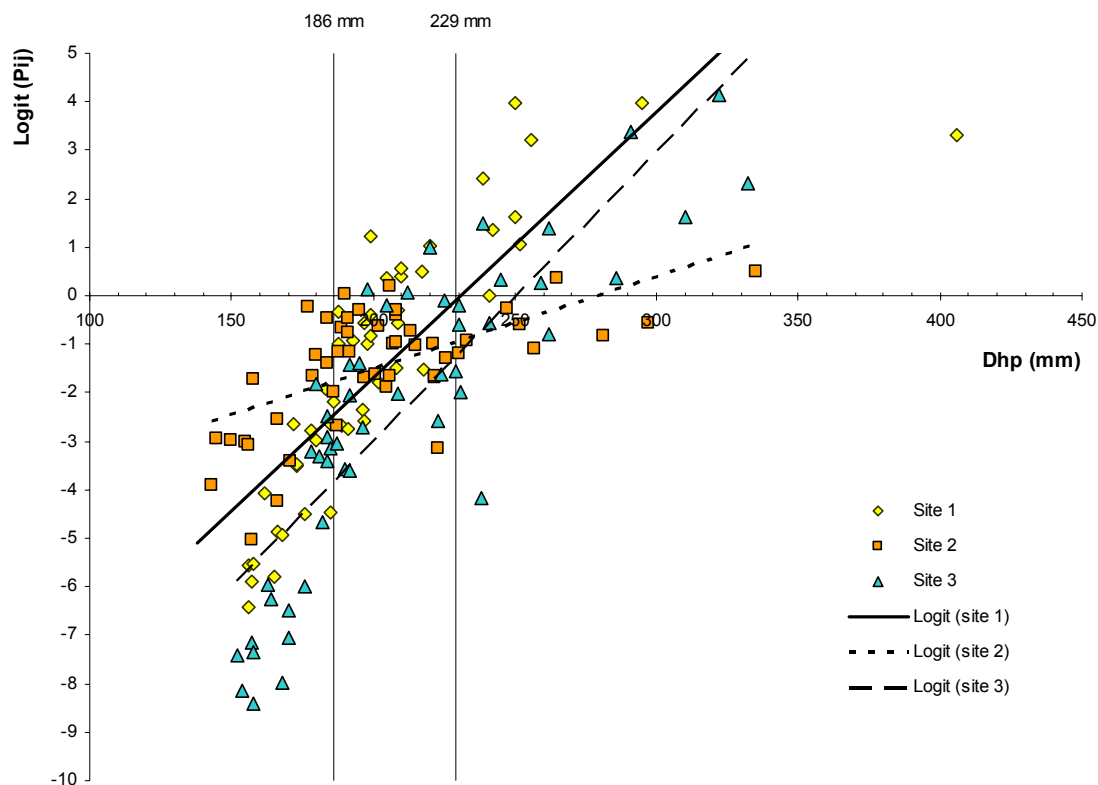


Figure 3.3 Logit de la probabilité de présence de duramen, par site de récolte, en fonction du dhp (n=150)

La table de classification du modèle logistique après validation croisée est présentée au tableau 3.10. Un seuil de classement de 28,8%, après validation croisée, a été choisi de manière à maximiser la sensibilité et la spécificité du modèle. Le modèle de régression logistique a prédit que 59 arbres avaient du duramen sur un total de 150. Ainsi, le taux de bonnes classifications est de 73,4% $(= (80+30)/150)$, tandis que la sensibilité et la spécificité du test sont respectivement de 73,2% $(= 30/41)$ et de 73,4% $(= 80/109)$.

Tableau 3.10 Table de classification du modèle logistique après validation croisée pour un seuil de classement de 28,8% (n=150)

Observées	Prédites		Total
	Absence [0]	Présence [1]	
Absence [0]	80	29	109
Présence [1]	11	30	41
Total	91	59	150

D'après l'analyse logistique, l'aire sous la courbe ROC est de 0,867, ce qui correspond à un excellent niveau de discrimination. Par ailleurs, le test d'adéquation d'Hosmer et Lemeshow est non significatif ($p=0,4611$). Par conséquent, l'ajustement global du modèle aux données est satisfaisant, ce que confirme l'analyse des résidus.

Avec la hauteur totale et le dhp d'un arbre donné, il est donc possible de prédire avec une bonne précision la présence ou l'absence de duramen à hauteur de poitrine.

3.3 Proportions d'aubier et de duramen

3.3.1 Proportions observées d'aubier et de duramen

Les valeurs par arbre entier et les moyennes par site sont résumées à l'annexe 4. Les statistiques descriptives des volumes et des proportions d'aubier, de duramen et d'écorce interne sont présentées aux tableaux 3.11 et 3.12. En moyenne, les volumes d'aubier, de duramen et d'écorce interne sont respectivement de 182, 32 et 23 cm³, tandis que les proportions respectives sont de 78, 12 et 10%.

Tableau 3.11 Statistiques descriptives des volumes d'aubier, de duramen et d'écorce interne (m³) par arbre entier (n=18)

Constituant	moyenne (écart-type)	étendue
Aubier	0,182 (0,066)	0,108 - 0,335
Duramen	0,032 (0,036)	0,006 - 0,134
Écorce interne	0,023 (0,010)	0,011 - 0,057
Total	0,237 (0,097)	0,129 - 0,525

Tableau 3.12 Statistiques descriptives des proportions en volume d'aubier, de duramen et d'écorce interne (%) par arbre entier (n=18)

Constituant	moyenne (écart-type)	étendue
Aubier	78,3 (9,7)	54,5 - 89,3
Duramen	12,0 (9,3)	3,0 - 35,3
Écorce interne	9,9 (1,1)	7,9 - 11,8

Les analyses de variance ne révèlent aucune différence significative des volumes et des proportions d'aubier et de duramen selon le site de récolte et selon le statut social de l'arbre (annexe 5, tableaux A5-8, A5-9, A5-10 et A5-11). Toutefois, la variabilité est importante à l'intérieur des sites, c'est-à-dire entre les arbres. Nous pouvons supposer que les proportions d'aubier et de duramen varient principalement selon les caractéristiques individuelles des arbres échantillonnés.

Les coefficients de corrélation de Pearson des volumes et des proportions d'aubier et de duramen versus les caractéristiques de l'arbre, de la cime et de la compétition, sont présentés au tableau 3.13. Le volume d'aubier par arbre entier est fortement corrélé aux dimensions de l'arbre (dhp, hauteur et volume total), mais aussi à la surface de projection horizontale de la cime. Le volume de duramen par arbre entier est fortement corrélé à l'âge à hauteur de souche et dans une moindre mesure aux dimensions de l'arbre (dhp et volume total).

Tableau 3.13 Coefficients de corrélation de Pearson entre les volumes et les proportions d'aubier et de duramen versus les caractéristiques de l'arbre, de la cime et les indices de compétition (n=18)

Variable	Volume		Proportion de duramen	
	aubier	duramen		
Arbre	Âge	0,462 ^{n.s.}	0,885 ^{**}	0,795 ^{**}
	Dhp	0,842 ^{**}	0,639 ^{**}	0,368 ^{n.s.}
	Hauteur totale	0,576 [*]	0,053 ^{n.s.}	-0,193 ^{n.s.}
	Volume total	0,920 ^{**}	0,739 ^{**}	0,450 ^{n.s.}
Cime	Surface de projection horizontale	0,707 ^{**}	0,440 ^{n.s.}	0,177 ^{n.s.}
	Base de la cime vivante	0,079 ^{n.s.}	0,244 ^{n.s.}	0,215 ^{n.s.}
	Longueur de cime	0,375 ^{n.s.}	-0,129 ^{n.s.}	-0,292 ^{n.s.}
	Lumière directe sur le sommet	0,236 ^{n.s.}	-0,435 ^{n.s.}	-0,624 ^{**}
	Lumière directe sur les côtés	0,090 ^{n.s.}	-0,401 ^{n.s.}	-0,403 ^{n.s.}
	Répartition spatiale	0,416 ^{n.s.}	0,049 ^{n.s.}	-0,120 ^{n.s.}
	Taille relative	0,333 ^{n.s.}	-0,316 ^{n.s.}	-0,497 ^{**}
Compétition	Indice de Hegyi	-0,216 ^{n.s.}	-0,350 ^{n.s.}	-0,272 ^{n.s.}
	Surface terrière locale	0,169 ^{n.s.}	-0,047 ^{n.s.}	-0,147 ^{n.s.}

** : hautement significatif ($p < 0,01$); * : significatif ($p < 0,05$) et ^{n.s.} : non significatif ($p > 0,05$)

Finalement, les proportions d'aubier et de duramen sont corrélées à l'âge de l'arbre, mais aussi à la quantité de lumière directe atteignant le sommet du houppier et à la taille relative de la cime (tableau 3.13).

Les coefficients de corrélation de Pearson des épaisseurs et des proportions d'aubier, de duramen et d'écorce interne, mesurées à hauteur de poitrine, avec les volumes et les proportions respectives par arbre entier, sont présentés aux tableaux 3.14 et 3.15. D'après les résultats obtenus, l'épaisseur de duramen à 130 cm est un excellent estimateur du volume de duramen par arbre entier. Au contraire, les épaisseurs d'aubier et d'écorce interne à 130 cm sont des estimateurs beaucoup moins fiables des volumes de ces constituants par arbre entier.

Tableau 3.14 Coefficients de corrélation de Pearson entre les épaisseurs d'aubier, de duramen et d'écorce interne à 130 cm versus les volumes respectifs par arbre entier (n=18)

Constituant	épaisseur (130 cm)
Aubier	0,594 **
Duramen	0,951 **
Écorce interne	0,755 **

** : hautement significatif ($p < 0,01$); * : significatif ($p < 0,05$) et ^{n.s.} : non significatif ($p > 0,05$)

Tableau 3.15 Coefficients de corrélation de Pearson entre les proportions des épaisseurs d'aubier, de duramen et d'écorce interne à 130 cm versus les proportions respectives en volume par arbre entier (n=18)

Constituant	proportion (130 cm)
Aubier	0,916 **
Duramen	0,930 **
Écorce interne	0,412 ^{n.s.}

** : hautement significatif ($p < 0,01$); * : significatif ($p < 0,05$) et ^{n.s.} : non significatif ($p > 0,05$)

En outre, les proportions des épaisseurs d'aubier et de duramen à 130 cm sont fortement corrélées aux proportions en volume, ce qui n'est pas le cas pour l'écorce interne (tableau 3.15). Finalement, nous recommandons l'utilisation de l'épaisseur et de la proportion de duramen à 130 cm pour évaluer rapidement le volume et la proportion totale de duramen d'un arbre donné.

3.3.2 Prédiction du volume d'aubier

Nous avons construit un modèle de prédiction du volume d'aubier pour les trois sites confondus (équation 3.5). La surface de projection horizontale du houppier (SPH) et la hauteur totale de l'arbre (Ht) sont les deux seules variables indépendantes à entrer significativement dans ce modèle linéaire. L'ordonnée à l'origine est non-significative pour ce modèle.

$$VA = 0,0041 \text{ SPH} + 0,0194 \text{ Ht} \quad (R^2 \text{ ajusté} = 0,618) \quad [3.5]$$

Cette équation explique 62 % de la variation du volume d'aubier par arbre entier : 47% de la variation est expliquée par la surface de projection horizontale du houppier, 15% par la hauteur totale de l'arbre et 38% par le terme d'erreur.

Ces deux variables indépendantes affectent positivement le volume d'aubier par arbre entier. Plus la surface de projection horizontale est grande et plus le volume d'aubier est important, selon le principe du modèle tubulaire de Shinozaki et *al.* (1964). En effet, la surface de projection horizontale est fortement corrélée aux paramètres foliaires des 18 arbres échantillons (tableau 3.5).

Nous avons vu précédemment que la hauteur totale affectait négativement la probabilité de présence de duramen dans un arbre. Nous constatons maintenant que la hauteur totale affecte positivement le volume d'aubier par arbre entier. Ce résultat semble confirmer l'hypothèse selon laquelle la hauteur totale d'un arbre serait reliée à l'exposition de la cime et donc à la demande en évapotranspiration.

3.3.3 Prédiction du volume de duramen

Nous avons construit un modèle de prédiction du volume de duramen pour les trois sites confondus (équation 3.6). L'âge à hauteur de souche (AGE) est la seule variable indépendante à entrer significativement dans ce modèle linéaire.

$$VD = -0,0608 + 0,0015 \text{ AGE} \quad (R^2 \text{ ajusté} = 0,769) \quad [3.6]$$

Cette équation explique 77% de la variation du volume de duramen par arbre entier. Le volume de duramen par arbre entier est donc relié linéairement à l'âge à hauteur de souche. Cette relation linéaire est représentée graphiquement à la figure 3.4.

Dans la présente étude, le volume de duramen augmente avec l'âge de l'arbre. Par extrapolation du modèle (équation 3.6), l'âge d'initiation du duramen est de 41 ans et le taux de duraminisation de 1,5 cm³/année.

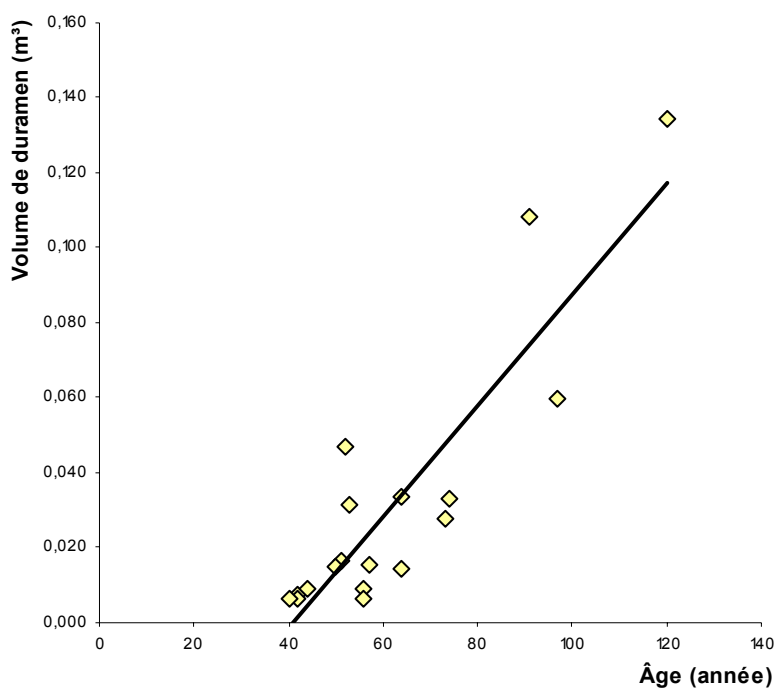


Figure 3.4 Volume de duramen par arbre entier en fonction de l'âge à hauteur de souche (n=18)

La formation et le développement du duramen ont surtout été étudiés chez des espèces résineuses. Plusieurs auteurs ont développé des modèles de régression pour relier l'âge à la quantité de duramen chez le pin (*Pinus* spp.). Les résultats obtenus varient selon l'espèce étudiée et selon l'auteur : de 9 à 38 ans pour l'âge d'initiation et de 0,5 à 1 cerne/année pour le taux de duraminisation (Björklund 1999; Climent *et al.* 2003; Hazenberg et Yang 1991; Mörling et Valinger 1999; Pinto *et al.* 2004).

Ce modèle de prédiction du volume de duramen confirme que le processus de duraminisation est dépendant de l'âge de l'arbre. D'autre part, l'âge d'initiation du duramen et le taux de duraminisation sont des outils additionnels pour décider du moment de la récolte. Ainsi, dans des conditions similaires à notre étude, il serait préférable de récolter les tiges de bouleau à papier avant 41 ans, si l'objectif est de minimiser la proportion de duramen dans le bois récolté.

3.3.4 Prédiction des proportions de duramen et d'aubier

Nous avons construit un modèle de prédiction des proportions de duramen et d'aubier pour les trois sites confondus (équations 3.7 et 3.8). L'âge à hauteur de souche (AGE) et la quantité de lumière directe atteignant le sommet du houppier (M1) sont les deux seules variables indépendantes à entrer significativement dans le modèle linéaire.

$$PD = 0,3895 + 0,0029*AGE - 0,0464*M1 \quad (R^2 \text{ ajusté} = 0,755) \quad [3.7]$$

$$PA = 1 - PD = 0,6105 - 0,0029*AGE + 0,0464*M1 \quad [3.8]$$

Cette équation explique 76 % de la variation des proportions d'aubier (PA) et de duramen (PD) par arbre entier : 61% de la variation est expliquée par la variable AGE, 15% par la variable M1 et 24% par le terme d'erreur.

