

LEANDRO PASSARINI

**INFLUENCE DE LA TEMPÉRATURE ET DE LA  
TENEUR EN HUMIDITÉ SUR LES PROPRIÉTÉS  
MÉCANIQUES DU BOIS ASSOCIÉES AU PROCÉDÉ  
DE FRAGMENTATION PAR ÉQUARRISSEUSE-  
FRAGMENTEUSE**

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 en sciences (M.Sc.)

DÉPARTEMENT DES SCIENCES DU BOIS ET DE LA FORÊT  
FACULTÉ DE FORESTERIE, DE GÉOGRAPHIE ET DE GÉOMATIQUE  
UNIVERSITÉ LAVAL  
QUÉBEC

2011

© Leandro Passarini, 2011

## Remerciements

- J'aimerais d'abord remercier mon directeur de recherche professeur Roger Hernández pour sa confiance, son aide, son attention et pour m'avoir donné l'équilibre nécessaire pour vaincre les difficultés de mon travail d'étudiant chercheur.
- Au professeur Ahmed Koubaa, mon codirecteur, pour ses commentaires et conseils de grande valeur.
- À tous les employés et techniciens du Centre de Recherche du Bois (CRB), en particulier à Luc Germain, Sylvain Auger, Daniel Bourgault, Éric Rousseau, François Turgeon, Colette Bourcier, Guylaine Bélanger, qui ont toujours été sympathiques et prêt à m'aider.
- À Benoît Laganière de FPInnovations, à Québec, pour m'avoir montré et expliqué au détail le travail de l'équarrisseuse-fragmenteuse.
- À tous les gens du Département des sciences du bois et de la forêt de l'Université Laval pour leur support à la réalisation de mes études.
- À mes collègues du CRB pour partager avec moi autant les bons moments comme les difficiles.
- Aux professeurs de l'Université de São Paulo (USP) José Otávio Brito et José Nivaldo Garcia et aux ex-étudiants du CRB Luiz Fernando de Moura et Giana Almeida pour leur motivation et recommandations avant mon arrivée au Canada.
- À toute ma famille, qui a fait d'énormes efforts pour me donner une bonne éducation et formation pendant toute ma vie.
- À Erika, mon épouse, pour être toujours à mes côtés et m'accepter avec mes qualités et mes défauts.

## Résumé

Cette étude a évalué l'influence de la température et de la teneur en humidité du bois sur son comportement mécanique lors du procédé d'obtention des copeaux papetiers. Les propriétés mécaniques qui furent étudiées sont le cisaillement parallèle au fil, le fendillement et la flexion statique. Des échantillons jumelés du duramen et de l'aubier ont été pris des billes d'épinette noire et de sapin baumier pour chaque propriété mécanique. Les essais mécaniques ont été conduits à des températures variant entre  $-30^{\circ}\text{C}$  et  $20^{\circ}\text{C}$  et à des intervalles de  $10^{\circ}\text{C}$ . La teneur en humidité des échantillons était largement au-dessus du point de saturation des fibres. La teneur en humidité, la masse volumique basale et la largeur des cernes ont aussi été mesurées pour chaque échantillon.

Les résultats montrent que, pour les deux espèces et pour toutes les propriétés mécaniques étudiées, la température a eu un effet significatif sur les propriétés mécaniques uniquement au-dessous de  $0^{\circ}\text{C}$ . Dans ce cas, cet effet a été plus évident pour l'aubier que pour le duramen. En général, pour des températures de  $0^{\circ}\text{C}$  et plus, la température n'a pas affecté différemment les propriétés mécaniques étudiées, autant pour l'aubier que pour le duramen.

Le fendillement a été la propriété mécanique la plus sensible à la variation de la température, suivi par le cisaillement et le MOR et le MOE en flexion. En outre, la teneur en humidité a été l'élément le plus important pour expliquer les propriétés mécaniques au-dessous de  $0^{\circ}\text{C}$ . En revanche, pour les températures de  $0^{\circ}\text{C}$  et plus, la masse volumique basale fut le facteur principal pour expliquer les propriétés mécaniques. La largeur des cernes de croissance n'a pas constitué un élément significatif pour prédire aucune propriété mécanique. Les résultats de ce travail devraient servir à améliorer la performance des équarrisseuses-fragmenteuses autant en hiver qu'en été.

## **Avant-propos**

Ce travail a été rédigé dans le cadre d'une maîtrise en sciences du bois et est présenté sous la forme d'un mémoire de publication. Il a été conçu à partir des normes de présentation adoptées par le comité des programmes de 2<sup>e</sup> et 3<sup>e</sup> cycles en sciences du bois de l'Université Laval, en juillet 1998. Dans le chapitre 3, on retrouve l'article scientifique rédigé en anglais intitulé : « Effects of temperature and moisture content on wood mechanical properties associated to the chipping process ». Cet article sera soumis sous peu aux fins de publication à la revue scientifique Wood and Fiber Science. Les résultats de ce mémoire ont été présentés au 78<sup>e</sup> Congrès de l'ACFAS à Montréal, Québec, le 13 mai 2010.

*A minha família, pelos esforços que fizeram  
durante minha vida de estudante.*

# Table des matières

|  |      |
|--|------|
| Remerciements.....   | ii   |
| Résumé.....  | iii  |
| Avant-propos .....   | iv   |
| Table des matières .....   | vi   |
| Liste des tableaux.....  | viii |
| Liste des figures.....   | ix   |
| Introduction.....  | 1    |
| Chapitre 1.....  | 4    |
| Revue de littérature.....  | 4    |
| 1.1 La coupe du bois.....  | 4    |
| 1.1.1 Coupe orthogonale.....   | 4    |
| 1.1.1.1 Interaction outil-bois lors de la coupe orthogonale .....                                    | 5    |
| 1.1.1.2 Formation du copeau .....  | 6    |
| 1.1.1.2.1 Coupe 90°-0° .....   | 7    |
| 1.1.1.2.2 Coupe 90°-90° .....  | 10   |
| 1.1.1.2.3 Coupe 0°-90° .....   | 10   |
| 1.1.2 Coupe périphérique.....  | 10   |
| 1.2 Les propriétés mécaniques du bois .....  | 11   |
| 1.2.1 Le cisaillement.....   | 12   |
| 1.2.2 Le fendillement.....   | 12   |
| 1.2.3 La flexion statique .....  | 13   |
| 1.2.3.1 Le module de rupture (MOR) .....   | 14   |
| 1.2.3.2 Le module d'élasticité (MOE).....  | 14   |
| 1.2.4 Facteurs qui affectent les propriétés mécaniques du bois sans défaut.....                      | 15   |
| 1.2.4.1 La température et la teneur en humidité .....  | 16   |
| 1.2.4.2 La masse volumique du bois.....  | 19   |
| 1.2.4.3 La largeur moyenne des cernes.....   | 19   |
| 1.2.4.4 Facteurs liés aux essais mécaniques .....  | 20   |
| 1.2.4.4.1 Taille des échantillons .....  | 20   |
| 1.2.4.4.2 Vitesse d'essai.....   | 21   |
| 1.2.4.4.3 Dégagement de la chaleur lors de l'essai mécanique .....                                   | 22   |
| 1.3 Procédé de fragmentation par équarrisseuse-fragmenteuse.....                                     | 22   |
| 1.3.1 Les équarrisseuses-fragmenteuses .....   | 22   |
| 1.3.2 Le procédé de formation des copeaux .....  | 25   |
| 1.3.3 Travaux antérieurs sur l'amélioration de la performance des équarrisseuses-fragmenteuses ..... | 28   |

|   |   |    |
|---|---|----|
| 1.3.4   | L'influence de la température et de la teneur en humidité sur la distribution de la taille des copeaux produits par des équarrisseuses-fragmenteuses..... | 31 |
| 1.4   | Objectifs et hypothèses de travail .....  | 33 |
| Chapitre 2.....   |   | 34 |
| Matériel et méthodes.....   |   | 34 |
| 2.1   | Matériel d'essai.....   | 34 |
| 2.2   | Préparation des échantillons .....  | 34 |
| 2.3   | Essais mécaniques.....  | 36 |
| 2.3.1   | Essais de cisaillement longitudinal .....   | 37 |
| 2.3.2   | Essais de fendillement .....  | 38 |
| 2.3.3   | Essais de flexion statique.....   | 41 |
| 2.4   | Mesures de la masse volumique basale, teneur en humidité et de la largeur moyenne des cernes de croissance .....  | 44 |
| 2.5   | Analyses statistiques des données.....  | 44 |
| Chapitre 3.....   |   | 46 |
| Article scientifique.....   |   | 46 |
| Effects of temperature and moisture content on wood mechanical properties associated to the chipping process..... |   | 46 |
| 3.1   | Abstract.....   | 46 |
| 3.2   | Introduction.....   | 48 |
| 3.3   | Materials and methods.....  | 50 |
| 3.4   | Results and discussion .....  | 55 |
| 3.4.1   | Wood properties.....  | 55 |
| 3.4.2   | Shear strength .....  | 56 |
| 3.4.3   | Cleavage strength.....  | 59 |
| 3.4.4   | Bending strength .....  | 62 |
| 3.4.5   | Sensitivity of mechanical properties to temperature variation .....   | 64 |
| 3.4.6   | Relationships among mechanical properties and MC, BD and RW .....   | 66 |
| 3.4.6.1   | Shear strength .....  | 67 |
| 3.4.6.2   | Cleavage strength.....  | 70 |
| 3.4.6.3   | Bending strength .....  | 72 |
| 3.4.6.3.1   | MOR .....   | 72 |
| 3.4.6.3.2   | MOE.....  | 75 |
| 3.5   | Conclusions and recommendations .....   | 77 |
| 3.6   | Literature cited.....   | 78 |
| Conclusions générales.....  |   | 81 |
| Bibliographie .....   |   | 84 |

## Liste des tableaux

|   |    |
|---|----|
| <b>Table 3.1.</b> Means and standard error (in parentheses) of the mean of MC, BD and RW of the two species studied. ....                                   | 56 |
| <b>Table 3.2.</b> Effects of temperature and type of wood on three mechanical properties of black spruce wood. ....   | 58 |
| <b>Table 3.3.</b> Effects of temperature and type of wood on three mechanical properties of balsam fir wood. ....   | 58 |
| <b>Table 3.4.</b> Ratios of averages of each mechanical property at -10°C and the average of 0°C, 10°C and 20°C for black spruce and balsam fir woods. .... | 65 |
| <b>Table 3.5.</b> Regression equations for shear strength obtained from independent variables of MC, BD and RW for black spruce wood. ....                  | 69 |
| <b>Table 3.6.</b> Regression equations for shear strength obtained from independent variables of MC, BD and RW for balsam fir wood. ....                    | 69 |
| <b>Table 3.7.</b> Regression equations for cleavage strength obtained from independent variables of MC, BD and RW for black spruce wood. ....               | 71 |
| <b>Table 3.8.</b> Regression equations for cleavage strength obtained from independent variables of MC, BD and RW for balsam fir wood. ....                 | 71 |
| <b>Table 3.9.</b> Regression equations for MOR obtained from independent variables of MC, BD and RW for black spruce wood. ....                             | 74 |
| <b>Table 3.10.</b> Regression equations for MOR obtained from independent variables of MC, BD and RW for balsam fir wood. ....                              | 74 |
| <b>Table 3.11.</b> Regression equations for MOE obtained from independent variables of MC, BD and RW for black spruce wood. ....                            | 76 |
| <b>Table 3.12.</b> Regression equations for MOE obtained from independent variables of MC, BD and RW for balsam fir wood. ....                              | 76 |