L'âge de l'arbre affecte positivement la proportion de duramen et négativement la proportion d'aubier. En effet, nous savons que les proportions d'aubier et de duramen dans un arbre dépendent du taux de croissance cambiale et du taux de duraminisation. Or, l'activité cambiale diminue avec le vieillissement de l'arbre contrairement à la croissance du duramen, ce qui explique nos résultats.

Au contraire, la quantité de lumière directe atteignant le sommet du houppier affecte négativement la proportion de duramen et positivement la proportion d'aubier. En effet, on suppose que plus le sommet du houppier est exposée à la lumière directe et plus la proportion d'aubier doit être importante pour satisfaire la demande en évapotranspiration.

3.4 Profil interne des tiges

3.4.1 Formations anormales de duramen

Les profils internes des 18 arbres échantillons sont inclus à l'annexe 6. Chez certains arbres, nous avons pu observer des formations anormales de duramen, ou « *cœur-rouge* », dans la partie supérieure de la tige au niveau du houppier.

Nous savons que la formation du duramen est un processus physiologique relié à l'âge de l'arbre et provoqué par la mort des cellules de parenchyme (Taylor et *al.* 2002). Au contraire, la formation du cœur rouge serait initiée par une entrée d'oxygène dans l'arbre résultant de blessures ou de branches mortes (Knoke 2003; Sachsse 1991; Seeling 1998). Le duramen forme un cône irrégulier mais continu au centre de l'arbre, tandis que le cœur rouge peut former des colonnes discontinues de coloration (Shigo 1983).

D'ailleurs, chez les arbres 90 et 94, on observe une colonne de coloration isolée dans la partie supérieure de l'arbre et bien distincte du duramen (annexe 6, figures A6-10 et A6-11). Chez les arbres 5, 71, 138 et 144, on ne peut dissocier le vrai duramen du cœur rouge, mais on suppose l'existence de ce dernier compte tenu du volume important de duramen dans la partie supérieure de l'arbre correspondant au houppier (annexe 6, figures A6-2, A6-8, A6-17 et A6-18). Sachant que les formations anormales de duramen sont présentes dans la partie supérieure de l'arbre, nous supposons que des branches mortes sont à l'origine de celles-ci.

Dans le but d'étudier la distribution normale du duramen et de l'aubier, nous avons retiré de notre échantillon les arbres 5, 71, 138 et 144, pour lesquels il n'était pas possible de dissocier les deux formations de duramen. Nous avons conservé les arbres 90 et 94, mais nous avons ignoré les colonnes discontinues de duramen situées dans la partie supérieure de l'arbre. Pour la suite de l'étude, nous disposons maintenant de 14 arbres échantillons.

3.4.2 Défilement de l'arbre

La courbe du défilement de l'arbre est présentée à la figure 3.5. La surface transversale totale est maximale à la base de la tige et décroît avec la hauteur de l'arbre. On distingue cependant trois étapes différentes dans la décroissance de la surface transversale totale :

- 1) une diminution rapide de la base de l'arbre jusqu'à une hauteur relative d'environ 9%;
- 2) une diminution très lente jusqu'aux environs de la base de la cime vivante et
- 3) finalement une diminution plus rapide jusqu'au sommet de l'arbre. On explique la première étape de décroissance par l'empatement de l'arbre et la dernière par la présence des branches. La base de la cime vivante est à une hauteur relative moyenne de 37%.

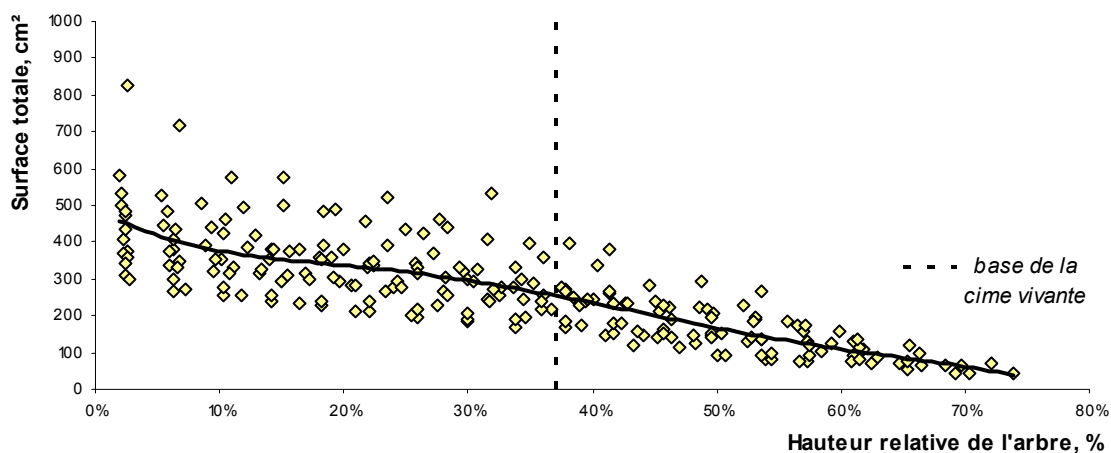


Figure 3.5 Surface transversale totale en fonction de la hauteur relative de l'arbre (n=14)

3.4.3 Défilement de l'aubier

La courbe de défilement de la surface d'aubier est présentée à la figure 3.6. On observe les mêmes tendances que pour le défilement de l'arbre. En effet, la surface d'aubier est maximale à la base de l'arbre et décroît avec la hauteur en suivant les trois étapes de décroissance décrites précédemment. Cependant, la deuxième étape de décroissance semble moins prononcée dans le cas de l'aubier. Par conséquent, en moyenne, les ratios paramètres foliaires sur surface d'aubier devraient être relativement constants de 9% en hauteur relative jusqu'à la base de la cime vivante.

La courbe de défilement de la proportion d'aubier est présentée à la figure 3.7. Cette fois-ci, la proportion d'aubier suit un patron de défilement très différent de celui de l'arbre. On observe néanmoins une diminution rapide de l'aubier à la base de l'arbre. Toutefois, après avoir atteint une valeur minimale, la proportion d'aubier augmente légèrement pour se maintenir à une valeur constante d'environ 90% dans la partie supérieure de l'arbre, où le duramen est absent.

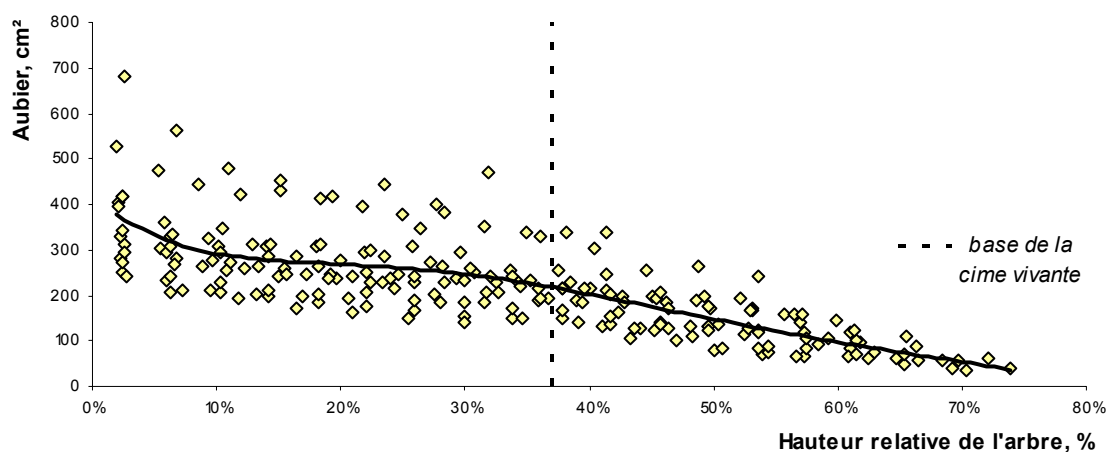


Figure 3.6 Surface d'aubier en fonction de la hauteur relative de l'arbre (n=14)

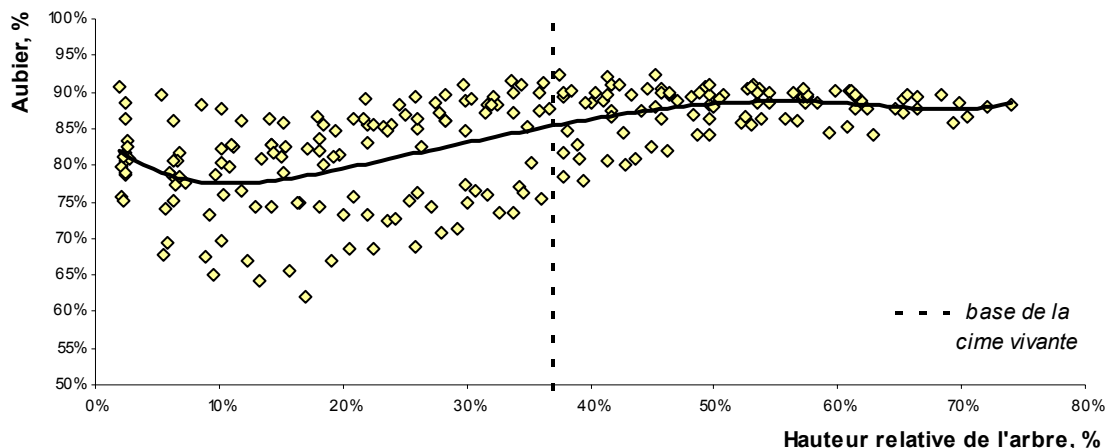


Figure 3.7 Proportion d'aubier en fonction de la hauteur relative de l'arbre (n=14)

3.4.4 Défilement de l'écorce interne

La courbe de défilement de la surface d'écorce interne est présentée à la figure 3.8. La surface d'écorce interne suit le même patron de défilement que l'arbre et la surface d'aubier. La surface est maximale à la base de l'arbre et décroît avec la hauteur en suivant les trois étapes de décroissance décrites précédemment.

La courbe de défilement de la proportion d'écorce interne est présentée à la figure 3.9. La proportion d'écorce interne suit un patron de défilement particulier. En effet, la proportion est constante jusqu'à une hauteur relative de 25%, puis augmente légèrement avec la hauteur de l'arbre.

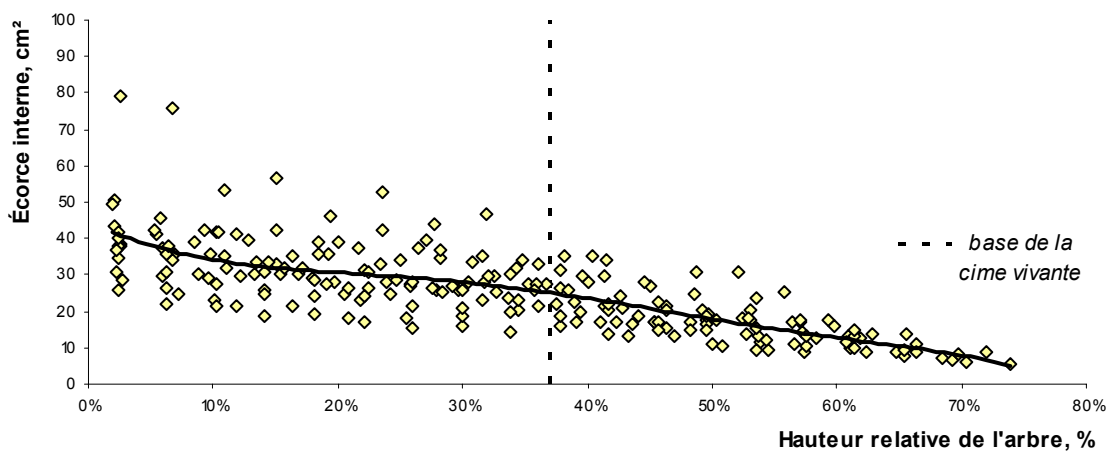


Figure 3.8 Surface d'écorce interne en fonction de la hauteur relative de l'arbre (n=14)

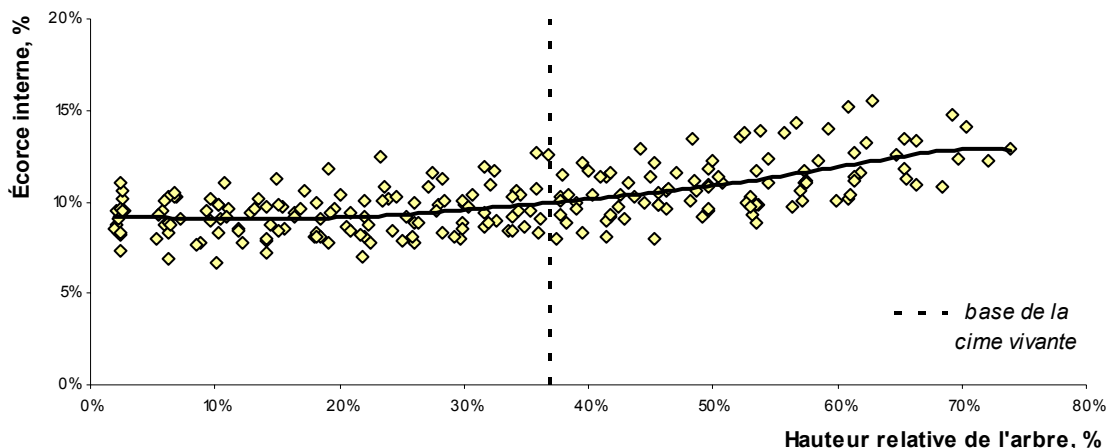


Figure 3.9 Proportion d'écorce interne en fonction de la hauteur relative de l'arbre (n=14)

3.4.5 Défilement du duramen

Les courbes de défilement de la proportion et de la surface de duramen sont présentées aux figures 3.10 et 3.11. Les courbes de défilement de la proportion de duramen par arbre échantillon sont incluses à l'annexe 7.

La surface et la proportion de duramen suivent le même patron de distribution verticale. Celles-ci augmentent jusqu'à une hauteur donnée et diminuent lentement, à vitesse constante, jusqu'aux environs de la moitié de la hauteur de l'arbre.

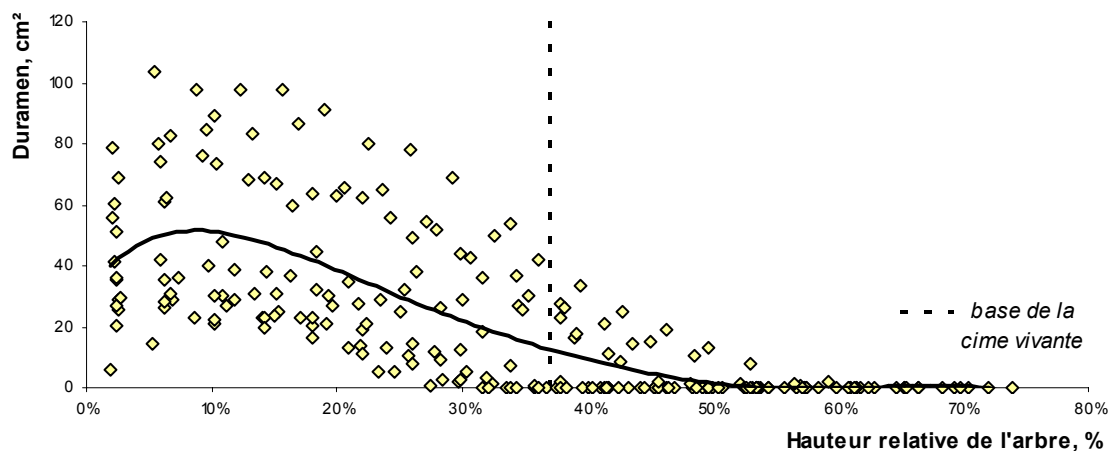


Figure 3.10 Surface de duramen en fonction de la hauteur relative de l'arbre (n=14)

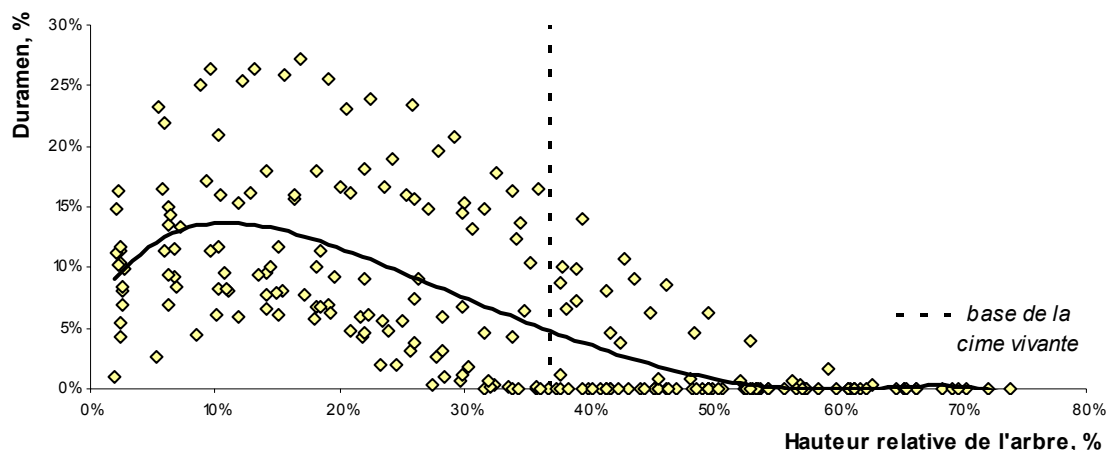


Figure 3.11 Proportion de duramen en fonction de la hauteur relative de l'arbre (n=14)

Nous avons observé un maximum de duramen à une hauteur donnée pour tous les arbres échantillons, à l'exception de l'arbre 99 (annexe 7, figure A7-2). Ce dernier ne présente aucun maximum apparent de duramen. Sa surface et sa proportion de duramen diminuent de façon continue de la base de l'arbre jusqu'à une hauteur d'environ quatre mètres.

Les statistiques descriptives des dimensions du duramen pour les 14 arbres échantillons sont présentées au tableau 3.16. La hauteur du maximum de duramen est située à 9 % de la hauteur de l'arbre. La hauteur totale du duramen correspond à une hauteur d'arbre relative de 41%. Finalement, la proportion maximale de duramen est estimée à 14% de la surface transversale totale.

Tableau 3.16 Statistiques descriptives des dimensions du duramen (n=14)

Dimension	moyenne (écart type)	étendue
Hauteur du maximum de duramen (%)	8,7 (3,3)	5,4 - 18,4
Hauteur totale du duramen (%)	40,6 (8,1)	27,7 - 66,7
Proportion maximale de duramen (%)	14,4 (5,1)	6,7 - 27,2

On n'observe aucune différence significative des dimensions du duramen (hauteur du maximum, hauteur totale et proportion maximale) selon le site de récolte (annexe 5, tableaux A5-12, A5-13 et A5-14). Toutefois, la variabilité est importante à l'intérieur des sites, c'est-à-dire entre les arbres. Nous pouvons supposer que les dimensions du duramen varient principalement selon les caractéristiques individuelles des arbres échantillonnés.

De manière générale, la proportion maximale de duramen est corrélée positivement et significativement à la hauteur totale de duramen ($r = 0,656$; $p = 0,011$). Plus la proportion maximale est importante et plus la hauteur de duramen est élevée. Toutefois, la corrélation n'est pas suffisamment forte pour supposer que le duramen croît à la même vitesse en hauteur et en largeur.

Plusieurs auteurs ont observé, chez le pin, la présence d'un maximum de duramen à une hauteur donnée, sans apporter d'explications pertinentes à ce phénomène (Pinto et *al.* 2004; Climent et *al.* 2003; Stokes et Berthier 2000). Avec cette étude, nous démontrons que l'existence d'un maximum de duramen n'est pas spécifique aux résineux, tel que mentionné par Climent et *al.* (2003), mais que ce phénomène s'applique également à des essences feuillues comme le bouleau à papier.

D'après nos résultats, la hauteur du maximum de duramen semble correspondre à la hauteur maximale de l'effet d'empatement, soit une hauteur relative d'environ 9%. En outre, on observe une augmentation de la surface et de la proportion de duramen, lorsque la surface transversale totale diminue fortement à la base de l'arbre, en raison de l'effet d'empatement.

Cependant, ne disposant de mesures précises de l'empatement des arbres, nous ne pouvons vérifier statistiquement la relation. Toutefois, la forme de l'empatement influence peut-être la distribution verticale du duramen à la base de l'arbre et il serait intéressant de vérifier cette hypothèse. En effet, cela signifierait que la formation et le développement du duramen seraient influencés par le défilement de l'arbre au même titre que la probabilité de présence de duramen.

D'autre part, la hauteur totale du duramen (41%) est proche de la hauteur de la base de la cime vivante (37%). En effet, on peut supposer que la hauteur et la longueur du houppier influencent la distribution verticale du duramen et de l'aubier, que ce soit pour des raisons physiologiques ou mécaniques. Toutefois, nous n'avons obtenu aucune corrélation significative entre la hauteur totale de duramen et la base de la cime vivante, même si les moyennes semblent correspondre.

3.4.6 Distribution verticale du volume de duramen

La distribution verticale du volume de duramen est présentée à la figure 3.12. Les distributions verticales par arbre échantillon sont incluses à l'annexe 8. De manière générale, la quasi-totalité du volume de duramen se situe dans la première partie de la tige, c'est-à-dire à moins de 50% de la hauteur totale de l'arbre.

Bien que la hauteur totale de duramen ne soit pas corrélée à la hauteur de la base de la cime vivante, on constate néanmoins que 95% du volume de duramen se situe sous la base de la cime vivante pour les 14 arbres échantillonnés. Par conséquent, ce résultat laisse suggérer que la hauteur du houppier influence la distribution verticale du duramen, même si cela n'a pu être prouvé statistiquement.

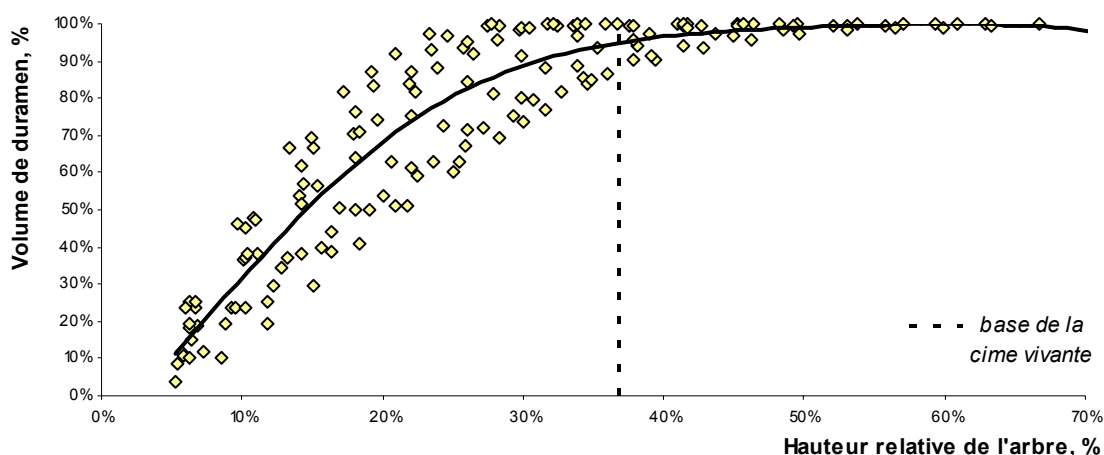


Figure 3.12 Volume cumulé de duramen (%) en fonction de la hauteur relative de l'arbre (%) (n=14)

Nous avons résumé les principaux résultats observés concernant la distribution verticale du duramen à la figure 3.13.

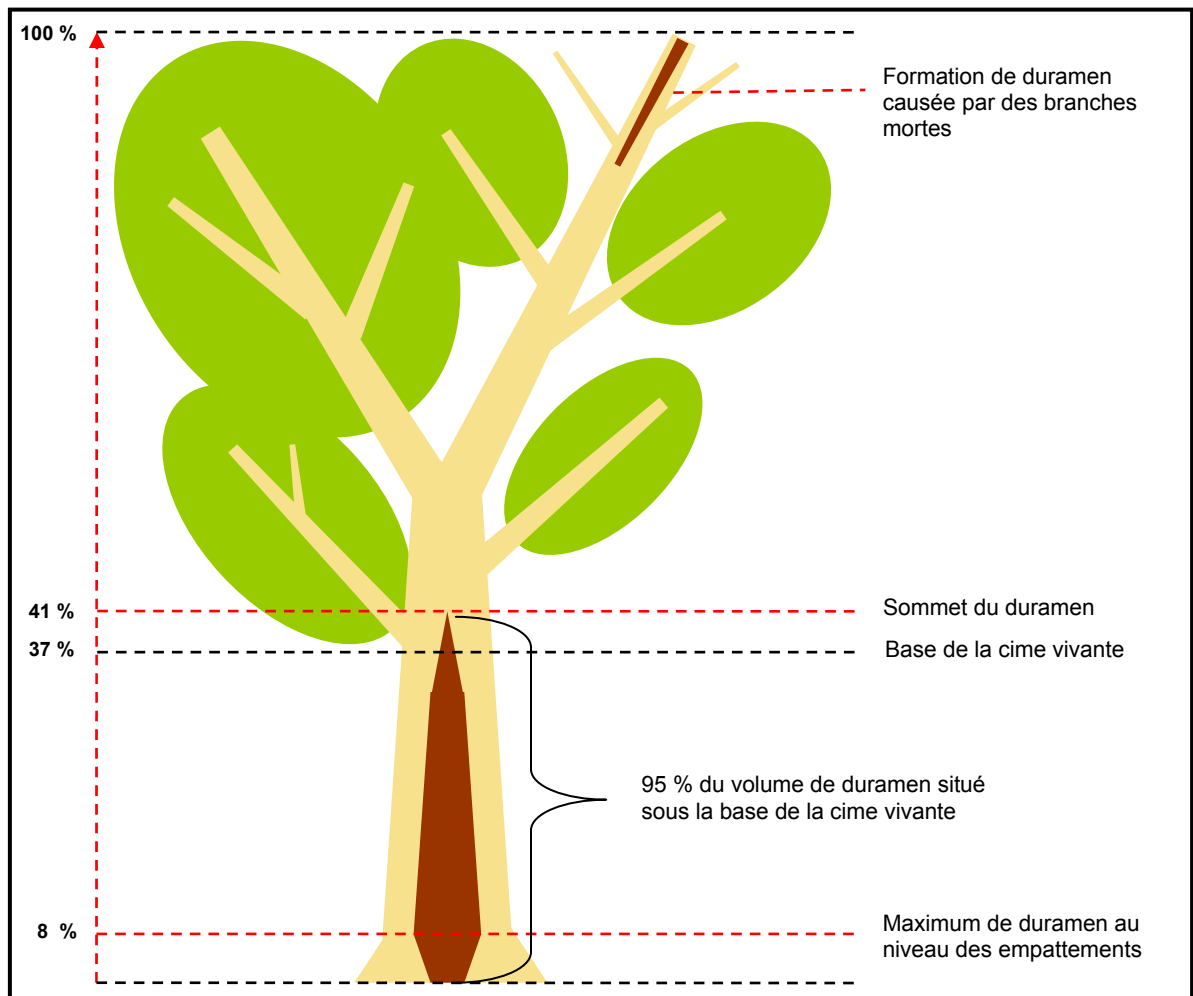


Figure 3.13 Distribution verticale du duramen

CONCLUSIONS

Dans la présente étude, nous avons pu caractériser les proportions de bois d'aubier et de duramen chez le bouleau à papier, en relation avec les caractéristiques du feuillage, de la cime et de l'arbre. Compte tenu des résultats obtenus, il est possible de tirer les conclusions suivantes :

1. La surface foliaire spécifique est plus importante dans le houppier d'ombre (22,0 m²/kg) que dans le houppier de lumière (18,4 m²/kg). On n'observe cependant aucune différence significative de la surface foliaire spécifique selon le statut social de l'arbre.

2. La distribution verticale du feuillage à l'intérieur du houppier diffère significativement selon le statut social de l'arbre. La majorité du feuillage des arbres dominants et codominants est concentrée dans le premier tiers supérieur de la cime, correspondant au houppier de lumière. Au contraire, la majorité du feuillage des arbres intermédiaires est concentrée dans les deux tiers inférieurs de la cime, correspondant au houppier d'ombre.

3. La surface transversale d'aubier à hauteur de poitrine est un meilleur estimateur des paramètres foliaires que le dhp ou le volume d'aubier. Elle est reliée linéairement à la surface foliaire et au poids foliaire sec par arbre entier.

4. Les ratios « paramètres foliaires/surface d'aubier » ne diffèrent pas significativement selon le site de récolte ou selon le statut social de l'arbre. En moyenne, les ratios « surface foliaire/surface d'aubier » et « poids foliaire sec/surface d'aubier » sont respectivement de 0,27 m²/cm² et de 12 g/cm².

5. La probabilité de présence de duramen a été analysée à l'aide d'un modèle de régression logistique utilisant la hauteur totale et le dhp de l'arbre. Le taux de bonnes classifications est de 73%, après validation croisée du modèle par la technique du « *leave-one-out* ». Finalement, la probabilité de présence de duramen est plus élevée pour un arbre à fort défilement que pour un arbre à faible défilement.

6. La formation et le développement du duramen est dépendant de l'âge de l'arbre. En effet, le volume de duramen est relié linéairement à l'âge à hauteur souche. Malgré la taille

réduite de l'échantillon, nous avons estimé l'âge d'initiation du duramen à 41 ans et le taux de duraminisation à 1,5 cm³/année.

7. Avec l'âge à hauteur de souche et la quantité de lumière directe atteignant le sommet du houppier, il est possible de prédire correctement les proportions d'aubier et de duramen dans un arbre. En outre, les proportions des épaisseurs d'aubier et de duramen à hauteur de poitrine sont fortement corrélées aux proportions en volume par arbre entier.

8. On observe, pour nos arbres échantillon, un maximum de duramen à une hauteur donnée dans la tige, comme cela a déjà été observé chez le pin. En moyenne, la hauteur du maximum de duramen et la hauteur totale du duramen sont situées à 9 et 41% de la hauteur totale de l'arbre. Le développement vertical du duramen semble affecté par l'effet d'empatement et par la base de la cime vivante, même si cela n'a pas été vérifié significativement. Néanmoins, en moyenne, 95% du volume de duramen est situé sous la base de la cime vivante.

Cependant, compte tenu de la taille limitée de l'échantillon et des conditions climatiques particulières de la forêt Montmorency, les résultats présentés ci-dessus ne sont valides que pour la région étudiée. D'autre part, certaines analyses de variance n'ont pas permis d'établir de façon positive l'existence d'effets significatifs. Cependant, compte tenu des tendances observées dans les moyennes, il serait intéressant de reprendre ces mêmes analyses avec un plus grand nombre d'échantillons.

Dans un travail futur, il serait pertinent de sélectionner d'autres peuplements afin de vérifier si la qualité de station, les conditions climatiques et la situation géographique peuvent affecter l'âge d'initiation du duramen, le taux de duraminisation et, finalement, les proportions de bois d'aubier et de duramen chez le bouleau à papier à un âge donné.

D'autre part, dans une perspective d'aménagement intensif ou d'amélioration de la qualité des tiges et du bois, il faudrait également vérifier si les pratiques sylvicoles (fertilisation, élagage, éclaircie et autres), et indirectement le taux de croissance, peuvent également affecter les proportions de bois d'aubier et de duramen chez le bouleau à papier à un âge donné.

BIBLIOGRAPHIE

- ANONYME. 2005. Le bouleau, vedette de nos forêts, chronique publiée dans *le Monde forestier*, septembre 2003. Groupe Transforêt Inc. [En ligne].
<http://www.transforet.com/chroniques/bouleau.html> (page consultée en mars 2005)
- ANONYME. 2004. Potentiel de transformation du bouleau à papier et du peuplier faux-tremble, présentation dans *Colloque sur la ressource feuillue de la côte nord, perspectives d'avenir*. Tecsalt, Forestville, 22 avril 2004.
- AFMQ (Association des fabricants de meubles du Québec). 2004. L'approvisionnement en bois feuillus des secteurs industriels québécois – où la nécessité d'optimiser davantage les ressources disponibles. Rapport final présenté à la Commission Coulombe le 17 septembre 2004. 49 p.
- ALLEN, E. 1996. Decay and wood utilization problems in red alder and paper birch, pp.139-146, dans *Ecology and management of B.C. Hardwoods*. Workshop Proceedings, December 1 and 2, 1993, Richmond, B.C. October 1996, FRDA Report No. 255. 246 p.
- ASHTON, P.M.S., OLANDER, L.P., BERLYN, G.P., THADANI, R. et I.R. CAMERON. 1998. Changes in leaf structure in relation to crown position and tree size of *Betula papyrifera* within fire-origin stands of interior cedar-hemlock. *Can. Journ. Bot.* (76): 1180-1187.
- BARRY, R., BERNIER, P., PLAMONDON, A.P., PRÉVOST, M., STEIN, J. et F. TROTTIER. 1996. Évapotranspiration et écoulement estival et annuel, p. 304, dans *Manuel de foresterie, chapitre Hydrologie forestière et aménagement du bassin hydrographique*. Ordre des ingénieurs forestiers du Québec, Les Presses de l'Université Laval, Québec, QC. 1428 p.
- BASHAM, J.T. 1991. Hardwoods - White Birch, pp. 36-37, dans *Stem decay in living trees in Ontario's forests : a users' compendium and guide*. Forestry Canada, Ontario region, Great Lakes Forestry Centre. Information report O-X-408. 64 p.
- 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. Service canadien des forêts, publication 1072. 69 p.
- BENABDALLAH, B. 1996. Structure de la matière ligneuse, pp. 1276-1311, dans *Manuel de foresterie*. Ordre des ingénieurs forestiers du Québec, Les Presses de l'Université Laval, Québec, QC. 1428 p.
- BERGSTROM, B. 2000. Aspects on heartwood formation in Scots pine. Ph.D. thesis. *Acta Univ. Agric. Suecia Silvestria*. 129 p.