## Liste des figures

|   |    |
|---|----|
| <b>Figure 1.1.</b> La coupe du bois. Le bois déforme jusqu'au moment où l'effort de coupe devient plus grand que la résistance du bois (d'après Hoadley 2000). .....  | 5  |
| <b>Figure 1.2.</b> Les trois types de coupe orthogonale : le premier chiffre désigne l'angle entre l'arête tranchante de l'outil et le fil du bois et le deuxième indique l'angle entre la direction de coupe et le fil du bois (adaptée d'Hoadley 2000). .....   | 5  |
| <b>Figure 1.3.</b> Géométrie de l'interaction arête tranchante-bois et forces impliquées lors de la coupe orthogonale (adaptée de Woodson et Koch 1970). .....  | 7  |
| <b>Figure 1.4.</b> Copeau de type I, obtenu en direction 90°-0°, à un angle d'attaque de 30° et à 1,52 mm de profondeur de coupe (d'après Hernández 2009a). .....   | 9  |
| <b>Figure 1.5.</b> Copeau de type II, obtenu en direction 90°-0°, à un angle d'attaque de 20° et à 0,38 mm de profondeur de coupe (d'après Hernández 2009a). .....  | 9  |
| <b>Figure 1.6.</b> Copeau de type III, obtenu en direction 90°-0°, à un angle d'attaque de 10° et à 1,52 mm de profondeur de coupe (d'après Hernández 2009a). .....   | 9  |
| <b>Figure 1.7.</b> Méthode pour la mesure du cisaillement longitudinal du bois (adaptée de Bowyer <i>et al.</i> 2007). .....  | 13 |
| <b>Figure 1.8.</b> Action d'un coin sur un échantillon de bois produisant un fendillement suivant le fil (d'après Wangaard 1950). .....   | 15 |
| <b>Figure 1.9.</b> Essai de flexion statique avec deux bases d'appui et une charge au centre de l'échantillon. La partie supérieure est comprimée tandis que la partie inférieure est sous traction. Par contre, les contraintes sont nulles au plan horizontal central, aussi appelé axe neutre de l'échantillon (d'après Hoadley 2000). ..... | 15 |
| <b>Figure 1.10.</b> Tête porte-outils de l'équarrisseuse-fragmenteuse Comact, munie de 8 porte-couteaux. ....   | 24 |
| <b>Figure 1.11.</b> Porte-outil muni d'un couteau de type plié présentant deux parties: une plus courte qui sert à couper la surface des équarris (a) et une plus longue qui sert à fragmenter les copeaux (b). .....   | 24 |
| <b>Figure 1.12.</b> Procédé de formation des copeaux et les angles de coupe d'une fragmenteuse à disque (adaptée de McLauchlan et Lapointe 1979). .....   | 27 |
| <b>Figure 1.13.</b> Fragmentation du bois vert par fendillement (à gauche) ou par cisaillement (à droite) (adaptée de McLauchlan et Lapointe 1979). .....   | 27 |

|  |    |
|--|----|
| <b>Figure 1.14.</b> Schéma montrant l'action de coupe de la partie plus longue du couteau plié et du contre-fer des équarrisseuses-fragmenteuses Comact et Sawquip. À mesure que l'arête tranchante entre dans le bois, le couteau coupe une tranche quasiment perpendiculaire au fil du bois. Cette tranche frappe ensuite le contre-fer provoquant son éclatement et formation ainsi des copeaux (tiré d'Hernández et Quirion 1995). ..... | 28 |
| <b>Figure 2.1.</b> Distribution des échantillons pour les essais mécaniques de cisaillement longitudinal (CZ), fendillement (FD) et flexion statique (FS). A : aubier ; D : duramen ; I : moitié de la bille près de la base de l'arbre ; II : deuxième moitié. ....   | 36 |
| <b>Figure 2.2.</b> Photo montrant l'échantillon avec des protections en styromousse monté sur l'accessoire de cisaillement muni des éléments isolants de Nyloil® (en vert). .....  | 39 |
| <b>Figure 2.3.</b> Échantillon de cisaillement avec ses dimensions (rupture déjà atteinte). .....  | 39 |
| <b>Figure 2.4.</b> Détail du positionnement de l'échantillon avec des protections en styromousse lors de l'essai de fendillement. ....   | 40 |
| <b>Figure 2.5.</b> Échantillon de fendillement avec ses dimensions. ....   | 40 |
| <b>Figure 2.6.</b> Détail du placement de l'échantillon sur ses appuis avec des protections en styromousse lors de l'essai de flexion statique. ....   | 43 |
| <b>Figure 2.7.</b> Échantillon de flexion statique avec ses dimensions. ....   | 43 |
| <b>Figure 3.1.</b> Schematic representation of chipping by a chipper-canter (from Hernández and Quirion 1995). .....   | 49 |
| <b>Figure 3.2.</b> Distribution of samples for the mechanical tests of shear, cleavage and static bending. H: heartwood; S: sapwood; I: half part of the log nearest to the base of tree; II: second half of the log. ....   | 52 |
| <b>Figure 3.3.</b> Effect of wood temperature on shear strength of black spruce and balsam fir woods. ....   | 59 |
| <b>Figure 3.4.</b> Effect of wood temperature on cleavage strength of black spruce and balsam fir woods. ....  | 61 |
| <b>Figure 3.5.</b> Effect of wood temperature on MOR of black spruce and balsam fir woods. ...   | 63 |
| <b>Figure 3.6.</b> Effect of wood temperature on MOE of black spruce and balsam fir woods. ...   | 64 |

## Introduction

La production de copeaux à l'aide des équarrisseuses-fragmenteuses est largement influencée par les propriétés mécaniques du bois. Le cisaillement parallèle au fil, le fendillement et la flexion statique sont parmi les propriétés les plus importantes impliquées lors du procédé de fragmentation par ces machines. La température et la teneur en humidité du bois exercent une grande influence sur ses propriétés. En particulier, des températures en dessous du point de congélation de l'eau, associées à des humidités élevées, causent la formation de gel et par conséquent, l'augmentation de la résistance mécanique du bois.

Les industries de transformation du bois au Québec débitent les grumes à toutes les saisons, lesquelles ont des conditions climatiques très distinctes. Ainsi, il existe, à part ceux reliés à l'essence, au diamètre des billes et aux caractéristiques intrinsèques de l'équarrisseuse-fragmenteuse, des effets importants de la température et de la teneur en humidité sur le procédé de mise en copeaux. De cette manière, la connaissance de toutes ces influences sur le procédé de coupe par cette machine va aider à mieux maîtriser la production de copeaux, la rendant plus efficace et économiquement plus attrayante.

Les industries du sciage au Québec ont commencé à utiliser les équarrisseuses-fragmenteuses à partir des années 1960. L'introduction de ces équipements avait modifié à ce moment la façon d'obtenir le bois de sciage et les copeaux par ces industries. La plupart des copeaux produits par les scieries au Québec proviennent de ces machines et ce sont les équipementiers Sawquip et Comact qui sont les plus connus dans l'Est canadien.

Les équarrisseuses-fragmenteuses ont été spécialement conçues pour transformer des billes de faible diamètre en équarris et copeaux dans une seule opération, tout en minimisant la production de sciure. Les copeaux sont destinés à la fabrication de pâte par les industries papetières. Malgré les améliorations importantes qui ont été introduites au fil des années, on reconnaît encore qu'une proportion importante des copeaux produits par les équarrisseuses-fragmenteuses est considérée trop épaisse par ces industries, c'est-à-dire, ils

sont au-dessus de 8 mm d'épaisseur. Ainsi, il faut obtenir des copeaux de dimensions adéquates pour les procédés de mise en pâte et produire des équarris avec des surfaces sans défauts majeurs. De plus, l'absence de sciure représente un atout pour optimiser le rendement du procédé de transformation du bois dans les scieries.

L'équarrisseuse-fragmenteuse présente deux têtes porte-outils disposées face à face, qui tournent suivant leur axe à une vitesse constante. Chaque tête possède en général de six à huit couteaux uniformément distribués dont la forme comporte deux parties distinctes, soit une pour trancher le bois soit une autre pour fragmenter les copeaux.

Les travaux antérieurs sur les effets de la température et de la teneur en humidité sur les procédés de fragmentation des équarrisseuses-fragmenteuses montrent que la température a un effet significatif sur la distribution de dimensions des copeaux. Plus précisément, la diminution de la température au-dessous du point de congélation de l'eau entraîne la réduction de la taille des copeaux. Cette diminution de température implique ainsi l'augmentation de la proportion des copeaux acceptables pour la mise en pâte suite à la réduction de la proportion de copeaux trop gros. Dans certaines conditions, par contre, les dimensions des copeaux deviennent plus petites que celles acceptables par les industries de pâte et papiers. Cet effet de la baisse de la température est plus évident lors de l'utilisation des billes présentant des teneurs en humidité très élevées. La différence de teneurs en humidité à l'état vert entre l'aubier et le duramen des billes de conifères devient de plus un élément très important.

L'objectif principal de cette étude fut d'évaluer l'influence de la température et de la teneur en humidité du bois sur les propriétés mécaniques impliquées lors de la fragmentation par équarrisseuse-fragmenteuse. Les essences utilisées furent l'épinette noire [*Picea mariana* (Mill.) B.S.P] et le sapin baumier [*Abies balsamea* (L.) Mill.]. Les propriétés mécaniques de cisaillement longitudinal, fendillement et de flexion statique ont été déterminées sur des échantillons d'aubier et de duramen. Les essais mécaniques ont été conduits à des températures variant entre -30°C et 20°C et à des intervalles de 10°C. La teneur en

humidité des échantillons a été variable et dans tous les cas supérieure au point de saturation des fibres.

# Chapitre 1

## Revue de littérature

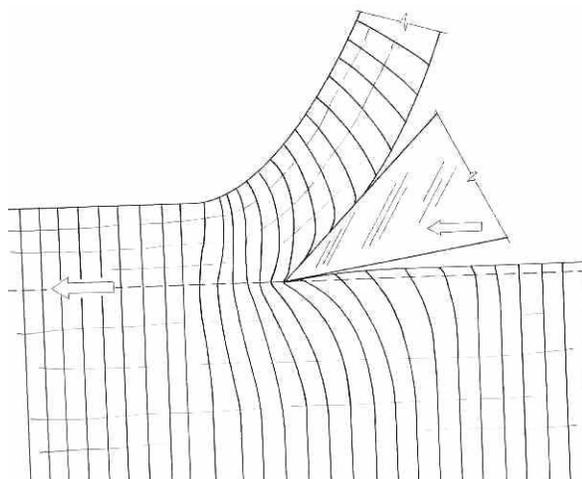
### 1.1 La coupe du bois

La coupe conventionnelle du bois résulte de l'action de l'arête tranchante d'un outil sur une pièce de bois. L'outil soumet le bois à une contrainte mécanique croissante jusqu'à sa rupture, ce qui provoque la formation de copeaux (figure 1.1). Les éléments qui influencent ce procédé sont la géométrie de l'outil, les propriétés physiques et mécaniques du bois, les défauts du bois, la direction de la coupe par rapport à l'orientation du fil, etc. La qualité de la surface du bois usiné est ainsi associée à la formation des copeaux (Hoadley 2000). La température et la teneur en humidité du bois sont des composantes qui ont une grande influence sur la qualité des surfaces et sur la formation des copeaux. Les principaux types de coupe sont la coupe orthogonale et la coupe périphérique.

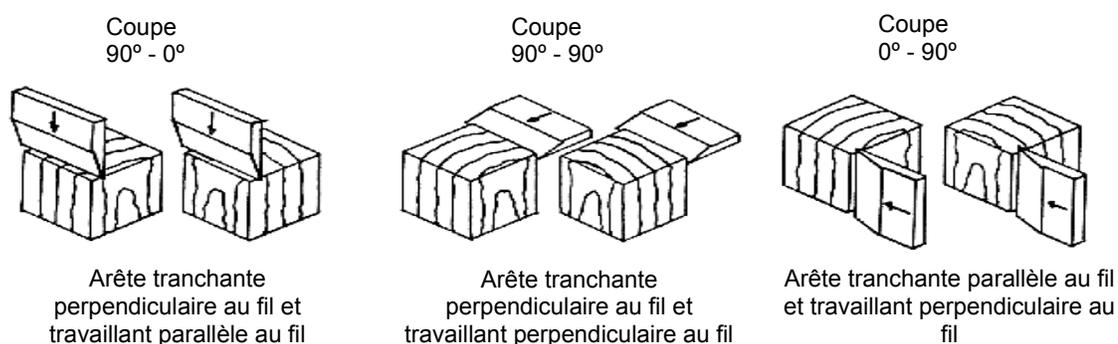
#### 1.1.1 Coupe orthogonale

Cette coupe est définie comme étant le produit de l'action de l'arête tranchante de l'outil qui est orientée perpendiculairement au déplacement de la pièce de bois. La surface obtenue est parallèle à la surface originale. La scie à ruban, la scie circulaire et la trancheuse sont des exemples de machines qui travaillent sous cette forme de coupe.

Selon McKenzie (1960), il existe trois types principaux de coupe orthogonale, chacun représenté par deux chiffres. Le premier désigne l'angle entre l'arête tranchante de l'outil et le fil du bois et le deuxième indique l'angle entre la direction de coupe et le fil du bois. Ainsi, ces trois types sont  $90^{\circ}-0^{\circ}$ ,  $90^{\circ}-90^{\circ}$  et  $0^{\circ}-90^{\circ}$  (figure 1.2).



**Figure 1.1.** La coupe du bois. Le bois déforme jusqu'au moment où l'effort de coupe devient plus grand que la résistance du bois (d'après Hoadley 2000).



**Figure 1.2.** Les trois types de coupe orthogonale : le premier chiffre désigne l'angle entre l'arête tranchante de l'outil et le fil du bois et le deuxième indique l'angle entre la direction de coupe et le fil du bois (adaptée d'Hoadley 2000).

### 1.1.1.1 Interaction outil-bois lors de la coupe orthogonale

La géométrie de l'interaction entre l'arête tranchante et le bois lors de la coupe orthogonale est souvent analysée à l'aide de trois angles de coupe : l'angle d'attaque ( $\alpha$ ), l'angle de dépouille ( $\gamma$ ) et l'angle de l'outil ( $\beta$ ) (figure 1.3). Le premier, formé entre la face d'attaque de l'outil et un plan perpendiculaire à la direction du mouvement de l'outil, régit directement les forces de coupe et, par conséquent le type de copeau et la qualité de la surface de la pièce usinée. L'angle de dépouille, existant entre la face de dépouille et la

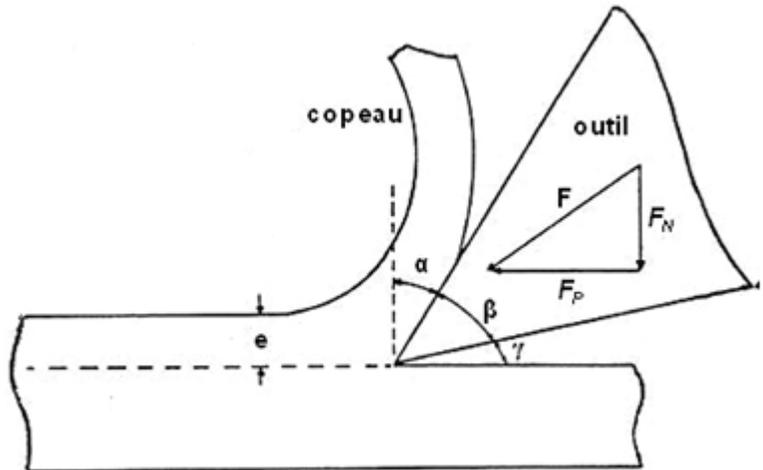
surface de travail derrière l'arête tranchante, doit être ni très élevée ni très faible, car ces conditions extrêmes peuvent entraîner soit la cassure du couteau ou soit le talonnement sur la surface de coupe. Cette dernière condition occasionne des frictions très élevées, une plus grande usure de l'outil et une mauvaise qualité de surface. Enfin, l'angle de l'outil, c'est-à-dire, l'angle compris entre la face d'attaque et la face de dépouille du couteau, conditionne la résistance de l'outil face aux efforts de coupe. En général, il faut choisir les angles d'usinage adéquats, lesquels seront entre autres fonction du type d'usinage, de l'essence de bois et de la composition de l'outil (Jodin 1994).

La force résultante du contact entre l'arête tranchante et le bois peut être décomposée en une composante parallèle ( $F_P$ ) et une autre normale ( $F_N$ ) par rapport à la surface fraîchement usinée (figure 1.3). L'intensité et le sens de ces forces vont dépendre des facteurs liés à l'outil de coupe, aux conditions de travail ainsi qu'au matériau à usiner (Koch 1985). Parmi les facteurs reliés à l'outil, on peut mentionner la vitesse de coupe, les angles de coupe, l'état d'affûtage de l'outil, la friction entre le copeau et la face d'attaque de l'outil et la vibration induite durant l'usinage. L'usure des outils entraîne l'augmentation des forces de coupe (Hernández et Rojas 2002; Hernández et de Moura 2002) de même que la diminution de l'angle d'attaque (Woodson et Koch 1970; Stewart 1977). Les facteurs d'aménagement (la hauteur et largeur de coupe, vitesse, orientation du fil par rapport à la coupe, centrage de la bille, etc.) et les facteurs associés au bois (essence, propriétés physiques et mécaniques, etc.) affectent également les forces de coupe orthogonale.

### **1.1.1.2 Formation du copeau**

Le mode de rupture dans le bois détermine le type de copeau qui sera formé, ce qui va influencer à son tour la qualité de surface du bois usiné (Stewart 1988). Les principaux facteurs qui affectent la formation des copeaux sont la géométrie de l'outil, les propriétés physiques et mécaniques du bois et l'orientation de l'arête tranchante et de la direction de coupe par rapport à l'orientation du fil.

- $F$  = force résultante  
 $F_N$  = force normale  
 $F_P$  = force parallèle  
 $e$  = épaisseur du copeau  
 $\alpha$  = angle d'attaque  
 $\beta$  = angle de coupeau  
 $\gamma$  = angle de dépouille



**Figure 1.3.** Géométrie de l'interaction arête tranchante-bois et forces impliquées lors de la coupe orthogonale (adaptée de Woodson et Koch 1970).

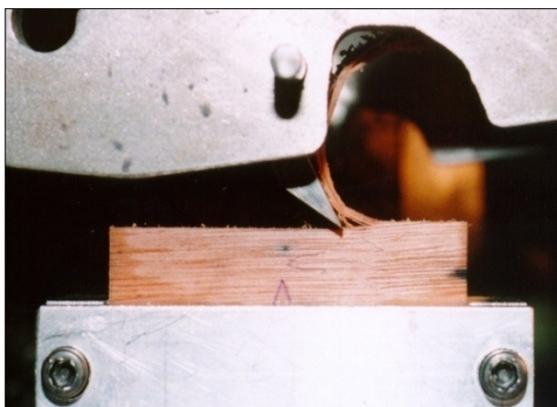
### 1.1.1.2.1 Coupe 90°-0°

La coupe 90°-0° suit une direction parallèle au fil du bois comme celle du tranchage longitudinal et du rabotage manuel. Selon Franz (1958), ce type de coupe est responsable de la formation de trois genres de copeaux : I, II et III.

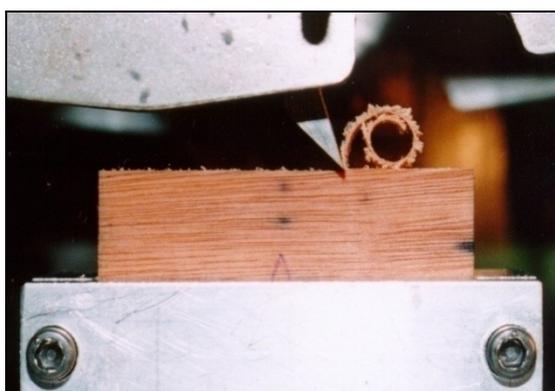
Le copeau de type I (figure 1.4) est de nature cyclique. Il est créé à partir du moment où le bois fend devant l'arête tranchante suivant la direction du fil. Le copeau se détache ensuite comme une poutre encastrée en porte-à-faux au fur et à mesure que l'outil avance, jusqu'au moment où les forces de flexion imposées au copeau sont plus grandes que la résistance du bois. Ensuite, un autre cycle commence. La longueur du copeau est conditionnée par le rapport entre la résistance au fendillage et la rigidité et résistance à la flexion. Les facteurs qui favorisent sa formation sont un angle d'attaque élevé (25° ou plus), un faible coefficient de friction entre le copeau et l'arête tranchante, un bois avec une faible teneur en humidité, une faible résistance au fendage et une résistance à la flexion élevée. Le travail dans ces conditions est caractérisé par une faible consommation d'énergie et par une usure des outils relativement réduite. Par contre, ce type de copeau génère souvent le défaut du type fil arraché.