- BJÖRKLUND, L. 1999. Identifying heartwood-rich stands or stems of *Pinus sylvestris* by using inventory data. *Silva Fenn.* (33) : 119-129.
- BLANCHET, P. 2004 [a]. Caractérisation du comportement des lames de plancher d'ingénierie. Thèse (PhD.), Université Laval, département du bois et de la forêt. [En ligne]. <http://www.theses.ulaval.ca/2004/21731/21731.pdf> (page consultée en avril 2005). 116 p.
- BLANCHET, P. 2004 [b]. Utilisation du bouleau : produits potentiels et marchés, présentation dans *Colloque sur la ressource feuillue de la côte nord, perspectives d'avenir*. Forintek Canada Corp. Forestville, 22 avril 2004.
- BRIÈRE, J. 1992. Critères techniques d'utilisation du bouleau blanc. Thèse (M.Sc.), Université Laval. 88 p.
- CCB (Conseil canadien du bois). Bois en placage stratifié (LVL) : Introduction. [En ligne]. <http://www.cwc.ca/products/EWP/LVL/introduction.php?lang=fr> (page consultée en avril 2005).
- CÉGFPQ (commission d'études sur la gestion de la forêt publique québécoise). 2004. Sylviculture et gestion de la matière ligneuse : des axes de changement, chapitre 6, et Superficiés, possibilité ligneuse et ratios possibilité/superficie, annexe 4, dans *Rapport final*. 307 p.
- CLIMENT, J., CHAMBEL, M.R., GIL, L. et J. PARDOS. 2003. Vertical heartwood variation patterns and prediction of heartwood volume in *Pinus canariensis* SM. *For. Ecol. Manage.* (174) : 203-211.
- CLIMENT, J., CHAMBEL, M.R., PEREZ, E. et J. PARDOS. 2002. Relationship between heartwood radius and early radial growth, tree age, and climate in *Pinus canariensis*. *Can. J. For. Res.* (32) : 103-111.
- CLIMENT, J., GIL, L. et J. PARDOS. 1993. Heartwood and sapwood development and its relationship to growth and environment in *Pinus canariensis*. *For. Ecol. Manage.* (59) : 165-174.
- CLOUTIER, A. 2005 [a]. Anatomie et structure du bois. Documents de laboratoire. Université Laval, Québec, QC. 49 p.
- CLOUTIER, A. 2005 [b]. Anatomie et structure du bois. Notes de cours. Université Laval, Québec, QC. 166 p.
- DE GRANDPRÉ, L., BERGERON, Y., BÉLANGER, L. et G. LESSARD. 1996. Domaine de la sapinière à bouleau blanc. pp. 208-221, dans *Manuel de foresterie*, chapitre *Écologie forestière*. Ordre des ingénieurs forestiers du Québec, Les Presses de l'Université Laval, Québec, QC. 1428 p.

- DE KORT, I. 1993. Relationships between sapwood amount, latewood percentage, moisture content and crown vitality of Douglas fir (*Pseudotsuga menziesii*). IAWA J. 14(4): 413-427.
- DUCHESNE, I. et RANCOURT, V. 2005. Towards an increased and optimised utilization of White Birch across Canada – Literature review and recommendations for future research. Valeur au bois No. FCC 28. Forintek Canada Corp. 48 p.
- DUCHESNE, T. 2004. Théorie et applications des méthodes de régression. Notes de cours. Université Laval, Québec, QC. 158 p.
- FAO (Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture). Situation des forêts du monde 2005. [En ligne]. www.fao.org/forestry/site/21407/fr (page consultée en avril 2005).
- FARRAR, J.L. 1996. Bouleau blanc, pp.282-285, dans *Les arbres du Canada*. Service canadien des forêts, Ressources Naturelles Canada. Ottawa, ON. 502 p.
- FNAEC (Flora of North America Editorial Committee). Betulaceae, dans *Flora of North America, North of Mexico*, volume 3 : *Magnoliophyta: Magnoliidae and Hamamelidae*. [En ligne]. <http://www.efloras.org> (page consultée en mars 2005).
- GARTNER, B.L. 2002. Sapwood and inner bark quantities in relation to leaf area and wood density in Douglas-fir. IAWA J. (23) ; 267-285.
- GIGUÈRE, M. 1998. Guide du sciage des billons de feuillus durs. Ministère des Ressources naturelles et de la Faune, Direction du développement de l'industrie des produits forestiers. 22 p.
- GODBOUT, C. 2002. Le problème de l'éclaircie commerciale des bétulaies blanches de 60 ans et plus. Revue de littérature. Ministère des Ressources naturelles et de la Faune du Québec, Direction de la recherche forestière. Note de recherche forestière n° 115, 12 p.
- GOULET, M., LAFORÊT, P., DEFO, M. et R. HERNANDEZ. 2003. Physique du bois. Notes de cours. Université Laval, Québec, QC. 147 p.
- HARDWOOD REVIEW. 2005. Weekly hardwood review, Northern prices. Édition du 11 mars 2005. 11 p.
- HAZENBERG, H. et K.C. YANG. 1991a. The relationship of tree age with sapwood and heartwood width in black spruce, *Picea mariana* (Mill.) B.S.P. *Holzforchung* (45) : 317-320.
- HAZENBERG, H. et K.C. YANG. 1991b. Sapwood/heartwood width relationships with tree age in balsam fir. IAWA Bulletin n.s. (12) : 95-99.

- HEGYI, F. 1974. A simulation model for managing jack-pine stands, pp. 74-90, dans *Growth models for tree and stand simulation*. Royal College of Forestry, Stockholm, Suède.
- HIGUCHI, R. 1997. Biochemistry and molecular biology of wood. Springer-Verlag, New York, NY. 362 p.
- HILLIS, W.E. 1987. Heartwood and tree exudates. Springer-Verlag, Berlin, New York.
- HOLMES, M.J. et D.D., REED. 1991. Competition indices for mixed species northern hardwoods. *Forest Sci.* 37: 1338-1349.
- HOSMER, D. et S., LEMESHOW. 2000. Applied Logistic Regression, 2nd Ed, A Wiley-Interscience Publication, John Wiley & Sons Inc., New York, NY, 2000.
- HYVARINEN, M. 1968. Paper birch. It's characteristics, properties and uses. USDA, Forest Service, Research Paper NC-22. North Central Forest Experiment Station, St. Paul, MN. 12 p.
- INDUSTRIE CANADA. 2000. Cartes routières technologiques: Bois de sciage et produits à valeur ajoutée. [En ligne]. <http://strategis.ic.gc.ca/epic/internet/infif.nsf/fr/fb01315f.html> (page consultée en mars 2005).
- IWPA (International Wood Products Association). 2000. Product Standard for Imported Wood Veneer and Platforms (IHPA-2000). 16 p.
- JANE, F.W. 1970. The structure of wood. 2e édition. Adam et Charles Black, Londres. 478 p.
- JESSOME, A.P. 1977. Résistance et propriétés connexes des bois indigènes au Canada. Forintek Canada corp., Publication SP-514F. 37 p.
- KAUFMANN, M.R. et R.K., WATKINS. 1990. Characteristics of high- and low-vigor lodgepole pine trees in old-growth stands. *Tree Physiol.* (7) : 239-246.
- KEANE, M.G. et G.F., WEETMAN. 1986. Leaf area – sapwood cross-sectional area relationship in repressed stands of lodgepole pine. *Can. J. For. Res.* (17) : 205-209.
- KNOKE, T. 2003. Predicting red heartwood formation in beech trees (*Fagus sylvatica* L.). *Ecol. Model.* (169) : 295-312.
- KNOKE, T. 2002. Value of complete information on red heartwood formation in beech (*Fagus sylvatica*). *Silva Fenn.*, 36(4) : 841-851.
- LACHANCE, D., 1996. Les dépérissements, pp. 1061-1065, dans *Manuel de foresterie*, chapitre *pathologie forestière*. Ordre des ingénieurs forestiers du Québec, Les Presses de l'Université Laval, Québec, QC. 1428 p.

- LANGSTROM, B. et C. HELLQVIST. 1991. Effects of different pruning regimes on growth and sapwood area of Scot pine. *For. Ecol. Manage.* (44) : 239-254.
- LAPOINTE, M. 2004. Évaluation de l'acceptation des marques de caractère du bouleau blanc dans la chaîne de distribution des produits d'apparence. Thèse (M.Sc.), Université Laval. 100 p.
- LEGAULT, I., BLOUIN, D. et G. LESSARD. 2004. Plan d'action pour l'aménagement des pratiques de jardinage - Document d'accompagnement pour le programme de mise à niveau de la formation des marteleurs. CERFO, publication 2004-8390. 209 p.
- LEMAIRE, J., ANDRÉ, P. et P., BALLEUX. 1999. Les bouleaux : feuillus précieux inconnus ! *Forêt wallonne* (44) : 9-19.
- MARIE-VICTORIN, C.K. 1995. Bétulacées, pp. 148-150, dans *Flore laurentienne*. 3^{ième} éd., mise à jour et annotée par Luc Brouillet et Isabelle Goulet. Presses de l'Université de Montréal, Montréal., QC. 1083p.
- MARQUIS, D.A., SOLOMON, D.S. et J.C. BJORKBOM. 1969. A silvicultural guide for paper birch in the Northeast. USDA Forest Service, Research Paper NE-130. Northeastern Forest Experiment Station, Upper Darby, PA. 47 p.
- MARGOLIS, H.A., GAGNON, R.R., POTHIER, D. et M. PINEAU. 1988. The adjustment of growth, sapwood area, heartwood area, and sapwood saturated permeability of balsam fir after different intensities of pruning. *Can. J. For. Res.* (18) : 723-727.
- MEADOWS, J.S., BURKHARDT, E.C., JOHNSON, R.L., et J.D. HODGES. 2001. A numerical rating system for crown classes of southern hardwoods. *South. J. Appl. For.* (25): 154-158.
- MEADOWS, J.S. et J.D. HODGES. 2002. Sapwood area as an estimator of leaf area and foliar weight in cherrybark oak and green ash. *Forest Sci.* (48) : 69-76.
- MCDOWELL, N., BARNARD, H., BOND, B.J., HINKLEY, T., HUBBARD, R.M., ISHII, H., KÖSTNER, B., MAGNANI, F., MARSHALL, J.D., MEINZER, F.C., PHILLIPS, N., RYAN, M.G. ET D. WHITEHEAD. 2002. The relationship between tree height and leaf area: sapwood area ratio. *Oecol.* (132) : 12-10.
- McLAUGHLIN, J. 2000. Pathological effects and management implications, pp.19-20, dans *Proceedings for the Ecology and Management of White Birch Workshop, September 21 and 22, 1999*. Wawa, ON. NEST Workshop Proceedings WP-003. 67 p.
- MÖRLING, T. et E. VALINGER. 1999. Effects of fertilization and thinning on heartwood area, sapwood area and growth in Scots pine. *Scan. J. For. Res.* (14) : 462-469.

- MRNFQ [a] (Ministère des Ressources naturelles et de la Faune du Québec). Notes destinées au personnel enseignant. L'Écho de la forêt. Octobre 2001. [En ligne]. http://www.mrn.gouv.qc.ca/forets/echo-foret/octobre2001/feuillelet/savoir_iden_arbres.htm (page consultée en mars 2005).
- MRNFQ [b] (Ministère des Ressources naturelles et de la Faune du Québec). Ressources et industries forestières – Portrait statistique édition 2003. [En ligne]. <http://www.mrnfp.gouv.qc.ca/forets/connaissances/connaissances-statistiques-complete.jsp#0> (page consultée en mars 2005).
- MRNFQ [c] (Ministère des Ressources naturelles et de la Faune du Québec). Synthèse des possibilités et des attributions par aire commune. [En ligne]. <http://www.mrn.gouv.qc.ca/forets/amenagement/amenagement-planification-droits-CAAF-synthese.jsp> (page consultée en mars 2005).
- MRNFQ [d] (Ministère des Ressources naturelles et de la Faune du Québec). 2005. Volumes récoltés de bouleau à papier pour l'exercice 2004-2005. Données provenant de la Direction de l'assistance technique, division du mesurage et de la facturation.
- MRNFQ [e] (Ministère des Ressources naturelles et de la Faune du Québec). Zones de végétation et domaines bioclimatiques du Québec. [En ligne]. <http://www.mrn.gouv.qc.ca/forets/connaissances/connaissances-inventaire-zones.jsp> (page consultée en mars 2005).
- MRNFQ [a] (Ministère des Ressources naturelles et de la Faune du Québec). 2003. Manuel d'aménagement forestier. 4^{ième} édition. Direction de la planification et des communications. 245 p.
- MRNFQ [b] (Ministère des Ressources naturelles et de la Faune du Québec). 2003. Profil des produits forestiers – Deuxième transformation. Approvisionnement en bois massif pour l'industrie québécoise du meuble. Direction du développement de l'industrie des produits forestiers. 48 p.
- MRNFQ [a] (Ministère des Ressources naturelles et de la Faune du Québec). 2002. Classification des tiges d'essences feuillues : normes techniques. Direction de la planification et des communications. 73 p.
- MRNFQ [b] (Ministère des Ressources naturelles et de la Faune du Québec). 2002. Plan d'action pour l'aménagement des forêts feuillues du domaine de l'État. Direction de la planification et des communications. 7 p.
- MRNFQ [c] (Ministère des Ressources naturelles et de la Faune du Québec). 2002. Profil des produits forestiers – Première transformation. Bois de sciage de feuillus durs. Direction du développement de l'industrie et des produits forestiers. 57 p.

- MRNFQ (Ministère des Ressources naturelles et de la Faune du Québec). 2000. Répertoire des fabricants québécois de bois de sciage non conventionnel de feuillus durs. Direction du développement de l'industrie des produits forestiers. 42 p.
- NAIR, M.N.B. 1999. Sapwood and heartwood, pp. 149-172 *dans* M. Iqbal, ed Encyclopedia of plant physiology – the cambial derivatives. Vol. IX, Part. 4. Gebrüden Borntrager, Berlin. 363 p.
- NHLA (National Hardwood Lumber Association). 2003. Règles régissant le mesurage et l'inspection des bois durs et le code national régissant la vente des bois durs, janvier 2003. NHLA, Memphis, TE. 72 p.
- NOBUCHI, T., SATO, T., IWATA, R. et H. HARADA. 1984. Season of heartwood formation and related cytological structure of ray parenchyma cells in *Robinia Pseudoacacia*. Mokuzai Gakkaishi (J. Jpn Wood Res. Soc.). (30): 628-636.
- O'HARA, K.L. et N.I., VALAPPIL. 1995. Sapwood-leaf area prediction equations for multi-aged ponderosa pine stands in western Montana and central Oregon. Can. J. For. Res. (25): 1553-1557.
- OQLF (Office québécois de la langue française). Grand dictionnaire terminologique. [En ligne]. <http://www.granddictionnaire.com> (page consultée en mars et avril 2005).
- O'NEAL, D.D., HOUSTON, A.E., BUCKNER, E.R., MEADOWS, J.S. et M.B., EDWARDS. 1995. An index of competition based on relative crown position and size. USDA, Forest Service, General Technical Report, (SRS-1). Southern Research Station, Asheville, NC. p. 172-175.
- OZARSKA, B. 1999. A review of the utilization of hardwoods for LVL. Wood Sci. Techn. (33) : 341-351.
- PANSHIN, A.I. et C. DE ZEEUW. 1980. Textbook of wood technology: structure identification, properties and uses of the commercial woods of the United States and Canada. 4e édition, McGraw-Hill, New York, NY. 722 p.
- PERRON, J.-Y. et P. MORIN. 2002. Normes d'inventaire forestier : placettes-échantillons permanentes. Ministère des Ressources naturelles et de la Faune du Québec, Direction des inventaires forestiers. 235 p.
- PERRON, J.-Y., 1996. Inventaire forestier, pp. 390-473, dans *Manuel de foresterie*. Ordre des ingénieurs forestiers du Québec, Les Presses de l'Université Laval, Québec, QC. 1428 p.
- PINTO, I., PEREIRA, H. et USENIUS, A. 2004. Heartwood and sapwood development within maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.) stems. Trees, (18):284-294.