Le copeau de type II (figure 1.5) se forme sous l'action des contraintes de cisaillement diagonal créées par la compression longitudinale de l'outil tranchant sur le bois. Ainsi, un copeau continu en forme de spirale est formé, ce qui entraîne une surface de bonne qualité. Les facteurs qui favorisent la formation de ce type de copeau sont des angles d'attaque entre  $5^{\circ}$  et  $20^{\circ}$  et des teneurs en humidité intermédiaires. Par contre, l'énergie de coupe et l'usure de l'outil sont plus grandes que celles requises lors de la formation du copeau de type I.

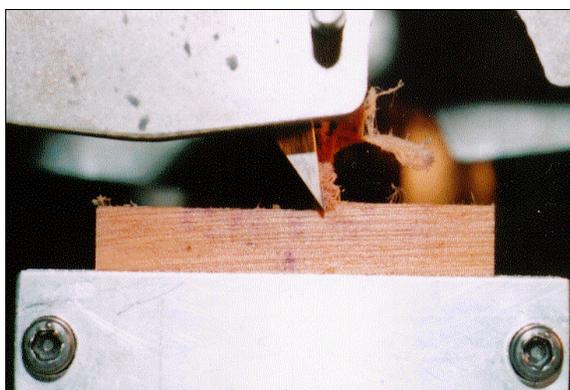
Finalement, le copeau du type III (figure 1.6) est obtenu de façon cyclique par des contraintes de compression et de cisaillement longitudinal. Cela peut être produit lors de l'utilisation d'une arête tranchante émoussée ou d'un angle d'attaque faible. Le copeau a de la difficulté à s'échapper et se casse en petits morceaux sans forme définie, se faisant compacter contre la face de l'outil. Cela provoque la formation de surfaces de mauvaise qualité, avec l'apparition de défauts tels que le grain laineux ou pelucheux et le fil soulevé. La consommation d'énergie et l'usure de l'outil sont plus élevées que celles produites par les deux autres types de copeau.



**Figure 1.4.** Copeau de type I, obtenu en direction  $90^{\circ}-0^{\circ}$ , à un angle d'attaque de  $30^{\circ}$  et à 1,52 mm de profondeur de coupe (d'après Hernández 2009a).



**Figure 1.5.** Copeau de type II, obtenu en direction  $90^{\circ}-0^{\circ}$ , à un angle d'attaque de  $20^{\circ}$  et à 0,38 mm de profondeur de coupe (d'après Hernández 2009a).



**Figure 1.6.** Copeau de type III, obtenu en direction  $90^{\circ}-0^{\circ}$ , à un angle d'attaque de  $10^{\circ}$  et à 1,52 mm de profondeur de coupe (d'après Hernández 2009a).

### **1.1.1.2.2 Coupe 90°-90°**

Ce mode de coupe est caractérisé par une arête tranchante orientée en direction perpendiculaire au fil du bois et agissant aussi perpendiculairement au fil. Le copeau est formé à partir de la déformation du bois par cisaillement transversal et flexion, ce qui provoque la plus haute consommation d'énergie parmi les trois principaux modes de coupe. Des exemples de machines qui travaillent avec ce type de coupe sont la scie à ruban et les scies circulaires travaillant en coupe longitudinale (McKenzie 1960).

### **1.1.1.2.3 Coupe 0°-90°**

Les efforts en coupe 0°-90° sont généralement plus faibles que ceux impliqués lors de la coupe 90°-0°. La formation du copeau se fait à partir de la formation de trois zones de rupture, soit par traction, par cisaillement et par flambage. Si le couteau utilisé est bien affûté et orienté avec un angle d'attaque élevé, le copeau sera obtenu de manière continue. Le déroulage traditionnel, le tranchage, et le tournage sont des exemples de machines qui travaillent avec ce type de coupe (McKenzie 1960).

## **1.1.2 Coupe périphérique**

La coupe périphérique est produite par des couteaux installés sur un porte-outil rotatif. Les copeaux sont formés de façon intermittente, car l'action de l'arête tranchante n'est pas continue comme dans la coupe orthogonale. La surface obtenue est caractérisée par une séquence successive de traces de couteaux. La coupe périphérique peut être réalisée de deux façons : par travail en avalant, où le déplacement du bois et la trajectoire de l'outil vont dans le même sens, et par travail en opposition, où le sens du déplacement est opposé à la trajectoire de l'outil. La toupie, la raboteuse et la dégauchisseuse sont des exemples d'outils qui travaillent en mode périphérique.

## 1.2 Les propriétés mécaniques du bois

Les propriétés mécaniques du bois sont sollicitées entre en jeu aussitôt qu'une force est appliquée sur une pièce de bois. Selon Panshin et de Zeeuw (1980), la force appliquée sur une pièce de bois divisée par une unité de surface est définie comme une contrainte ( $\sigma$ ). Il existe trois types de contraintes primaires:

- Contrainte de compression : la dimension de l'élément est réduite;
- Contrainte de traction : la dimension de l'élément est augmentée;
- Contrainte de cisaillement : déplacement parallèle au plan de contact entre deux parties d'une pièce.

À ces contraintes, s'ajoute la contrainte de flexion, laquelle est une combinaison de ces trois contraintes primaires.

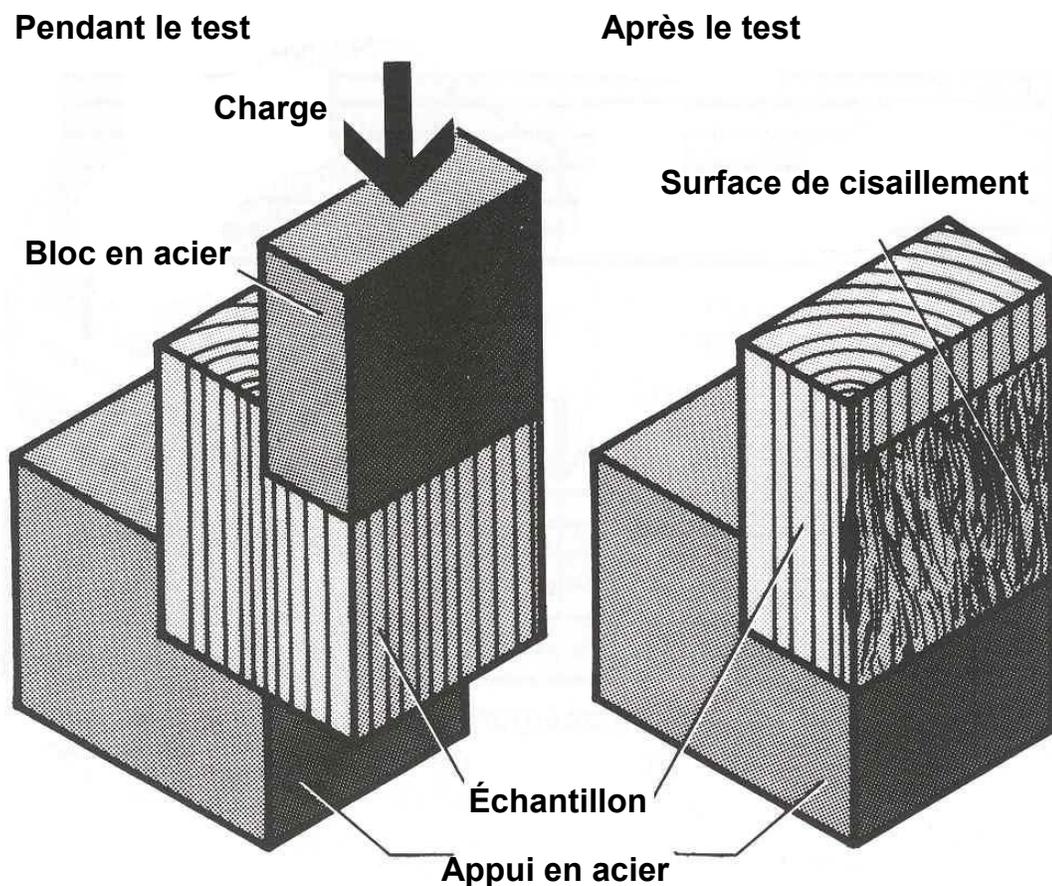
La déformation du bois due à l'action d'une contrainte est le résultat de deux facteurs qui agissent simultanément et indépendamment: la déformation élastique et la déformation plastique. Le premier facteur est engendré par le comportement élastique des microfibrilles de cellulose du bois qui montrent une réponse élastique à l'application d'une contrainte. Dans ce cas, après l'action de la contrainte, le bois revient à son état initial, sans déformation permanente. Par contre, les propriétés de fluage de la lignine sont responsables du deuxième facteur, la déformation plastique du bois dans le temps. L'application d'une charge qui dépasse la limite élastique du bois implique donc une déformation permanente. La récupération de la déformation permanente du bois est lente et correspond normalement seulement à la moitié de la déformation totale (Panshin et de Zeeuw 1980).

### 1.2.1 Le cisaillement

La résistance au cisaillement exprime l'habilité du bois à résister aux forces qui ont une tendance à faire glisser une partie de la pièce sur une autre partie adjacente à ce même matériau. Les forces qui la produisent sont classifiées selon la direction de sollicitation, soit : cisaillement parallèle (longitudinal) au fil, cisaillement perpendiculaire (transversal) au fil et cisaillement oblique au fil (Wangaard 1950). La figure 1.7 montre une méthode de mesure de la résistance au cisaillement parallèle au fil. Cette contrainte est présente dans les poutres et, pour ce motif, il est important de la considérer lors de leur dimensionnement. Ainsi, lorsqu'une poutre est soumise à une charge, les couches horizontales du bois tentent de glisser les unes sur les autres, produisant des contraintes de cisaillement (Bowyer *et al.* 2007). La résistance du bois au cisaillement transversal est environ trois à quatre fois plus élevée que celle du cisaillement longitudinal (Kollmann et Côté 1968) de telle manière que seulement des essais de cisaillement longitudinal sont réalisés (Bodig et Jayne 1982). Wangaard (1950) ajoute que la direction de la surface de rupture par rapport aux cernes n'affecte pas significativement la résistance au cisaillement longitudinal de petits échantillons sans défauts verts ou secs.

### 1.2.2 Le fendillement

Le fendillement décrit l'action qui fendille le bois suivant le fil. C'est la résistance que le bois offre au fendage. Une contrainte de fendage exerce une action similaire à un coin (figure 1.8). Une faible résistance au fendillement est désirée quand le bois doit porter des clous ou des vis. Dans les tests normalisés de laboratoire, les échantillons subissent des efforts de fendage dans un plan de rupture parallèle au fil, suivant une direction radiale ou tangentielle. La plupart des bois fendent plus facilement suivant les rayons que suivant les cernes. Ainsi, cette différence est plus accentuée chez les essences à gros rayons, comme le chêne. Une essence qui possède une grande rigidité, comme par exemple le pin des marais, est plus facile à fendre qu'une dont la rigidité est faible et la cohésion perpendiculaire au fil est élevée (Wangaard 1950).