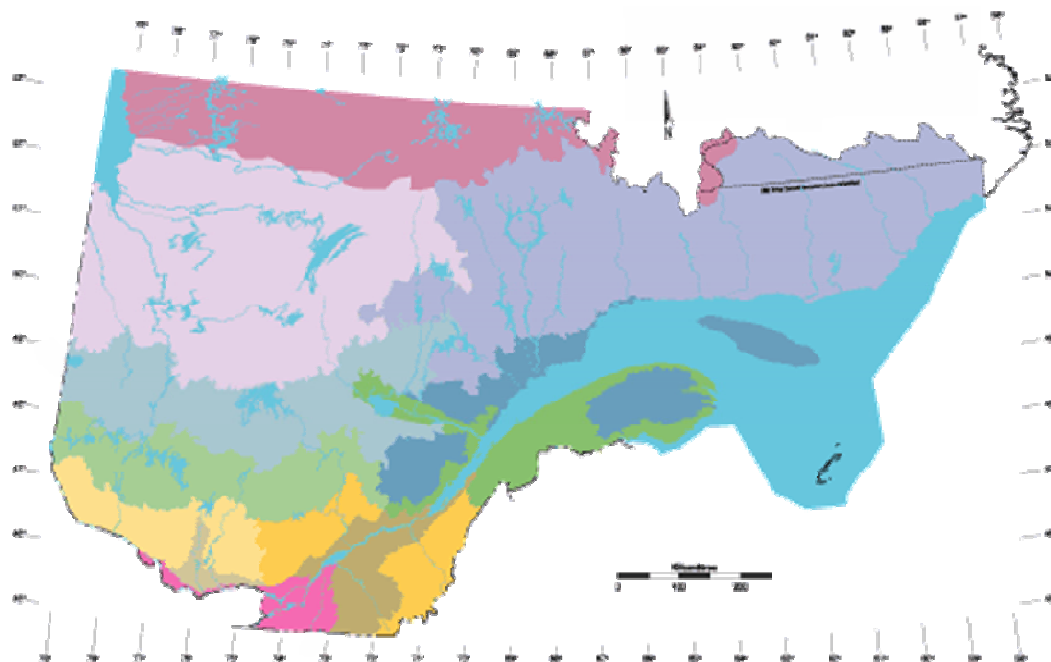
- POTHIER, D. et F., SAVARD. 1998. Actualisation des tables de production pour les principales espèces forestières du Québec. Ministère des Ressources naturelles et de la Faune, Direction de la recherche forestière. 183 pp.
- PLOMION, C., LEPROVOST, G. et A. STOKES. 2001. Wood formation in trees. *Plant Physiol.* 127 : 1513-1523.
- PUTTONEN, P. 1996. Birch management in Finland, pp.177-187, dans *Ecology and management of B.C. Hardwoods*. Workshop Proceedings, December 1 and 2, 1993, Richmond, B.C. October 1996, FRDA Report No. 255. 246 p.
- Q-WEB (Bureau de promotion des produits forestiers du Québec). Informations techniques – Essences feuillues. [En ligne]. <http://quebecwoodexport.com/indexfr.htm> (page consultée en mars 2005).
- RIOUX, D., 1996. Les colorations et les caries des arbres, pp. 1067-1069, dans *Manuel de foresterie*, chapitre *pathologie forestière*. Ordre des ingénieurs forestiers du Québec, Les Presses de l'Université Laval, Québec, QC. 1428 p.
- RITCHIE, G. 1996. Arbres de la connaissance. Un guide sur les arbres des maritimes. Service canadien des forêts, Centre de foresterie de l'Atlantique. [En ligne]. <http://www.atl.cfs.nrcan.gc.ca/index-f/what-f/publications-f/afcpublications-f/maritimetreestrees-f/maritimetreestrees-f.html> (page consultée en avril 2005)
- RNCan [a] (Ressources naturelles Canada). Insectes et maladies des forêts de l'est du Canada. Bouleau (*Betula spp.*). [En ligne]. <http://www.cfl.scf.nrcan.gc.ca/collections-cfl/arbreshotes/feuillus/bouleau.html> (page consultée en mars 2005).
- RNCan [b] (Ressources naturelles Canada). L'inventaire forestier du Canada 2001. [En ligne]. http://nfi.cfs.nrcan.gc.ca/canfi/data/index_f.html (page consultée en mars 2005).
- SACHSSE, H. 1991. Kerntypen der Rotbuche. *Forstarchiv.* (62) : 238-242.
- SAFFORD, L.O., Bjorkbom, J.C. et J.C. Zasada. 1990. *Betula Papyrifera* Marsh. – Paper Birch, pp. 158-171, dans R.M. Burns et B.H. Honkala. 1990. *Silvics of North America*, Vol. 2, *Hardwoods*. USDA, Forest Service, Agriculture Handbook 654. Washington, DC. 877 p.
- SAS Institute Inc. 2004. SAS OnlineDoc® 9.1.3. Cary, N.C.
- SCHÜTZ, J.P. 1990. Sylviculture 1. Principes d'éducation des forêts. Presses polytechniques et universitaires romandes. Lausanne, Suisse. 243 p.
- SEELING, U. 1998. Kerntypen im Holz-konsequenzen für die Verwertung am Beispiel der Buche (*Fagus sylvatica L.*). *J. For. Suisse.* (149) : 991-1004.

- SELLIN, A. 1996. Sapwood amount in *Picea abies* (L.) Karst. Determined by tree age and radial growth rate. *Holzforschung* (50): 291-296.
- SELLIN, A. 1994. Sapwood-heartwood proportion related to tree diameter, age, and growth rate in *Picea abies*. *Can. J. For. Res.* (24): 1022-1028.
- SELLIN, A. 1991. Variation in sapwood thickness of *Picea abies* in Estonia depending on the tree age. *Scand. J. For. Res.* (6): 463-469.
- SHIGO, A.L. 1984. Compartmentalization : A conceptual framework for understanding how trees grow and defend themselves. *Ann. Rev. Phytopathol.* (22) : 189-214.
- SHIGO, A.L. 1983. Tree defects: a photo guide. USDA, Forest Service, General Technical Report NE-82. Northeastern Research Station, Princeton, WV. 167 p.
- SHIGO, A.L. et H.G. MARX. 1977. Compartmentalization of decay in trees. USDA, Forest Service, Agriculture Information Bulletin, NE-405. Northeastern Research Station, Princeton, WV., 73 p.
- SHIGO, A.L. et W.E. HILLIS. 1973. Heartwood, discolored wood and microorganisms in living trees. *Ann. Rev. Phytopathol.* (11) : 197-222.
- SHINOZAKI, K., YODA, K., HOZUMI, K. et T. KIRA. 1964. A quantitative analysis of plant form. the pipe model theory, I. Basic analysis. *Jpn. J. Ecol.* (14): 97-105.
- SOKAL, R.R. et F.J. ROHLF. 1995. Biometry: the principles and practice of statistics in biological research. 3rd edition. W. H. Freeman and Co. New York, NY. 887 p.
- SOLOMON, J.D. 1995. Guide to insect borers in North American broadleaf trees and shrubs. USDA, Forest Service, Agriculture Handbook 706. Washington, DC. 212 p.
- STEVANOVIC-JANESIC, T. 2004. Chimie du bois. Notes de cours. Université Laval, Québec, QC. 139 p.
- STONE, M. 1974. Cross-validatory choice and assessment of statistical predictions. *J. Royal Stat. Soc.* 36 (2): 111-147.
- TAYLOR, A.M., GARTNER, B.L. et J.J. MORRELL. 2002. Heartwood formation and natural durability – a review. *Wood Fib. Sci.* 34(4): 587-611.
- TREMBLAY, V. 1999. Dendroécologie du dépérissement du bouleau blanc (*Betula papyrifera* Marsh.) après coupe forestière dans la réserve faunique des Laurentides. Thèse (M.Sc.), Université Laval. 58 p.
- USDA (United States Department of Agriculture). Natural Resources Conservation Service. *Betula papyrifera* Marsh, dans *The PLANTS Database*, Version 3.5. [En ligne]. <http://plants.usda.gov>, (page consultée en mars 2005).

- WILKES, J. 1991. Heartwood development and its relationship to growth in *Pinus radiata*. Wood Sci. Technol. (25): 85–90.
- WILKINS, A.P. 1991. Sapwood, heartwood and bark thickness of silviculturally treated *Eucalyptus grandis*. Wood Sci. Technol. (25): 415–423.
- WHITEHEAD, D., EDWARDS, W.R.N. et P.G. JARVIS. 1984. Conducting sapwood area, foliage area, and permeability in mature trees of *Picea sitchensis* and *Pinus contorta*. Can. J. For. Res. (14) : 940-946.
- WIEDENBECK, J., WIEMANN, M., ALDERMAN, D., BAUMGRAS, J. et W. LUPPOLD. 2004. Defining hardwood log quality attributes. USDA, Forest Service, General Technical Report NE-313. Northeastern Research Station, Princeton, WV. 38 p.
- YANG, K.C. et H. HAZENBERG 1992. Impacts of spacing on sapwood and heartwood thickness in *Picea mariana* (Mill.) B.S.P. and *Picea glauca* (Moench.) Voss. Wood Fib. Sci. (24): 330-336.
- YANG, K.C. et H. HAZENBERG 1991. Sapwood and heartwood with relationship to tree age in *Pinus banksiana*. Can. J. For. Res. (21): 521-525.
- YLIOJA, T., ROININEN, H., HEINONEN, J. et M., ROUSSI. 2000. Suceptibility of *Betula pendula* clones to *Phytobia betulae*, a diptera miner of birch stems. Can. J. For. Res. (30): 1824-1829.

ANNEXE 1

Zones de végétation et domaines bioclimatiques du Québec



I. ZONE TEMPÉRÉE NORDIQUE

A. Sous-zone de la forêt décidue

1. ■ Domaine de l'érablière à caryer cordiforme
2. ■ Domaine de l'érablière à tilleul
3. ■ Domaine de l'érablière à bouleau jaune

B. Sous-zone de la forêt mélangée

4. ■ Domaine de la sapinière à bouleau jaune

II. ZONE BORÉALE

A. Sous-zone de la forêt boréale continue

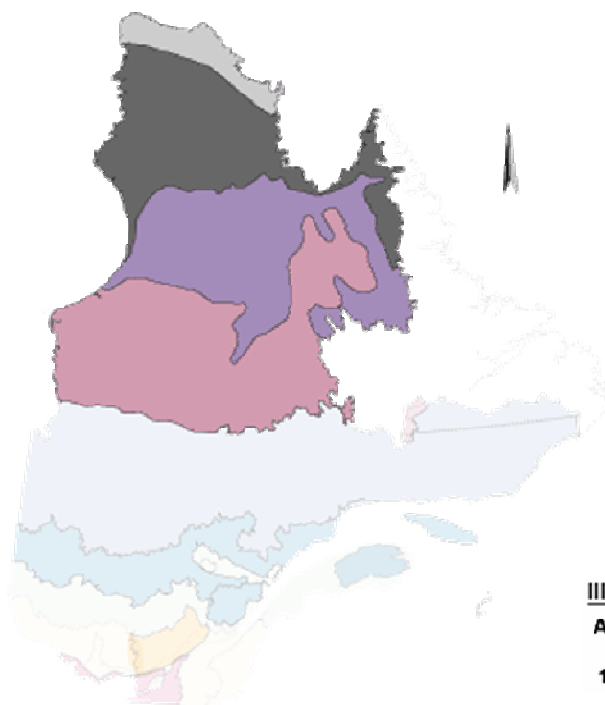
5. ■ Domaine de la pessière à mousses
6. ■ Domaine de la sapinière à bouleau blanc

B. Sous-zone de la taïga

7. ■ Domaine de la pessière à lichens

C. Sous-zone de la toundra forestière

8. ■ Domaine de la toundra forestière



III. ZONE ARCTIQUE

A. Sous-zone du Bas-Arctique

9. ■ Domaine de la toundra arctique arbustive
10. ■ Domaine de la toundra arctique herbacée

(Source : MRNFQ 2005e)

ANNEXE 2

Grille de classification des tiges du Ministère des Ressources naturelles et de la Faune du Québec

Classe de qualité	A		B	C	D
Section retenue pour l'évaluation à partir du sommet de la plus haute racine	1er cinq m.		1er cinq m.	1er cinq m.	Toutes les tiges de la classe de dhp 24 cm et plus qui ne sont pas conformes aux normes de la classe "C"
Bille à évaluer en m	meilleur 3,70 m		meilleur 3,70 m	meilleur 3,70 m	
Classes de dhp en cm	40,42,44	46 +	34 +	24 +	
Débits clair * (nombre maximal et longueur minimale)	1 de 3,10 m	1 de 3,10 m ou 2 de 1,50 - 1,60 1,51 - 1,59 1,52 - 1,58 1,53 - 1,57 1,54 - 1,56 1,55 - 1,55	1 de 2,50 m ou 2 de 1,00 - 1,50 1,01 - 1,49 1,02 - 1,48 etc. ou encore 3 de 1m	1 de 1,80 m ou 2 de 0,60 - 1,20 0,61 - 1,19 0,62 - 1,18 etc. ou encore 3 de 60 cm	
Rendement en débits clairs	3,10		2,50	1,80	
Pourcentage de réduction autorisé en incluant les coudes et les courbures	10%		10%**	50%***	

* Débit clair : partie d'une face exempte de défauts.











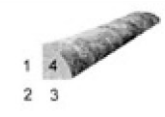
** La classe B englobe les tiges des classes de dhp de 34, 36 ou 38 cm qui ne subissent pas plus de 10% de réduction totale ainsi que celles qui ont le diamètre et le rendement des tiges de classe A tout en étant affectées de 15 % de coude ou de courbure ou de 40 % de réduction totale.

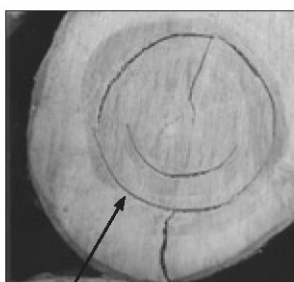
*** La classe C regroupe à la fois les tiges des classes de dhp de 24 à 32 cm auxquelles on n'attribue pas plus de 50 % de réduction totale et celles dont le diamètre et le rendement correspondent à la classe A ou B, mais qui subissent une réduction totale n'excédant pas 60 %.

(Source : MRNFQ 2002a)

ANNEXE 3

**Spécifications des bois de bouleau à papier et de bouleau
jaune recherchés par le groupe Transforêt Inc.**

		Bouleau blanc Bouleau jaune (Merisier)				Qualité : Sciage	
Diamètre minimum au fin bout sous l'écorce →		16" +	14-15"	12-13"	10-11"	9"	8"
Défauts de bout centrés, diamètre maximum →		 6"	 6"	 4"	 4"	 1"	 0"
	4 faces claires	SS Courbure 2"	SS Courbure 1,5"	SS Courbure 1"	S1 Courbure 1"	S1 Courbure 0"	SP Courbure 1"
	3 faces claires	SS Courbure 1"	SS Courbure 1"	SS Courbure 0"	S1 Courbure 1"	SP Courbure 1"	SP Courbure 1"
	2 faces claires	S1 Courbure 2"	S1 Courbure 2"	S1 Courbure 1,5"	S1 Courbure 0"	SP Courbure 1"	SP Courbure 1"
	1 face claire	S2 Courbure 3"	S2 Courbure 2"	S2 Courbure 2"	S2 Courbure 2"	SP Courbure 1"	Pâte



Une roulure formant un cercle complet est un défaut inacceptable.













LONGUEURS :

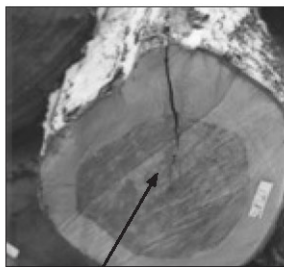
8'4" - 10'4" - 12'6" - 14'6" - 16'6"

PARTICULARITÉS :

1. Les billes avec un coeur étoilé et celles avec un renflement de pied important affectent négativement le grade de la bille. Ces défauts doivent être éliminés lors du façonnage.
2. Une fente de coeur affectant plus de deux faces est un défaut inacceptable.
3. Les marques de vers influencent négativement le grade de la bille.