**Figure 1.7.** Méthode pour la mesure du cisaillement longitudinal du bois (adaptée de Bowyer *et al.* 2007).

### 1.2.3 La flexion statique

L'essai de flexion est un des essais mécaniques du bois les plus populaires (Bodig et Jayne 1982) et il est considéré statique lorsque la charge est graduellement appliquée (Wangaard 1950). La figure 1.9 illustre un essai de flexion statique. La contrainte de compression cause un raccourcissement des fibres du côté supérieur de la pièce tandis que les contraintes de traction impliquent une elongation des fibres du côté inférieur. Par contre, au plan horizontal central de l'échantillon, appelé axe neutre, les contraintes sont nulles. Les contraintes de cisaillement longitudinales, à leur tour, ont une tendance à séparer longitudinalement les fibres à l'axe neutre de la pièce, soit entre le côté supérieur et le côté

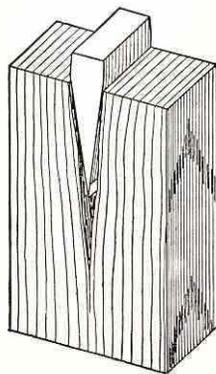
inférieur (Wangaard 1950). Ainsi, bien que cet essai soit simple à conduire, l'analyse des données obtenues est un peu plus complexe que celle d'autres essais mécaniques (Bodig et Jayne 1982). Les essais de flexion de bois de charpente sont utiles pour l'évaluation de l'influence des caractéristiques de croissance, méthodes de séchage et de traitements avec des produits de préservation ou des produits chimiques retardateurs de feu sur les propriétés mécaniques du bois. Plusieurs paramètres peuvent être calculés après la prise de données de flexion. Parmi eux, on remarque le module de rupture (MOR) et le module d'élasticité (MOE) (Bodig et Jayne 1982).

### **1.2.3.1 Le module de rupture (MOR)**

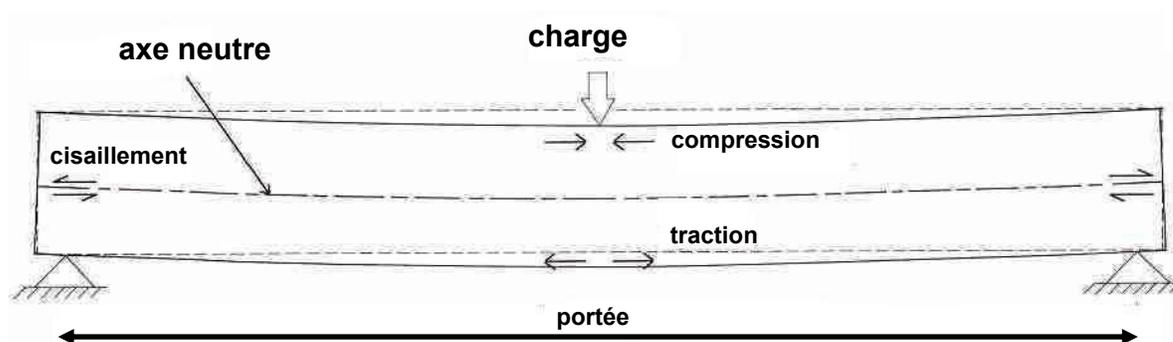
Le MOR est une des mesures de résistance à la flexion les plus utilisées (Bodig et Jayne 1982) et est exprimé comme la contrainte appliquée à la rupture divisée par l'unité de surface. Ce paramètre est calculé comme la contrainte maximale des fibres du côté supérieur et du côté inférieur. Les valeurs de MOR servent à évaluer, par exemple, le potentiel d'un matériau pour l'utilisation comme poutres et solives (Wangaard 1950).

### **1.2.3.2 Le module d'élasticité (MOE)**

Selon Wangaard (1950), le MOE exprime la rigidité du bois, c'est-à-dire, la capacité de résister à la déformation induite par une charge appliquée seulement jusqu'à la limite proportionnelle. Ce paramètre est obtenu à partir du rapport contrainte/déformation et par la dérivation des valeurs obtenues des essais de flexion statique. Le MOE sert à calculer la déformation de poutres et solives et aussi pour le calcul de charges sécuritaires et de contraintes admissibles pour des colombages et colonnes.



**Figure 1.8.** Action d'un coin sur un échantillon de bois produisant un fendillement suivant le fil (d'après Wangaard 1950).



**Figure 1.9.** Essai de flexion statique avec deux bases d'appui et une charge au centre de l'échantillon. La partie supérieure est comprimée tandis que la partie inférieure est sous traction. Par contre, les contraintes sont nulles au plan horizontal central, aussi appelé axe neutre de l'échantillon (d'après Hoadley 2000).

### 1.2.4 Facteurs qui affectent les propriétés mécaniques du bois sans défaut

Les principales propriétés mécaniques du bois sont en général déterminées à partir de petits échantillons sans défaut (Bodig et Jayne 1982). Le bois est un matériau naturel et l'arbre est sujet à plusieurs influences internes et environnementales, ce qui implique une variation des propriétés mécaniques même d'un matériel libre de défauts majeurs (FPL 1999). En outre, la résistance mécanique varie largement à l'intérieur d'une espèce et entre les espèces de bois (Bowyer *et al.* 2007). Selon Palka (1973), en général, les propriétés mécaniques du

bois dépendent d'une interaction complexe entre la masse volumique, la teneur en humidité, la température ainsi que le taux, la durée et l'histoire de l'application de la contrainte.

#### **1.2.4.1 La température et la teneur en humidité**

L'influence de la température sur les propriétés du bois dépend du temps de l'exposition, de la teneur en humidité, de l'essence et de la grandeur de la pièce de bois. Une exposition longue à des températures supérieures à 100°C peut entraîner des modifications irréversibles, accompagnées de pertes de résistance et de masse. Par contre, lors d'expositions rapides à des températures inférieures à 100°C, le bois change temporairement son état interne d'énergie et ses propriétés reviennent à leur état normal au moment de l'exposition à des températures régulières (FPL 1999; Green *et al.* 1999; Green et Evans 2008).

En général, le bois devient plus résistant lors d'une baisse de la température et moins résistant à mesure qu'il est chauffé (Siimes 1967; Koran 1979; Gerhards 1982; Mishiro 1990; FPL 1999; Green *et al.* 1999; Deomano et Zink-Sharp 2004; Bowyer *et al.* 2007; Green et Evans 2008). Il y a une relation quasi linéaire entre les propriétés mécaniques du bois et la température à une teneur en humidité fixe et avec des températures plus basses que 150°C (FPL 1999). La variation de la teneur en humidité a une influence sur toutes les propriétés physiques et mécaniques du bois (Panshin et de Zeeuw 1980). La diminution de la teneur en humidité au-dessous du point de saturation des fibres (PSF) implique l'augmentation de la plupart des propriétés mécaniques. À mesure que l'eau est enlevée de la paroi cellulaire, les molécules à longue chaîne s'approchent et la paroi cellulaire devient plus compacte (Gerhards 1982; FPL 1999; Bowyer *et al.* 2007). L'augmentation de la résistance mécanique du bois due à de basses températures est plus évidente quand la teneur en humidité est plus grande que le PSF, car la portion de l'eau liquide congèle à 0°C, gonfle et renforce la résistance du bois (Mishiro et Asano 1984; Mishiro 1990). Ainsi, le gel peut jouer un rôle considérable sur l'élévation de la résistance mécanique du bois,

principalement à des teneurs en humidité élevées. Pour le MOE, Koran (1979) précise qu'il est difficile de déterminer l'effet réel des températures froides étant donné que plusieurs variables interagissent en même temps d'une manière complexe. Cet auteur affirme que la rigidité engendrée par le gel n'atteint son intensité maximale qu'au moment où toute l'eau de la paroi cellulaire est congelée. La présence de différentes tailles et formats de capillaires ainsi que la teneur en extraits peuvent provoquer que la congélation totale de l'eau cellulaire se fasse à des températures plus basses que 0°C. Dans le cas de l'eau liée, la congélation n'arrive qu'au-dessous de -18°C (Koran 1979).

Plusieurs auteurs ont étudié l'effet de la variation de la température et de la teneur en humidité sur les propriétés mécaniques des échantillons sans défaut. Gerhards (1982) a fait une large compilation de données sur ce sujet. Dans ce travail, l'auteur montre qu'au-dessus du PSF, le MOR et le MOE en flexion statique sont, respectivement, 110% et 50% plus élevés à -50°C qu'à 20°C. Mishiro et Asano (1984) ont étudié ces mêmes propriétés pour des échantillons de bois de *Picea* pour des teneurs en humidité entre 50% et 210%. La baisse de température de 20°C à -30°C a entraîné, à 50% de teneur en humidité, une augmentation de 130% et 86% pour le MOR et MOE, respectivement. À 210% de teneur en humidité, l'augmentation a été de 485% pour le MOR et de 220% pour le MOE. Ainsi, le MOR a été plus sensible à la baisse de la température et cette sensibilité augmente au fur et à mesure que la teneur en humidité augmente. Green *et al.* (1999) et Green et Evans (2008) ont évalué l'effet du changement de la température sur le MOE des colombages de 2 x 4 verts et secs de sapin douglas, de pin du sud, du groupe d'épinette-pin-sapin et de la pruche de l'Ouest. Ces auteurs ont observé que la diminution de la température a un effet plus important sur l'augmentation du MOE pour le bois vert que pour le bois sec. De plus, ils indiquent que la teneur en humidité du bois vert est un facteur déterminant pour cette augmentation seulement pour des températures au-dessous de -18°C. Koran (1979) a signalé une augmentation du MOE du bois vert d'épinette noire au-dessous de 0°C à partir de l'observation de la diminution de la déformation et de la hausse de la rupture abrupte des échantillons lors des essais de traction perpendiculaire au fil. L'auteur explique que l'augmentation de cette propriété mécanique peut être interprétée partiellement par l'effet de renforcement du treillis de gel dans la paroi cellulaire, par le raidissement de la paroi

cellulaire et par l'augmentation des forces de cohésion engendrées par la contraction thermique.

Les températures inférieures à 0°C jouent aussi un rôle considérable sur le comportement mécanique des rameaux vivants. Umbanhowar *et al.* (2008) ont rapporté une hausse du MOE de 13% à 304% pour des rameaux gelés de conifères. Cette augmentation de la rigidité est très importante afin que l'arbre puisse maintenir intact son embranchement pendant l'accumulation de la neige en hiver.

Cependant, la résistance mécanique du bois peut être affectée lorsque la température descend trop rapidement. Selon Koran (1979), pendant la préparation des échantillons pour des essais mécaniques de traction perpendiculaire, des taux élevés de refroidissement pour atteindre des températures de -60°C et -190°C peuvent réduire la résistance mécanique du bois. Cette réduction serait due à la formation de fentes dans les éprouvettes pendant le refroidissement. Ainsi, ces fentes produites par le refroidissement trop rapide impliquent une contraction irrégulière et une augmentation non uniforme du volume de l'échantillon durant la formation du gel. Il suggère ainsi un refroidissement des échantillons plus graduel.