(Source : Anonyme 2005)

 Bouleau blanc Bouleau jaune (Merisier)		Qualité : Déroutage				
Diamètre minimum au fin bout sous l'écorce →		16" +	14-15"	12-13"	11"	10"
Défauts de bout centrés, diamètre maximum →						
	4 faces claires	AA Courbure 0"	AD Courbure 0"	D1 Courbure 0"	D1 Courbure 0"	D3 Courbure 0"
		AD Courbure 2"	D1 Courbure 2"	D2 Courbure 1,5"	D3 Courbure 1"	Sciage Courbure 1"
	3 faces claires	AD Courbure 0"	D1 Courbure 0"	D2 Courbure 0"	D3 Courbure 0"	Sciage
		D3 Courbure 2"	D3 Courbure 2"	D3 Courbure 1,5"	Sciage Courbure 1"	
	2 faces claires	D3 Courbure 0"	D3 Courbure 0"	Sciage	Sciage	Sciage
		Sciage Courbure 2"	Sciage Courbure 1,5"			
	1 face claire	Palette Pâte	Palette Pâte	Palette Pâte	Palette Pâte	Palette Pâte



Une fente de coeur est un défaut inacceptable pour la qualité tranchage et déroulage.







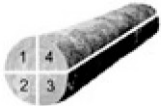

LONGUEURS :

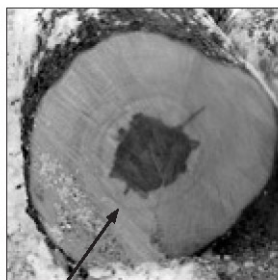
8'6" - 9'4"

PARTICULARITÉS :

1. Les noeuds doivent être sains et d'un diamètre maximal de 3".
2. Les marques de minéralisation ou de vers influencent négativement le grade du bouleau blanc. Ces billes font l'objet d'un classement particulier.
3. Le grain frisé, spiralé ou ondulé n'est pas accepté pour les qualités tranchage et déroulage.

(Source : Anonyme 2005)

		Bouleau blanc et jaune (merisier) Cerisier tardif Érable à sucre			Qualité : Tranchage
Diamètre minimum au fin bout sous l'écorce →		16" +	14-15"	12-13"	Ce qui caractérise une bille de qualité tranchage c'est principalement la dimension du coeur.
Défauts de bout centrés, diamètre maximum →		 0"	 0"	 0"	
	4 faces claires	AA Courbure 0"	AD Courbure 0"	D1 Courbure 0"	
	3 faces claires	AD Courbure 0"	D2 Courbure 1"	D3 Courbure 1"	La proportion de coeur doit être inférieure au tiers du diamètre de la bille. Le moindre défaut de surface ou de bout affecte négativement le grade de la bille.



Même si le coeur fait moins du tiers de la découpe, il doit être de forme régulière pour que la bille soit de qualité tranchage comme sur la photo ci-dessous.



LONGUEURS :

8'6" - 9'6" - 10'6" - 12'6" - 14'6"

PARTICULARITÉS :

1. Billes de pied seulement pour le grade AA et AD.
2. Les billes doivent provenir d'arbres abattus entre septembre et mars.
3. Le grain frisé ou spirale n'est pas accepté.
4. Les billes provenant d'érable entaillé ne sont pas acceptées.
5. Les billes avec des marques de minéralisation ou de vers ne sont pas acceptées.
6. Les marques laissées par les oiseaux piqueurs ne sont pas acceptées.
7. Les coeurs de formes irrégulières et les billes étoilées ne sont pas acceptées.
8. Les noeuds et les bosses sont considérés comme des défauts.
9. Pas plus de deux défauts bien centrés sur une même face.

(Source : Anonyme 2005)

ANNEXE 4

Caractéristiques des 18 arbres échantillons

Site	arbre	Statut social	dhp mm	âge années	hauteur m	SF* m²	PF* kg	SF/PF* m²/kg	SF/SA* m²/cm²	PF/SA* kg/cm²	Aubier		Duramen		Écorce		Total m³
											m³	%	m³	%	m³	%	
1	2	codominant	242	74	14,0	98,3	5,0	19,7	0,240	0,012	0,205	77%	0,03	12%	0,028	11%	0,266
1	5	dominant	256	91	11,4	69,9	3,1	22,6	0,320	0,014	0,167	55%	0,11	35%	0,032	10%	0,306
1	17	codominant	210	42	11,7	117,3	5,0	23,5	0,370	0,016	0,128	85%	0,01	5%	0,016	11%	0,151
1	36	intermédiaire	217	42	12,8	86,3	3,7	23,3	0,210	0,009	0,194	89%	0,01	3%	0,017	8%	0,217
1	42	intermédiaire	209	53	13,6	94,7	4,0	23,7	0,340	0,014	0,151	75%	0,03	15%	0,019	10%	0,202
1	46	dominant	210	40	12,0	64,2	2,8	22,9	0,220	0,010	0,132	84%	0,01	4%	0,019	12%	0,157
Total (site 1)			224	57	12,6	88,5	3,9	22,6	0,283	0,013	0,163	77%	0,032	13%	0,022	10%	0,217
2	53	codominant	184	56	12,7	51,3	2,3	22,3	0,200	0,009	0,108	84%	0,01	7%	0,011	9%	0,129
2	71	dominant	221	64	9,9	80,9	3,6	22,5	0,220	0,010	0,155	75%	0,03	16%	0,019	9%	0,207
2	74	intermédiaire	257	64	15,2	183,1	8,0	22,9	0,350	0,015	0,321	88%	0,01	4%	0,032	9%	0,366
2	90	intermédiaire	226	52	14,7	120,8	5,4	22,4	0,300	0,014	0,199	74%	0,05	17%	0,023	9%	0,269
2	94	dominant	184	51	11,0	21,5	1,1	19,6	0,090	0,005	0,113	79%	0,02	11%	0,014	10%	0,144
2	99	codominant	188	56	12,7	84,4	3,7	22,8	0,310	0,014	0,134	86%	0,01	4%	0,016	10%	0,157
Total (site 2)			210	57	12,7	90,3	4,0	22,1	0,245	0,011	0,172	81%	0,021	10%	0,019	9%	0,212
3	101	intermédiaire	230	44	13,4	110,6	4,7	23,5	0,340	0,014	0,154	85%	0,01	5%	0,019	10%	0,181
3	102	codominant	230	73	12,7	93,5	4,1	22,8	0,270	0,012	0,180	79%	0,03	12%	0,021	9%	0,229
3	127	dominant	291	57	11,9	220,6	9,5	23,2	0,320	0,014	0,268	85%	0,02	5%	0,031	10%	0,313
3	133	codominant	262	50	12,5	85,2	3,8	22,4	0,200	0,009	0,183	84%	0,01	7%	0,021	10%	0,217
3	138	intermédiaire	332	120	14,2	314,3	13,4	23,5	0,440	0,019	0,335	64%	0,13	26%	0,057	11%	0,525
3	144	dominant	239	97	10,6	59,4	2,7	22,0	0,190	0,009	0,141	62%	0,06	26%	0,027	12%	0,226
Total (site 3)			264	74	12,6	147,3	6,4	22,9	0,293	0,013	0,210	77%	0,043	13%	0,029	10%	0,282
Total			233	63	12,6	108,7	4,8	22,5	0,274	0,012	0,182	78%	0,032	12%	0,023	10%	0,237

* SF : surface foliaire; PF : poids foliaire sec; SA : surface d'aubier à hauteur de poitrine.

ANNEXE 5

Résultats des analyses de variance

Tableau A5-1 Résultats de l'analyse de variance des effets du site de récolte (SITE) et du statut social de l'arbre (STATUT) sur la surface foliaire par arbre entier (n=18)*

Source de variation	d.l.	F	p(F)
SITE	2	1,577	0,259
STATUT	2	1,955	0,197
SITE * STATUT	4	0,708	0,607
Erreur résiduelle	9		
Total	18		

Tableau A5-2 Résultats de l'analyse de variance des effets du site de récolte (SITE) et du statut social de l'arbre (STATUT) sur le poids foliaire sec par arbre entier (n=18)*

Source de variation	d.l.	F	p(F)
SITE	2	1,503	0,273
STATUT	2	1,838	0,214
SITE * STATUT	4	0,802	0,553
Erreur résiduelle	9		
Total	18		

* d.l. : degré de liberté; F : valeur calculée du test de Fisher; p(F) : probabilité associée à F

Tableau A5-3 Résultats de l'analyse de variance des effets du site de récolte (SITE), du statut social de l'arbre (STATUT) et de la section de houppier (HOUPPIER) sur la surface foliaire spécifique (n=36)*

Source de variation	d.l.	F	p(F)
SITE	2	0,668	0,525
STATUT	2	5,426	0,014
HOUPPIER	1	10,898	0,004
SITE * STATUT	4	4,908	0,007
SITE * HOUPPIER	2	0,618	0,550
STATUT * HOUPPIER	2	0,946	0,407
SITE * STATUT * HOUPPIER	4	1,352	0,290
Erreur résiduelle	18		
Total	36		

Tableau A5-4 Résultats de l'analyse de variance des effets du site de récolte (SITE), du statut social de l'arbre (STATUT) et de la section de houppier (HOUPPIER) sur la proportion de surface foliaire (n=36)*

Source de variation	d.l.	F	p(F)
SITE	2	0,000	1,000
STATUT	2	0,000	1,000
HOUPPIER	1	8,374	0,010
SITE * STATUT	4	0,000	1,000
SITE * HOUPPIER	2	0,881	0,432
STATUT * HOUPPIER	2	12,945	0,000
SITE * STATUT * HOUPPIER	4	1,817	0,170
Erreur résiduelle	18		
Total	36		

* d.l. : degré de liberté; F : valeur calculée du test de Fisher; p(F) : probabilité associée à F

Tableau A5-5 Résultats de l'analyse de variance des effets du site de récolte (SITE), du statut social de l'arbre (STATUT) et de la section de houppier (HOUPPIER) sur la proportion de poids foliaire sec (n=36) *

Source de variation	d.l.	F	p(F)
SITE	2	0,001	0,999
STATUT	2	0,005	0,995
HOUPPIER	1	8,742	0,008
SITE * STATUT	4	0,002	1,000
SITE * HOUPPIER	2	0,791	0,469
STATUT * HOUPPIER	2	11,865	0,001
SITE * STATUT * HOUPPIER	4	1,953	0,145
Erreur résiduelle	18		
Total	36		

Tableau A5-6 Résultats de l'analyse de variance des effets du site de récolte (SITE) et du statut social de l'arbre (STATUT) sur le ratio « surface foliaire / surface d'aubier » (SF/SA) par arbre entier (n=18) *

Source de variation	d.l.	F	p(F)
SITE	2	0,655	0,543
STATUT	2	2,582	0,130
SITE * STATUT	4	1,136	0,399
Erreur résiduelle	9		
Total	18		

* d.l. : degré de liberté; F : valeur calculée du test de Fisher; p(F) : probabilité associée à F

Tableau A5-7 Résultats de l'analyse de variance des effets du site de récolte (SITE) et du statut social de l'arbre (STATUT) sur le ratio « poids foliaire sec / surface d'aubier » (PF/SA) par arbre entier (n=18) *

Source de variation	d.l.	F	p(F)
SITE	2	0,614	0,563
STATUT	2	2,573	0,131
SITE * STATUT	4	1,456	0,293
Erreur résiduelle	9		
Total	18		

Tableau A5-8 Résultats de l'analyse de variance des effets du site de récolte (SITE) et du statut social de l'arbre (STATUT) sur le volume d'aubier par arbre entier (n=18) *

Source de variation	d.l.	F	p(F)
SITE	2	0,899	0,440
STATUT	2	2,111	0,177
SITE * STATUT	4	0,628	0,655
Erreur résiduelle	9		
Total	18		

Tableau A5-9 Résultats de l'analyse de variance des effets du site de récolte (SITE) et du statut social de l'arbre (STATUT) sur le volume de duramen par arbre entier (n=18) *

Source de variation	d.l.	F	p(F)
SITE	2	0,437	0,659
STATUT	2	0,658	0,541
SITE * STATUT	4	0,416	0,793
Erreur résiduelle	9		
Total	18		

* d.l. : degré de liberté; F : valeur calculée du test de Fisher; p(F) : probabilité associée à F

Tableau A5-10 Résultats de l'analyse de variance des effets du site de récolte (SITE) et du statut social de l'arbre (STATUT) sur la proportion d'aubier par arbre entier (n=18)*

Source de variation	d.l.	F	p(F)
SITE	2	0,119	0,889
STATUT	2	0,690	0,526
SITE * STATUT	4	0,084	0,985
Erreur résiduelle	9		
Total	18		

Tableau A5-11 Résultats de l'analyse de variance des effets du site de récolte (SITE) et du statut social de l'arbre (STATUT) sur la proportion de duramen par arbre entier (n=18)*

Source de variation	d.l.	F	p(F)
SITE	2	0,119	0,889
STATUT	2	0,690	0,526
SITE * STATUT	4	0,084	0,985
Erreur résiduelle	9		
Total	18		

Tableau A5-12 Résultats de l'analyse de variance de l'effet du site de récolte (SITE) sur la proportion maximale de duramen (n=14)*

Source de variation	d.l.	F	p(F)
SITE	2	0,045	0,957
Erreur résiduelle	11		
Total	14		

* d.l. : degré de liberté; F : valeur calculée du test de Fisher; p(F) : probabilité associée à F

Tableau A5-13 Résultats de l'analyse de variance de l'effet du site de récolte (SITE) sur la hauteur du maximum de duramen (n=14) *

Source de variation	d.l.	F	p(F)
SITE	2	0,015	0,985
Erreur résiduelle	11		
Total	14		

Tableau A5-14 Résultats de l'analyse de variance de l'effet du site de récolte (SITE) sur la hauteur totale de duramen (n=14) *

Source de variation	d.l.	F	p(F)
SITE	2	0,975	0,408
Erreur résiduelle	11		
Total	14		

* d.l. : degré de liberté; F : valeur calculée du test de Fisher; p(F) : probabilité associée à F

ANNEXE 6

Profil interne des tiges (n=18)

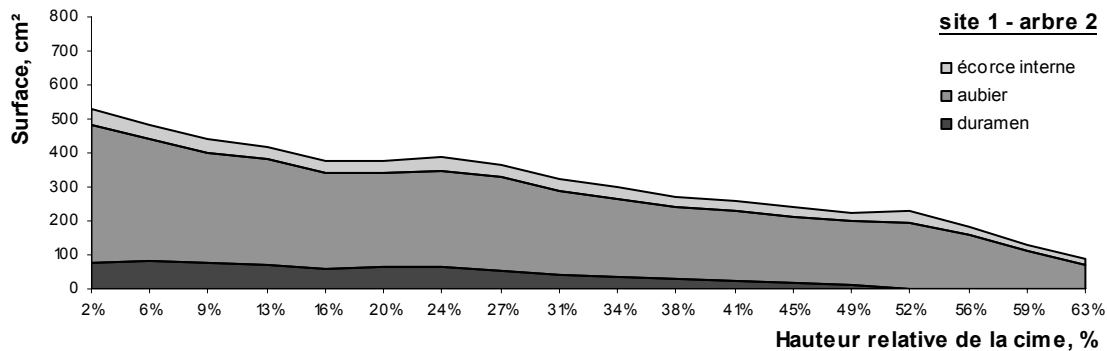


Figure A6.1 Profil interne de l'arbre échantillon 2 du site 1*

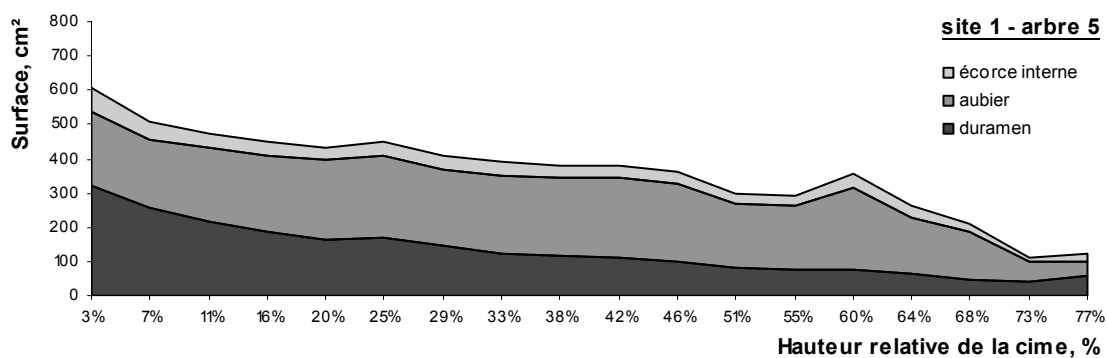


Figure A6.2 Profil interne de l'arbre échantillon 5 du site 1*

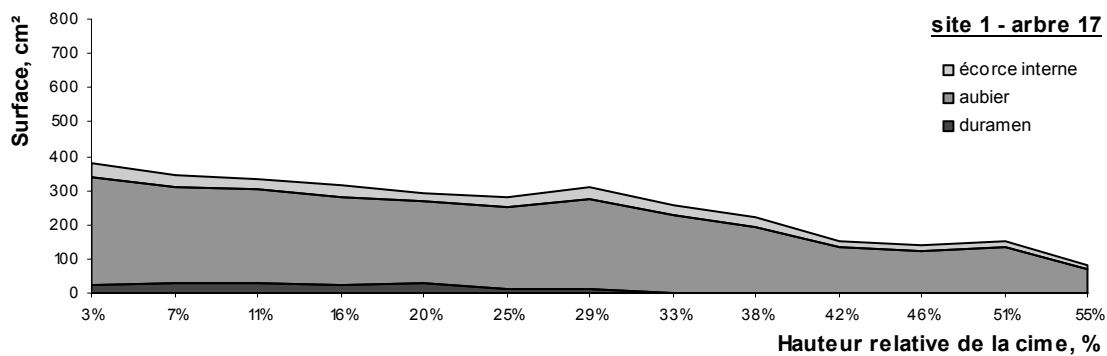


Figure A6.3 Profil interne de l'arbre échantillon 17 du site 1*

* Chaque graduation de l'axe des abscisses correspond à la hauteur d'un disque. La hauteur est donc de 50 centimètres entre deux graduations.

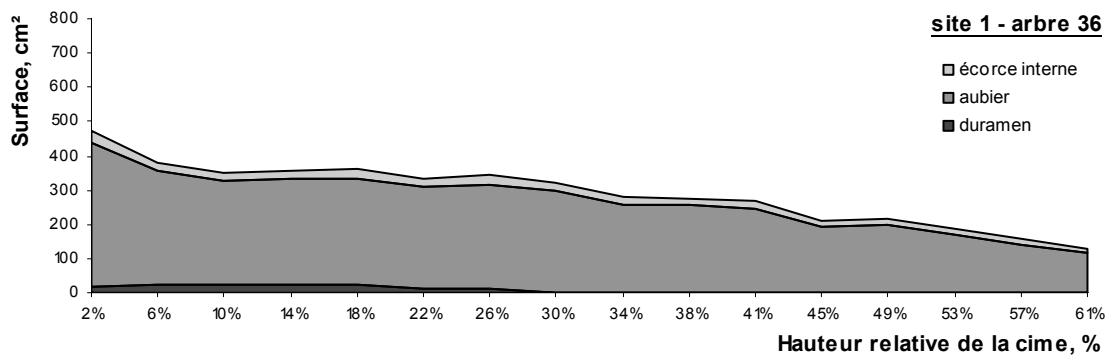


Figure A6.4 Profil interne de l'arbre échantillon 36 du site 1 *

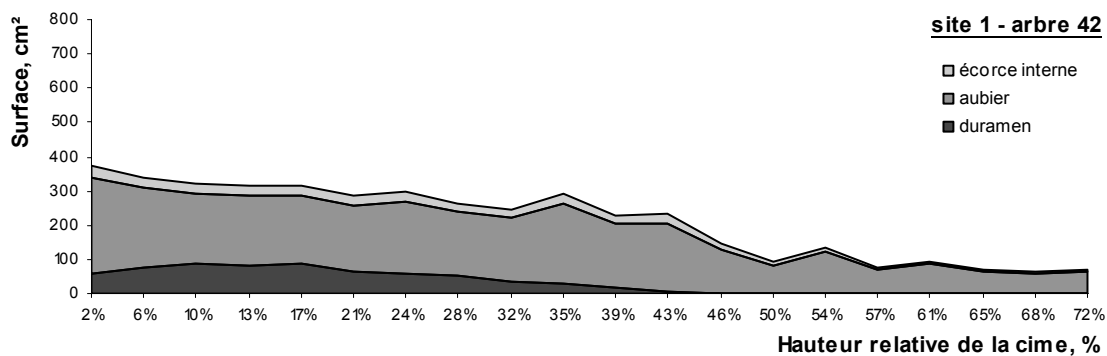


Figure A6.5 Profil interne de l'arbre échantillon 42 du site 1 *

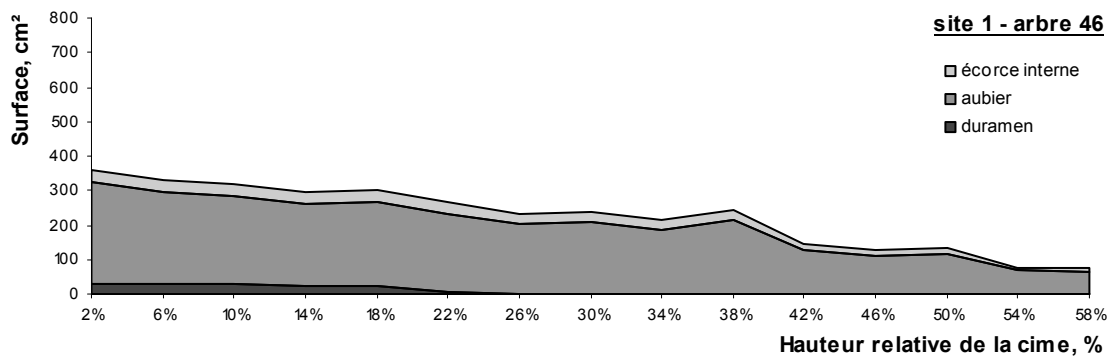


Figure A6.6 Profil interne de l'arbre échantillon 46 du site 1 *

* Chaque graduation de l'axe des abscisses correspond à la hauteur d'un disque. La hauteur est donc de 50 centimètres entre deux graduations.

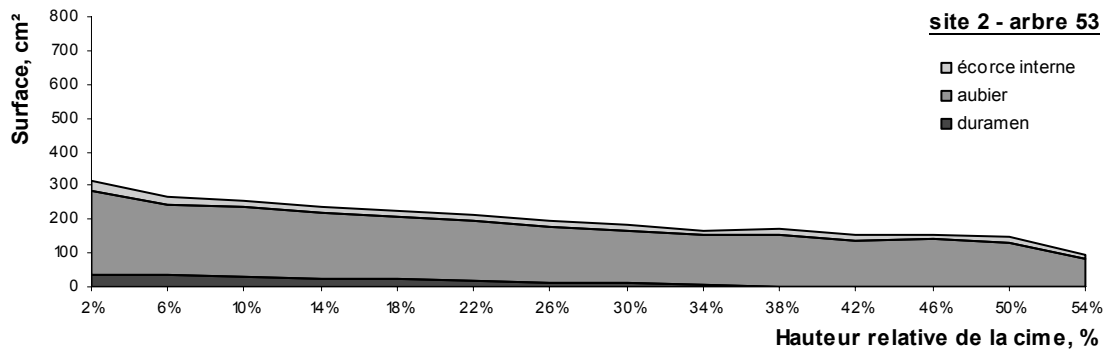


Figure A6.7 Profil interne de l'arbre échantillon 53 du site 2 *

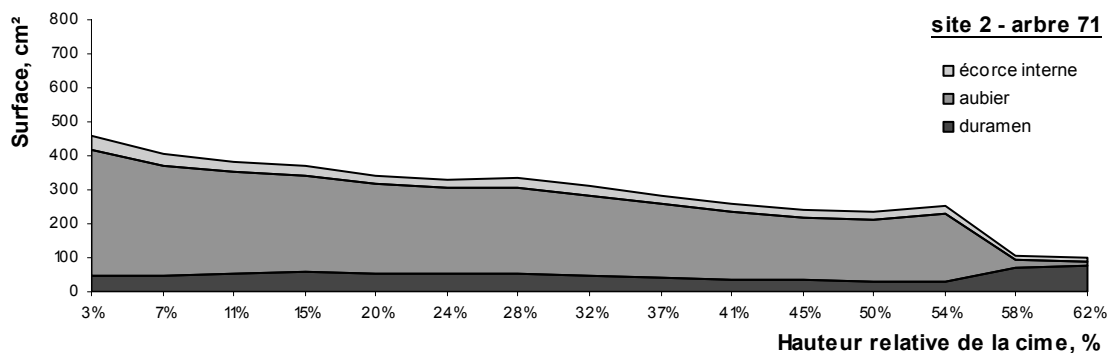


Figure A6.8 Profil interne de l'arbre échantillon 71 du site 2 *

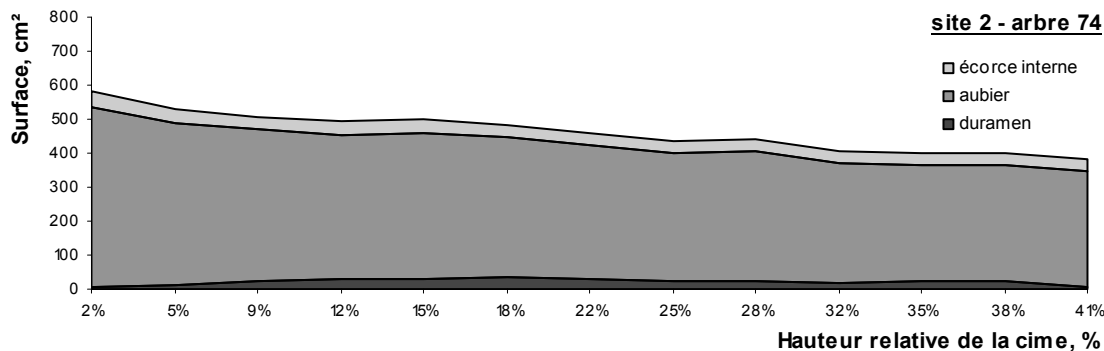


Figure A6.9 Profil interne de l'arbre échantillon 74 du site 2 *

* Chaque graduation de l'axe des abscisses correspond à la hauteur d'un disque. La hauteur est donc de 50 centimètres entre deux graduations.

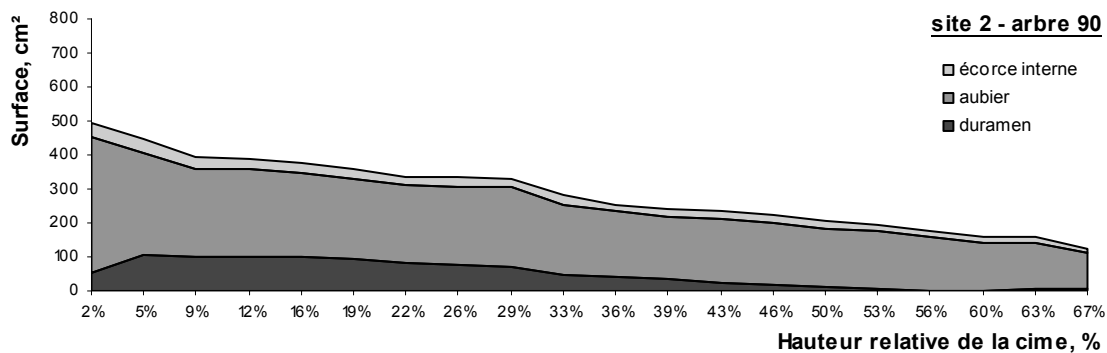


Figure A6.10 Profil interne de l'arbre échantillon 90 du site 2 *

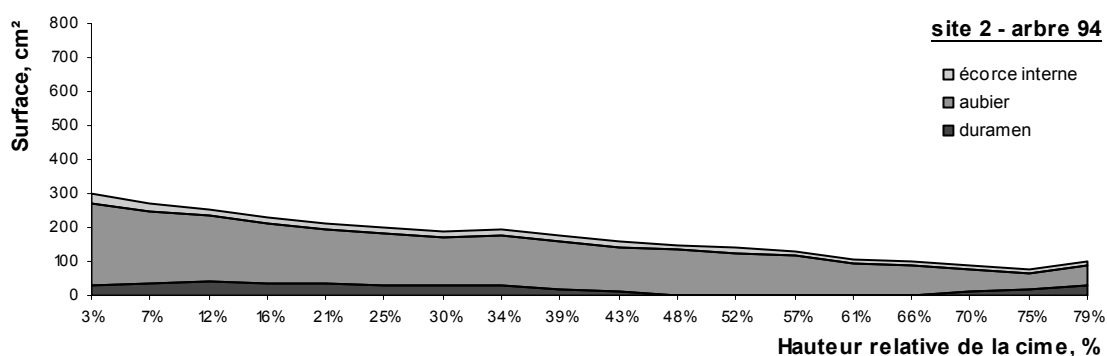


Figure A6.11 Profil interne de l'arbre échantillon 94 du site 2 *

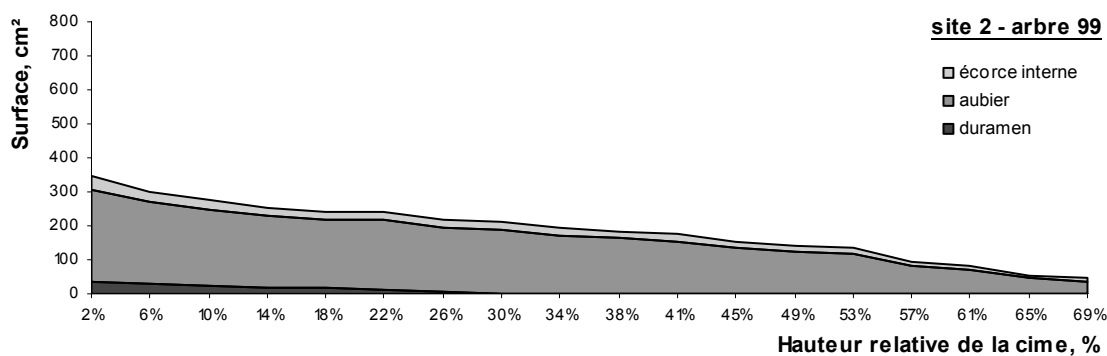


Figure A6.12 Profil interne de l'arbre échantillon 99 du site 2 *

* Chaque graduation de l'axe des abscisses correspond à la hauteur d'un disque. La hauteur est donc de 50 centimètres entre deux graduations.

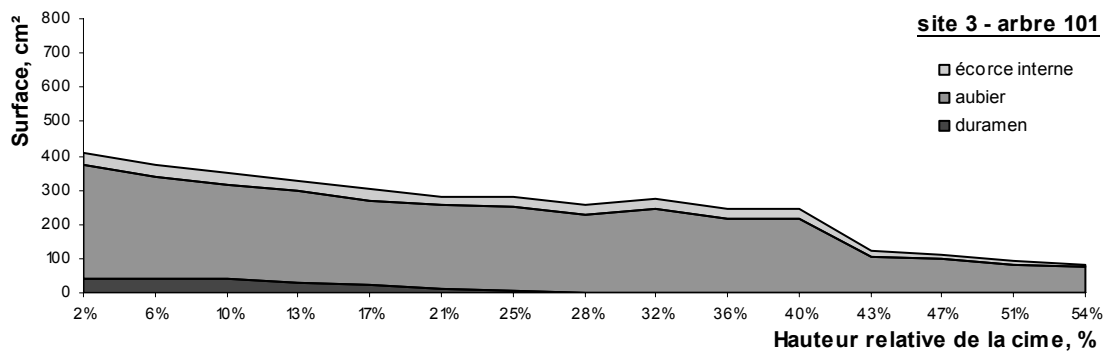


Figure A6.13 Profil interne de l'arbre échantillon 101 du site 3 *

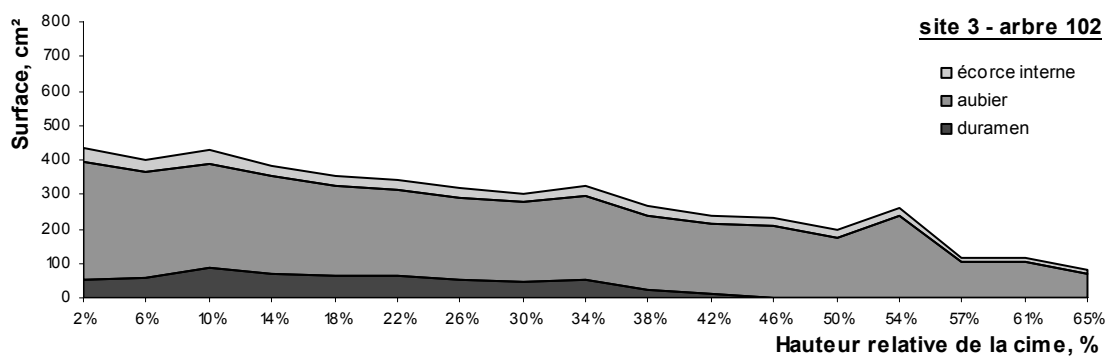


Figure A6.14 Profil interne de l'arbre échantillon 102 du site 3 *

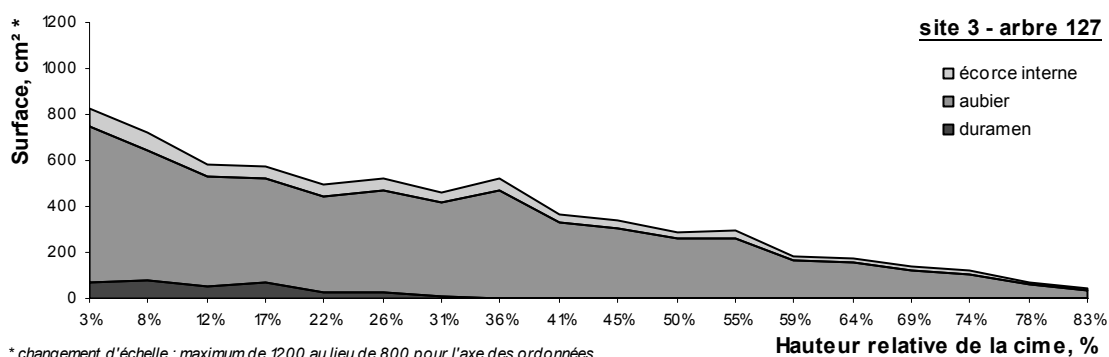


Figure A6.15 Profil interne de l'arbre échantillon 127 du site 3 *

* Chaque graduation de l'axe des abscisses correspond à la hauteur d'un disque. La hauteur est donc de 50 centimètres entre deux graduations.