Par ailleurs, quelques travaux ont analysé l'effet de la température sur la déformation et sur l'énergie de rupture du bois lors des essais de traction perpendiculaire au fil (Koran 1979, 1981; Kwasniakova *et al.* 1996) et de cisaillement parallèle au fil (Johansson *et al.* 1997). Ces chercheurs expliquent que l'augmentation de la température implique une diminution de l'énergie de rupture tandis que la déformation du bois augmente. Ces résultats ont d'importantes implications dans l'industrie de pâtes et papiers dans un contexte de réduction de la consommation d'énergie lors des procédés de séparation des fibres du bois.

### **1.2.4.2 La masse volumique du bois**

La masse volumique est le principal facteur pour estimer les propriétés mécaniques du bois sans défaut, car elle mesure la quantité relative de matériau solide de la paroi cellulaire. Cependant, pour déterminer plus précisément la résistance mécanique du bois, il faut considérer la proportion des composantes de la paroi cellulaire et la quantité des substances extractibles (Wangaard 1950; Panshin et de Zeeuw 1980; FPL 1999; Hernández 2007). Bodig et Jayne (1982) précisent que la masse volumique de la matière ligneuse est quasiment constante pour toutes les espèces et varie entre 1508 kg/m<sup>3</sup> et 1542 kg/m<sup>3</sup>. De cette façon, la grande variation de masse volumique existant dans une essence ou entre les essences est occasionnée principalement par des différences anatomiques exprimées sous la forme de la porosité. Les principales caractéristiques anatomiques mentionnées par ces auteurs sont la taille et forme des cellules, l'épaisseur de la paroi cellulaire, la proportion de bois final et la proportion de rayons ligneux. Par ailleurs, la masse volumique du bois est influencée aussi par des facteurs génétiques et environnementaux étant donné que ces éléments affectent également la structure du bois (Heger 1974). La variation de la masse volumique n'affecte pas avec une même intensité les différentes propriétés mécaniques du bois. Des propriétés telles que la compression axiale, le MOR et le MOE en flexion augmentent presque linéairement avec l'accroissement de la masse volumique tandis que d'autres comme la dureté de la surface ont des relations exponentielles avec cette propriété (Bowyer *et al.* 2007).

### **1.2.4.3 La largeur moyenne des cernes**

La largeur des cernes est un moyen d'évaluation du taux de croissance radiale d'un arbre (Zhang 1995; Bowyer *et al.* 2007). La masse volumique moyenne du bois des conifères n'est pas généralement liée avec le taux de croissance, mais plutôt avec la proportion de bois final dans le cerne (Bowyer *et al.* 2007). Dans ce cas, l'augmentation du taux de croissance implique une augmentation proportionnelle de la quantité de bois initial (plus léger) dans le cerne tandis que la quantité de bois final (plus dense) augmente un peu.

Ainsi, plus élevé le taux de croissance, plus grande est la proportion de bois initial et conséquemment moins dense est le bois dans son ensemble. Cependant, cette relation peut varier selon l'essence et la région de croissance de l'arbre.

Divers auteurs ont fait des études plus approfondies sur ce sujet. Zhang (1995) a étudié la relation entre le taux de croissance et la masse volumique du bois, le MOR et le MOE de seize espèces. Pour les espèces du genre *Picea* et *Abies*, le taux de croissance a eu une corrélation négative avec la masse volumique, le MOR et le MOE, mais significative uniquement pour ces deux dernières propriétés mécaniques. Le taux de croissance a eu un effet plus important sur le MOR que sur le MOE. D'après ce même auteur, pour ces deux genres, la corrélation entre le taux de croissance et les propriétés physico-mécaniques est déterminée par des variations de la structure du bois, plus précisément par la proportion de bois initial et de bois final. Finalement, le taux de croissance pour ces genres affecte directement les propriétés mécaniques, indépendamment de son effet indirect sur la masse volumique (Zhang 1995). Koubaa *et al.* (2000, 2005) ont rapporté une corrélation négative entre la masse volumique et le taux de croissance du bois d'épinette noire. Koubaa *et al.* (2005) ajoutent que la croissance rapide de l'épinette noire implique une faible densité, une faible proportion de bois final, un bois non uniforme et une proportion élevée de bois de jeunesse. D'autre part, des taux de croissance lents entraînent une masse volumique élevée, une haute proportion de bois final, un bois homogène et une faible proportion de bois de jeunesse.

#### **1.2.4.4 Facteurs liés aux essais mécaniques**

##### **1.2.4.4.1 Taille des échantillons**

À mesure que la taille des échantillons augmente, les facteurs qui affectent les propriétés mécaniques du bois deviennent plus importants (Wangaard 1950; Bodig et Jayne 1982). Ainsi, Lang et Kovacs (2001) expliquent que l'augmentation des dimensions des échantillons implique l'augmentation de la probabilité d'occurrence de défauts de

croissance. Bodig et Jayne (1982) ont mentionné que l'effet de la dimension des éprouvettes est souvent expliqué par trois facteurs, soit: par la probabilité d'occurrence de fractures, par la concentration de contraintes et par l'hétérogénéité du matériau.

Okkonen et River (1989) ont étudié l'effet de la réduction d'à peu près 50% de la taille d'échantillons sur la résistance au cisaillement de quatre espèces, parmi ces dernières le *Pinus* spp et le *Pseudotsuga menziesii*. Ils ont rapporté une augmentation moyenne de 11% de la résistance mécanique d'éprouvettes de bois solide de taille réduite sans décalage. Lang (1997) a décrit une nouvelle méthode d'essai de cisaillement parallèle au fil qui serait plus près de l'état de cisaillement pur. L'essence fut le *Liriodendron tulipiferae* et l'échantillon avait une surface de cisaillement de 625 mm<sup>2</sup>, contre 2500 mm<sup>2</sup> indiqué par la norme ASTM D-143. La résistance au cisaillement fut 15% plus grande que celle obtenue par l'essai préconisé par la norme. Plus tard, Lang et Kovacs (2001) ont évalué l'effet de la taille des échantillons de *Liriodendron tulipiferae* sur la résistance au cisaillement. Ils ont constaté que faire varier la longueur et la largeur des éprouvettes de 25 mm à 50 mm n'a eu aucun effet significatif sur cette propriété mécanique. Ils ajoutent que, pour l'essence et les paramètres de l'étude, d'autres caractéristiques comme le support des échantillons et l'application de la force sont des facteurs plus importants à prendre en compte pour la détermination de la résistance au cisaillement.

#### **1.2.4.4.2 Vitesse d'essai**

Généralement, les essais mécaniques statiques sont conduits à une vitesse telle que l'on puisse atteindre la charge maximale en à peu près cinq minutes (FPL 1999). Selon Wangaard (1950), la résistance mécanique du bois varie avec le taux de déplacement de la machine d'essai, mais cet effet n'est pas très marquant. Ainsi, une variation de 25% de la vitesse de chargement n'affecte pas les résultats alors qu'un changement de 50% de cette vitesse implique une variation de seulement 2% de la résistance mécanique du bois. Néanmoins, si la charge maximale est obtenue en seulement une seconde, la résistance du bois augmente d'environ 10% par rapport à un essai statique (FPL 1999). L'influence de la

vitesse d'essai sur la résistance à la traction radiale d'échantillons saturés et secs à l'air de *Pinus radiata* fut étudiée par Cousins (1974). D'après cet auteur, la vitesse d'essai et la résistance à la traction sont directement proportionnelles autant pour le bois saturé que pour le bois sec, mais l'effet est plus important pour le premier. Cousins (1974) ajoute que les résistances du bois initial et bois final saturés furent les mêmes tandis que pour le bois sec, la résistance du bois initial fut 20% plus basse que pour le bois final. Nadeau *et al.* (1982) ont aussi trouvé un effet positif de la vitesse d'essai sur la résistance mécanique du bois. Dans ce cas, l'augmentation de la vitesse d'essai fut directement reliée à la résistance à la flexion des échantillons de sapin douglas à 11% de teneur en humidité, mais uniquement pour ceux sans entaille.

#### **1.2.4.4.3 Dégagement de la chaleur lors de l'essai mécanique**

Une partie de l'énergie mécanique appliquée aux échantillons lors de l'essai mécanique est libérée sous forme de chaleur. Koran (1979) a remarqué cet effet lors de la détermination du MOE à partir d'un essai de traction perpendiculaire au fil à des températures inférieures à 0°C. Ainsi, la chaleur libérée tend à faire fondre la glace des échantillons réduisant ainsi la rigidité du bois, sauf pour des températures inférieures à -40°C. Dans ce cas, l'effet de la libération de chaleur est surmonté par des températures assez basses.

### **1.3 Procédé de fragmentation par équarrisseuse-fragmenteuse**

#### **1.3.1 Les équarrisseuses-fragmenteuses**

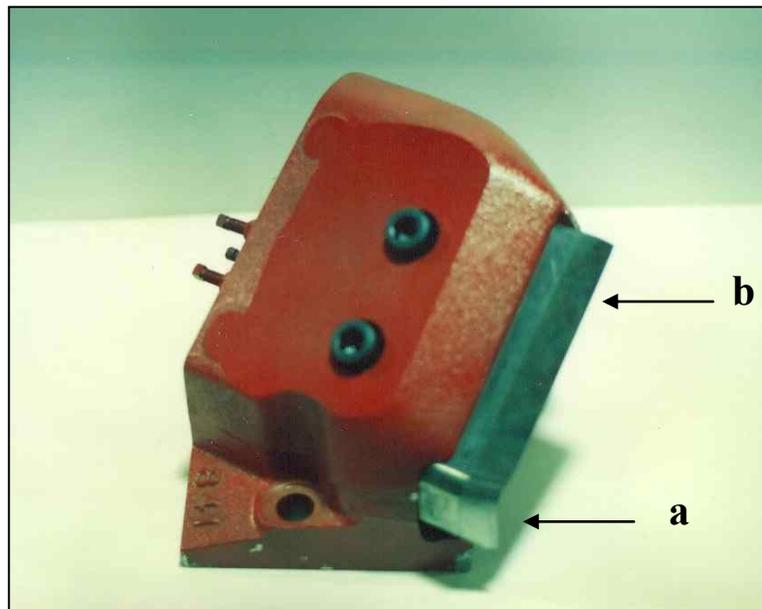
Les industries du sciage au Québec ont commencé à utiliser les équarrisseuses-fragmenteuses à partir des années 1960. L'introduction de ces équipements avait modifié à cette époque la façon d'obtenir le bois de sciage et des copeaux par ces industries. La plupart des copeaux produits par les scieries au Québec proviennent de ces machines, étant les équipementiers Sawquip et Comact les plus connus dans l'Est canadien.

L'équarrisseuse-fragmenteuse possède deux têtes porte-outils placées face à face et qui tournent suivant leur axe à une vitesse constante (figure 1.10). Chaque tête est composée de six ou huit porte-couteaux, chacun avec un contre-fer et un couteau. Les couteaux sont uniformément distribués autour de la tête et leur forme comporte deux parties distinctes, soit une plus courte servant à trancher le bois soit une plus longue qui fragmente les copeaux (figure 1.11) (Hernández et Quirion 1993, 1995; Hernández et Lessard 1997; Hernández et Boulanger 1997).

Ces machines ont été spécialement développées pour la transformation primaire des billes de faible diamètre en équarris et copeaux dans une unique opération, sans produire une grande quantité de sciure. Cependant, malgré les progrès importants apportés à la fabrication de cette machine, elle produit encore une proportion importante de copeaux considérés trop épais, c'est-à-dire, au-dessus de 8 mm d'épaisseur. Il faut alors essayer d'augmenter la production de copeaux avec des dimensions adéquates pour les procédés de mise en pâte (Hernández et Quirion 1993, 1995; Hernández et Lessard 1997; Hernández et Boulanger 1997). Il faut également produire des équarris avec des surfaces exemptes de défauts majeurs (Hernández *et al.* 2010). De plus, la réduction de la proportion de sciure représente une hausse du rendement du procédé de transformation des billes en bois de sciage (Hernández 2009b).



**Figure 1.10.** Tête porte-outils de l'équarrisseuse-fragmenteuse Comact, munie de 8 porte-couteaux.



**Figure 1.11.** Porte-outil muni d'un couteau de type plié présentant deux parties: une plus courte qui sert à couper la surface des équarris (a) et une plus longue qui sert à fragmenter les copeaux (b).

### 1.3.2 Le procédé de formation des copeaux

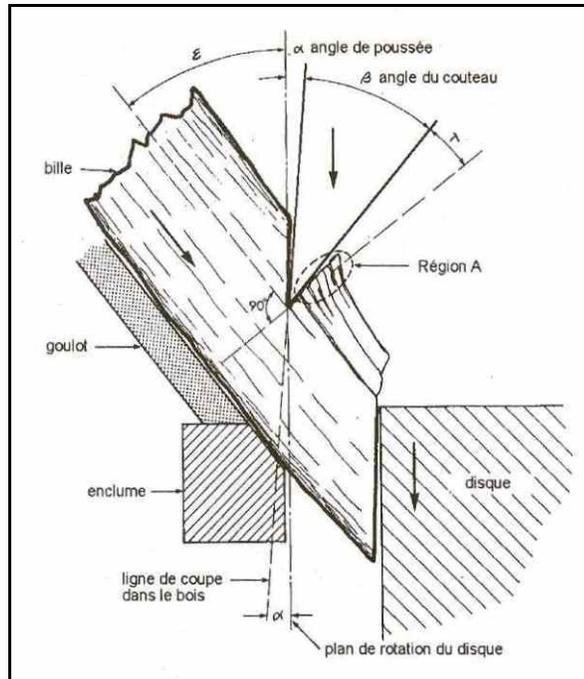
Au Québec, environ la moitié de la fibre brute utilisée par les industries des pâtes et papiers vient des copeaux (Parent 2010) dont la majeure partie est produite par les équarrisseuses-fragmenteuses (Hernández et Quirion 1993). La qualité des copeaux affecte directement la production de la pâte et, en conséquence, ses propriétés. À ce sujet, McLauchlan et Lapointe (1979) ont rapporté que les caractéristiques des copeaux les plus recherchées pour les procédés de mise en pâte sont l'uniformité d'épaisseur et de longueur et l'absence de fibres courtes ou endommagées. Encore selon ces auteurs, la taille de copeaux peut varier en fonction des exigences du type de fabrication de pâte et des équipements des industries. En général, les dimensions varient entre 15 et 30 mm de longueur et de 3 à 9 mm d'épaisseur. D'après Rodden (1986), la classe des copeaux acceptables, c'est-à-dire, celle qui produit une pâte homogène, est située entre 2 et 8 mm d'épaisseur pour les bois résineux. Il y a un consensus que l'épaisseur des copeaux joue un rôle principal dans la fabrication de divers types de pâtes. Afin d'améliorer le procédé de fragmentation pour uniformiser les dimensions des copeaux et réduire l'endommagement des fibres, il faut bien comprendre le processus de formation des copeaux.

Le procédé de formation des copeaux est complexe et comporte divers facteurs dont l'interaction est difficile à prévoir. La réponse au changement d'un paramètre du procédé de fragmentation dépend des valeurs d'autres facteurs liées au bois et aux paramètres de coupe (McLauchlan et Lapointe 1979; Fuller 1983; Uhmeier 1995; Hellström *et al.* 2008; Hellström *et al.* 2009).

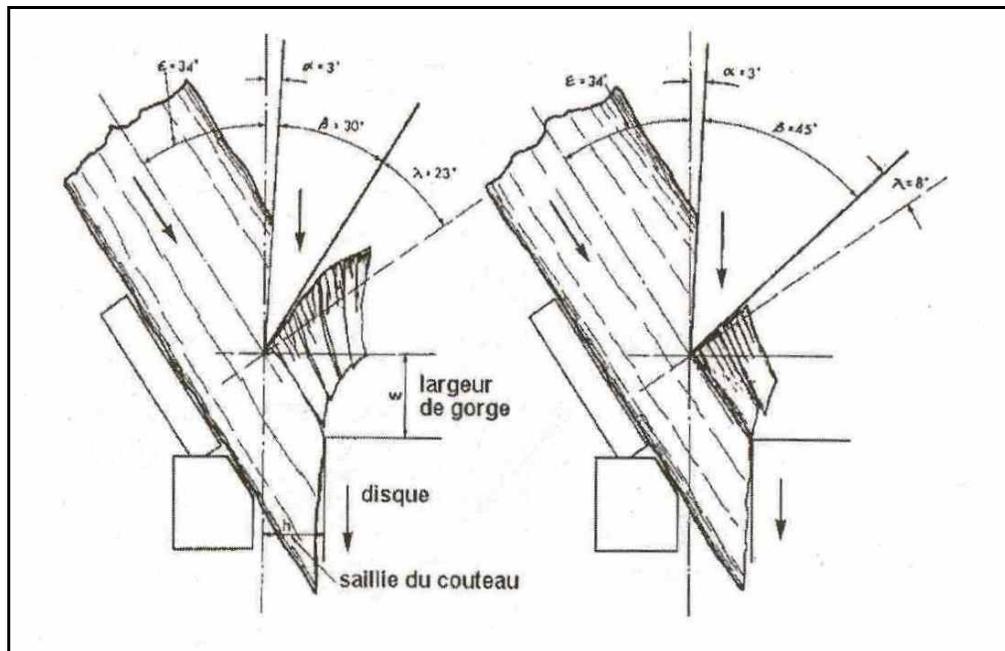
McLauchlan et Lapointe (1979) ont étudié la formation des copeaux au moyen d'une fragmenteuse à disque (figure 1.12). Ils expliquent que les propriétés mécaniques les plus importantes lors de la formation des copeaux par ces machines sont la résistance au fendillement, au cisaillement longitudinal et à la compression suivant le fil du bois. Au moment de la formation des copeaux, l'action du couteau produit initialement des contraintes de compression dans la région A (figure 1.12), soit sur la face d'attaque du

couteau. L'application de cette compression provoque des contraintes de fendillement et/ou cisaillement longitudinal lesquelles vont finalement être responsables de la fragmentation du bois en copeaux. La valeur de l'angle  $\lambda$ , ainsi que les propriétés physiques du bois, vont déterminer si la formation des copeaux sera principalement faite par fendillement ou par cisaillement (figure 1.13). Dans l'industrie, la transition entre fendillement et cisaillement a lieu entre  $\beta = 30^\circ$  et  $\beta = 40^\circ$ , mais ces valeurs sont fonction des essences, de la teneur en humidité, de la température, de l'angle  $\varepsilon$ , entre autres. De plus, la formation des copeaux par fendillement réduit la consommation d'énergie et produit moins de contraintes de compression et moins de dommages que la formation par cisaillement.

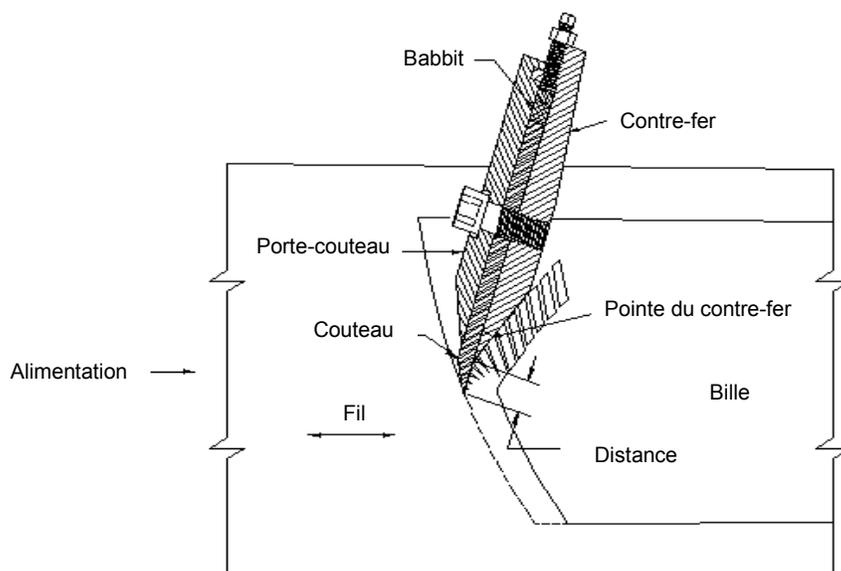
La formation des copeaux par équarrisseuse-fragmenteuse a été expliquée par Hernández et Quirion (1993) (figure 1.14). Au tout début de la coupe, le couteau applique une compression quasiment perpendiculaire au fil du bois afin de couper une tranche obtenue par cisaillement quasiment perpendiculaire. La tranche produite, ainsi que la surface restante dans le bois, subissent des efforts de cisaillement suivant le fil qui pourraient provoquer des microfissures. Le bout de la tranche est ensuite dirigé vers le contre-fer, qui est placé à une certaine distance de la pointe du couteau. Le changement d'angle de trajectoire de la tranche, provoqué par le contre-fer, produit d'autres contraintes qui vont contribuer à la fragmentation de la tranche au moyen de ruptures par cisaillement et/ou fendillement longitudinal. L'angle du contre-fer et la distance de la pointe de ce dernier à celle du couteau affectent le développement de ces contraintes et, par conséquent, la taille des copeaux formés. La force de l'impact ou la vitesse de coupe, qui réduit le temps requis pour parcourir la distance contre-fer/arête tranchante, affectent également la taille des copeaux produits (Hernández et Boulanger 1997). Il est également important que la fragmentation se fasse par fendillement longitudinal (moins d'énergie de coupe) que par cisaillement longitudinal (plus d'énergie de coupe).



**Figure 1.12.** Procédé de formation des copeaux et les angles de coupe d'une fragmenteuse à disque (adaptée de McLauchlan et Lapointe 1979).



**Figure 1.13.** Fragmentation du bois vert par fendillement (à gauche) ou par cisaillement (à droite) (adaptée de McLauchlan et Lapointe 1979).