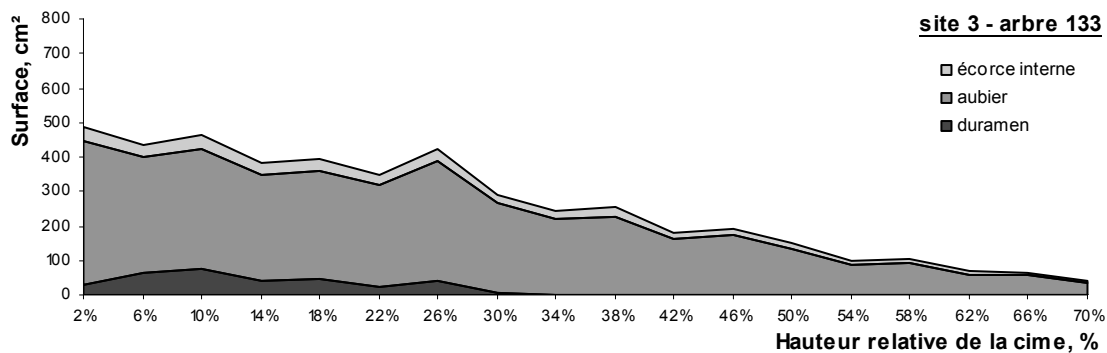


Figure A6.16 Profil interne de l'arbre échantillon 133 du site 3 *

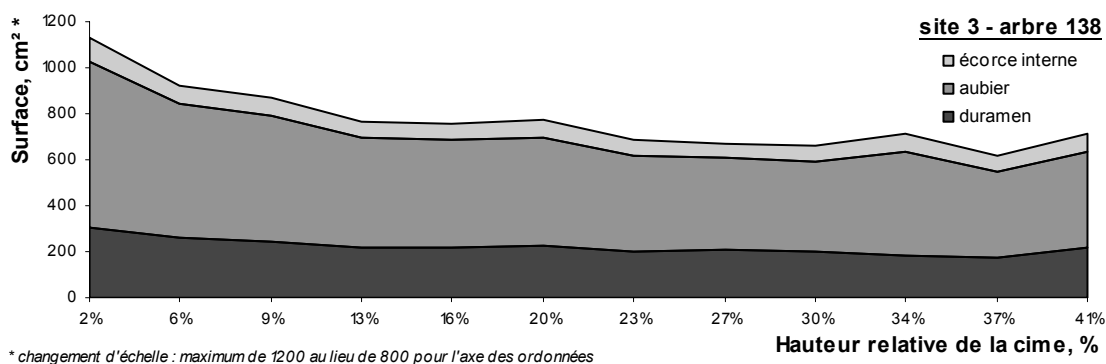


Figure A6.17 Profil interne de l'arbre échantillon 138 du site 3 *

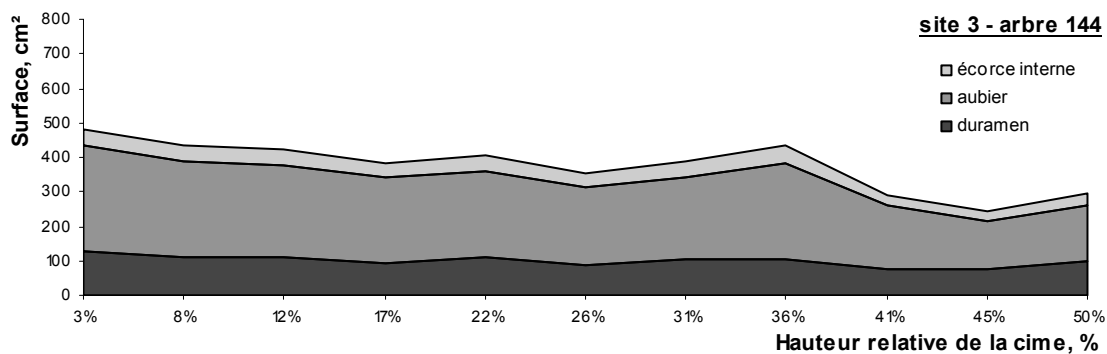


Figure A6.18 Profil interne de l'arbre échantillon 144 du site 3 *

* Chaque graduation de l'axe des abscisses correspond à la hauteur d'un disque. La hauteur est donc de 50 centimètres entre deux graduations.

ANNEXE 7

Défilement de la proportion de duramen par arbre échantillon (n=14)

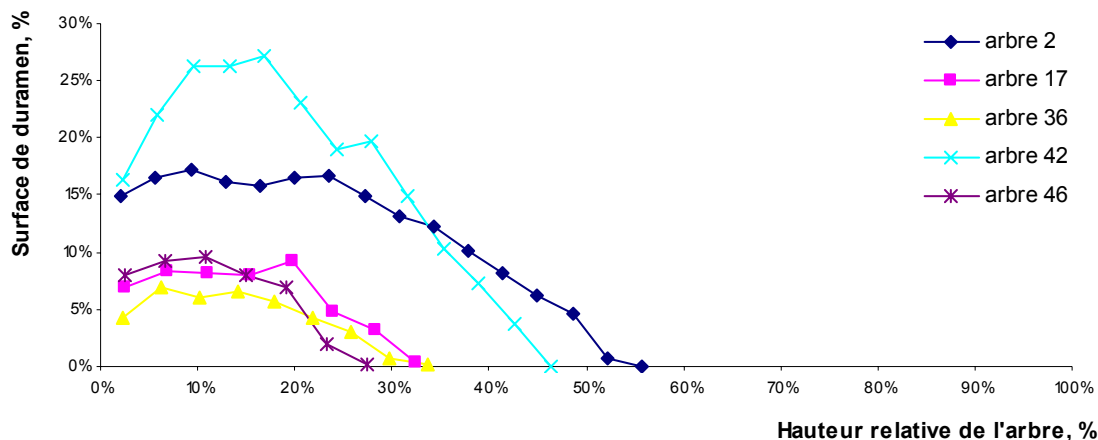


Figure A7.1 Proportion de duramen en fonction de la hauteur relative de l'arbre, pour les arbres échantillons du site 1

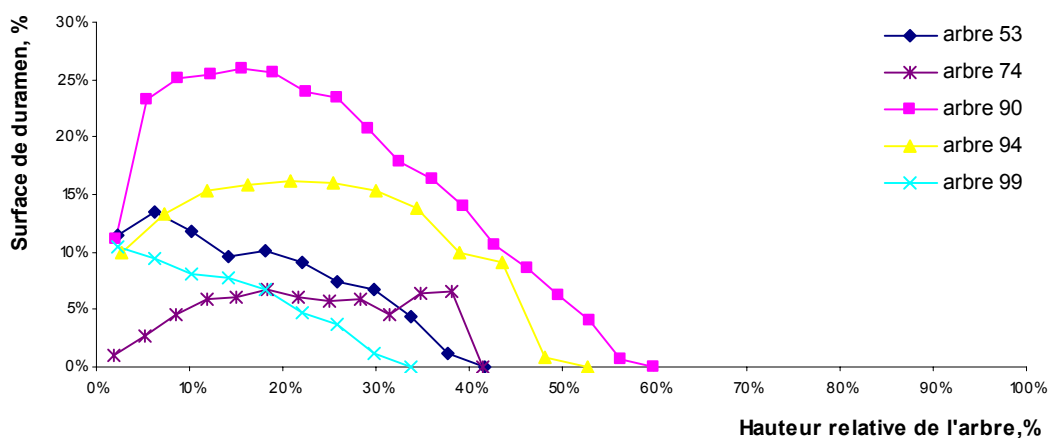


Figure A7.2 Proportion de duramen en fonction de la hauteur relative de l'arbre, pour les arbres échantillons du site 2

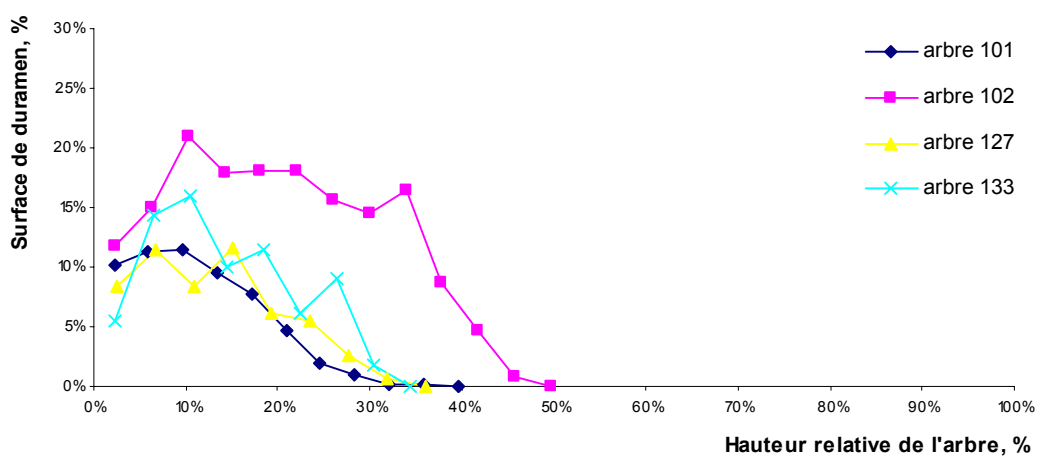


Figure A7.3 Proportion de duramen en fonction de la hauteur relative de l'arbre, pour les arbres échantillons du site 3

ANNEXE 8

Distribution verticale du volume de duramen par arbre échantillon (n=14)

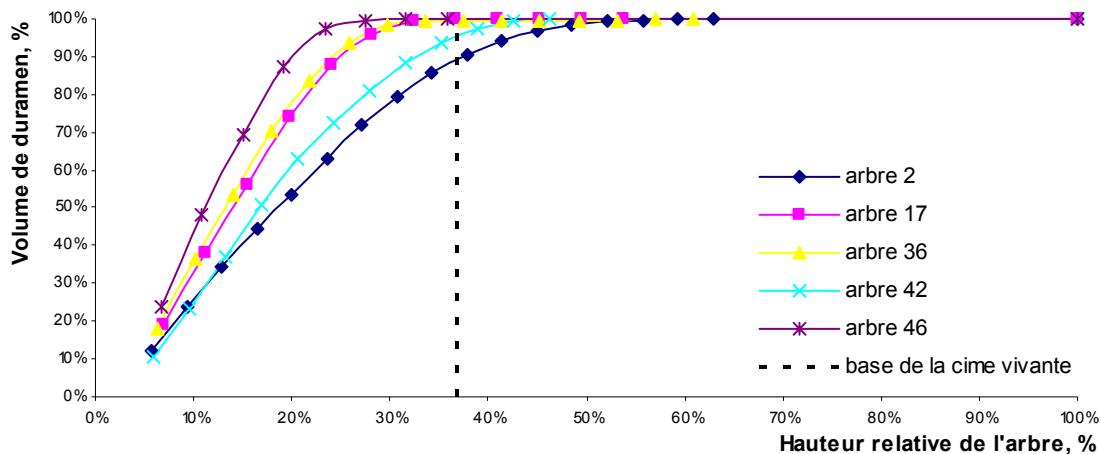


Figure A8.1 Volume cumulatif de duramen (%) en fonction de la hauteur relative de l'arbre (%), pour les arbres échantillons du site 1

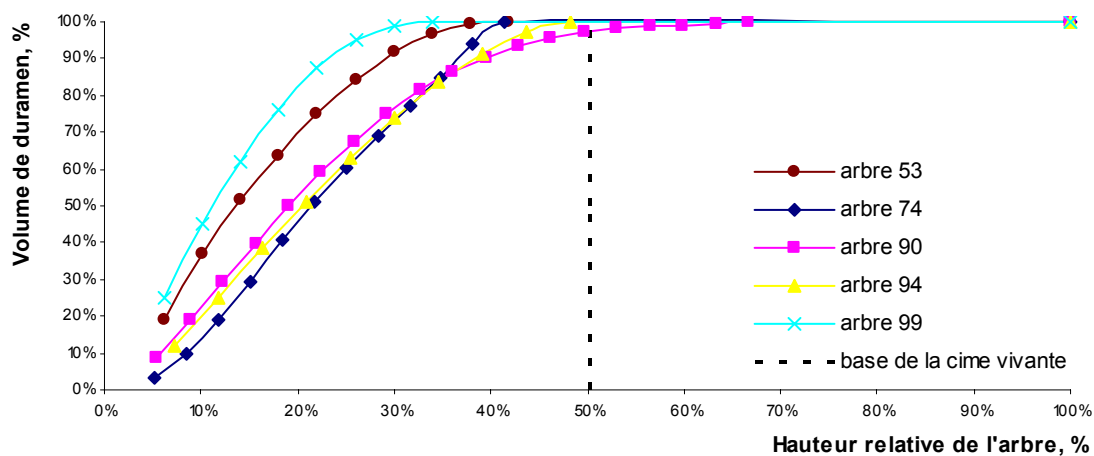


Figure A8.2 Volume cumulatif de duramen (%) en fonction de la hauteur relative de l'arbre (%), pour les arbres échantillons du site 2

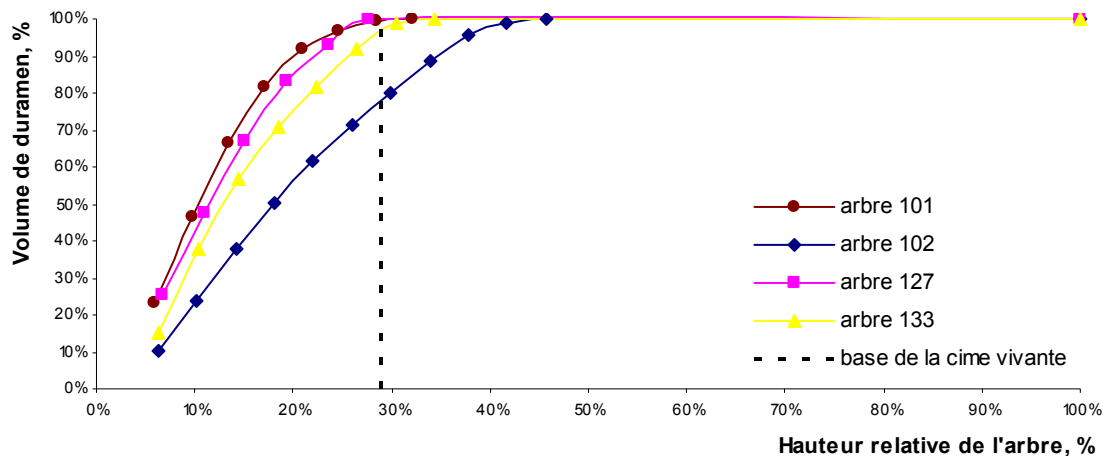


Figure A8.3 Volume cumulé de duramen (%) en fonction de la hauteur relative de l'arbre (%), pour les arbres échantillons du site 3