**Figure 1.14.** Schéma montrant l'action de coupe de la partie plus longue du coupeau plié et du contre-fer des équarrisseuses-fragmenteuses Comact et Sawquip. À mesure que l'arête tranchante entre dans le bois, le coupeau coupe une tranche quasiment perpendiculaire au fil du bois. Cette tranche frappe ensuite le contre-fer provoquant son éclatement et formation ainsi des copeaux (tiré d'Hernández et Quirion 1995).

### 1.3.3 Travaux antérieurs sur l'amélioration de la performance des équarrisseuses-fragmenteuses

Hernández et Quirion (1993) ont étudié l'influence d'une nouvelle configuration des contre-fers et de la température des billes sur la distribution des dimensions des copeaux d'épinette noire produits par une équarrisseuse-fragmenteuse Swecan. Les billes avaient 150 mm de diamètre au petit bout. Les vitesses d'alimentation de billes et de rotation des têtes de coupe ont été de 171 m/min et 778 tr/min, respectivement, provoquant ainsi la formation de copeaux de 27,5 mm de longueur. Les essais furent faits en été (entre 19°C et 23°C) et en hiver (entre -10°C et -5°C). L'augmentation de l'angle de contre-fer de 22° à 40° ainsi que celle de la distance entre la pointe du contre-fer et du coupeau de 8 à 22 mm ont provoqué une diminution de l'épaisseur moyenne des copeaux. Une augmentation de l'angle de contre-fer de 22° à 30° a impliqué l'augmentation de la proportion de copeaux acceptables et la diminution des fines, des aiguilles et de ceux trop épais. En outre, les

meilleurs résultats furent obtenus avec un contre-fer de 30° et une distance optimale entre la pointe du contre-fer et du couteau de 22,5 mm pour l'hiver et de 15,9 mm pour l'été. Ces réglages ont entraîné la production de 6% de plus de copeaux acceptables en hiver et 5,2% en été. Quant à l'effet de la température sur la distribution des copeaux, les résultats montrent que la proportion des copeaux acceptables fut plus grande en hiver, bien que celles de fines et des copeaux minces aient doublé. De plus, l'épaisseur moyenne des copeaux et la proportion de copeaux trop épais furent plus grandes en été qu'en hiver.

Hernández et Quirion (1995) ont évalué par la suite l'influence de cette nouvelle configuration du contre-fer sur d'autres espèces et sur différents diamètres des billes. Les essences étudiées furent le sapin baumier et l'épinette blanche de deux classes de diamètre: 154 mm et 204 mm au petit bout. La largeur de coupe fut maintenue constante à 28 mm au petit bout, mais elle a varié au gros bout vu que le défilement des billes était différent pour les deux classes de diamètre. La vitesse d'alimentation de billes et de rotation des têtes de coupe a été de 71,6 m/min et 464 tr/min, respectivement, provoquant ainsi la formation des copeaux de 19,3 mm de longueur. La température des billes varia entre 10°C et 19°C. Les meilleurs résultats furent obtenus avec un angle de contre-fer de 30° et la distance entre les pointes du contre-fer et du couteau de 18 mm. Cette configuration a produit 1,8% et 3,4% de plus de copeaux acceptables pour les diamètres de 154 mm et 204 mm, respectivement, et 2,1% et 3,1% de plus de copeaux acceptables pour le sapin baumier et l'épinette blanche, respectivement. Ces gains ont été principalement obtenus à partir de la réduction de la quantité de copeaux trop épais. Les auteurs ont aussi trouvé que, sous des mêmes conditions de coupe, le sapin baumier a produit des copeaux plus minces et plus de fines que l'épinette blanche. En outre, l'effet de la différence de défilement des billes pour les deux classes de diamètre a empêché de distinguer l'effet séparé de la hauteur et de la largeur de coupe sur la distribution des copeaux.

Ces deux derniers effets furent étudiés avec plus de détails par Hernández et Lessard (1997). Ces auteurs ont étudié l'effet de la largeur et de la hauteur de coupe sur la distribution de la taille des copeaux produits par la même équarrisseuse-fragmenteuse Swecan. Ils ont travaillé avec des billes d'épinette noire de trois classes de diamètre au petit

bout : 101,6 mm, 152,4 mm et 203,2 mm. La largeur de coupe au petit bout a été de 12,5 mm et 25 mm. La vitesse d'alimentation de billes et de rotation des têtes de coupe a été de 197 m/min et 783 tr/min, respectivement, provoquant ainsi la formation des copeaux de 31,5 mm de longueur. Les essais furent faits en été (entre 20°C et 26°C) et en hiver (entre -14°C et -4°C). Les résultats ont montré un effet significatif de la largeur de coupe sur la distribution de copeaux tandis que pour la hauteur cet effet fut négligeable. La diminution de la largeur de coupe a impliqué la réduction de l'épaisseur des copeaux. En d'autres mots, la fraction d'acceptables et de minces a augmenté tandis que celle des copeaux trop épais a diminué. L'effet de la température sur la diminution de l'épaisseur des copeaux fut similaire à celui obtenu par Hernández et Quirion (1993). Cet effet fut plus important pour la largeur de coupe de 12,5 mm que pour celle de 25 mm. Cela s'explique par le fait que l'épaisseur de l'aubier était en moyenne de 15 mm, et ce dernier présente une plus grande teneur en humidité que le duramen (donc une quantité plus grande de glace).

Hernández et Boulanger (1997) ont étudié l'influence de la vitesse de coupe d'une équarrisseuse-fragmenteuse Swecan sur la distribution de copeaux. Ils ont utilisé des billes d'épinette noire de 152,4 mm de diamètre au petit bout. La largeur de coupe fut de 25,4 mm au petit bout. Les vitesses de rotation de la tête de la machine furent fixées à 546, 615, 700 et 783 tr/min. La vitesse d'alimentation de billes a été ajustée à 119, 134, 154 et 172 m/min afin d'obtenir des copeaux de 27,5 mm de longueur moyenne. Les essais furent faits en été (entre 11°C et 16°C) et en hiver (entre -15°C et -5°C). Les résultats ont indiqué que l'augmentation de la vitesse de rotation de 546 à 783 tr/min a engendré une diminution de l'épaisseur des copeaux et une augmentation de fines. Les meilleurs résultats quant à la quantité de copeaux acceptables furent obtenus avec la vitesse de 783 tr/min. Cette étude a également confirmé les résultats obtenus par Hernández et Quirion (1993) et Hernández et Lessard (1997) quant à l'effet de la température sur la fragmentation des copeaux.

L'influence de la largeur et la hauteur de coupe sur la qualité de surface des équarris d'épinette noire produits par une équarrisseuse-fragmenteuse Swecan fut étudiée par Hernández *et al.* (2010). Ce travail fut fait avec les mêmes paramètres de fragmentation utilisés par Hernández et Lessard (1997) décrits ci-dessus. La qualité de surface a été

évaluée selon les paramètres standards de rugosité et d'ondulation et selon la profondeur du fil arraché. Les profils de rugosité et d'ondulation ont été pris selon les directions longitudinale et transversale au fil du bois. Les résultats indiquent que la hauteur et la largeur de coupe ainsi que la température de billes ont une influence significative sur la qualité de surface. La surface était plus rugueuse, plus ondulée et le fil arraché plus profond lorsque la largeur de coupe était plus grande. La meilleure qualité de surface fut obtenue à partir de la fragmentation de billes non gelées, avec les plus faibles largeurs et hauteurs de coupe. De plus, pour un même équarri, la qualité de surface a été meilleure dans la partie supérieure du petit bout des équarris.

#### **1.3.4 L'influence de la température et de la teneur en humidité sur la distribution de la taille des copeaux produits par des équarrisseuses-fragmenteuses**

La qualité des copeaux produits par les équarrisseuses-fragmenteuses est influencée par des éléments reliés à la machine et au bois. En relation à ce dernier, la température et la teneur en humidité sont des facteurs qui ont été rapportés comme étant très importants dans quelques publications précédentes.

Hatton (1975) a étudié l'effet du type de fragmenteuse, de l'essence et de la saison sur la production de copeaux fins et en forme d'aiguille. Il a travaillé avec trois essences soit le pin tordu latifolié, l'épinette blanche et le sapin baumier ainsi que trois sortes de machines : coupeuse-délineuse, équarrisseuse-fragmenteuse et équarrisseuse-coupeuse de tête. Il a observé qu'en hiver la production de copeaux minces fut de deux à trois fois plus grande qu'en été. Cette tendance a été remarquée pour toutes les essences et les machines analysées. Par contre, le même auteur, un an plus tard travaillant avec le pin tordu latifolié et l'épinette blanche, n'a trouvé aucun effet de la saison sur la distribution de l'épaisseur des copeaux à l'aide de divers types de fragmenteuses (Hatton 1976).

Hernández et Quirion (1993) ont analysé la distribution des copeaux d'épinette noire produits par une équarrisseuse-fragmenteuse Swecan. Une baisse moyenne de la température de 21°C à -8°C a entraîné la production de quasiment le double de copeaux fins et en forme d'aiguille. La proportion de copeaux de dimensions acceptables a augmenté au détriment de celle des copeaux trop épais. Selon ces auteurs, la diminution de la température a une influence sur les propriétés mécaniques du bois, de manière que le rapport flexion statique et fendillement augmente. Ainsi, des copeaux plus minces sont obtenus. Ils ont aussi remarqué que les différences entre la teneur en humidité du duramen et de l'aubier agissent sur les dimensions des copeaux. La proportion plus grande de gel présent dans l'aubier joue un rôle majeur sur la hausse des propriétés mécaniques du bois.

Plus tard, Hernández et Lessard (1997) ont aussi évalué l'influence de la saison (été et hiver) sur la distribution de la taille des copeaux d'épinette noire produits par le même équipement. Une baisse de la température de 25°C à -10°C a augmenté la proportion de copeaux minces, mais en même temps a amélioré la proportion de copeaux de dimensions acceptables aux dépens de ceux trop épais. Des résultats semblables ont été obtenus par Hernández et Boulanger (1997). De plus, Hernández et Lessard (1997) ont remarqué que l'effet de la température fut plus évident lors de l'utilisation de largeurs de coupe plus petites. Dans ce cas, le volume d'aubier dans la section fragmentée est plus grand que celui du duramen. Cela se manifeste par une plus grande quantité d'eau liquide et, par le fait même, de glace.

## 1.4 Objectifs et hypothèses de travail

Les hypothèses du présent travail sont:

- La température et la teneur en humidité des billes ont une influence sur le travail de fragmentation réalisé par équarrisseuse-fragmenteuse.
- Le cisaillement longitudinal, le fendillement et la flexion statique sont parmi les propriétés mécaniques les plus importantes impliquées lors de la fragmentation par cette machine.

L'objectif principal de cette étude fut d'évaluer l'influence de la température et de la teneur en humidité du bois sur les propriétés mécaniques impliquées lors de la fragmentation par équarrisseuse-fragmenteuse. Les essences utilisées furent l'épinette noire [*Picea mariana* (Mill.) B.S.P] et le sapin baumier [*Abies balsamea* (L.) Mill.].

## Chapitre 2

### Matériel et méthodes

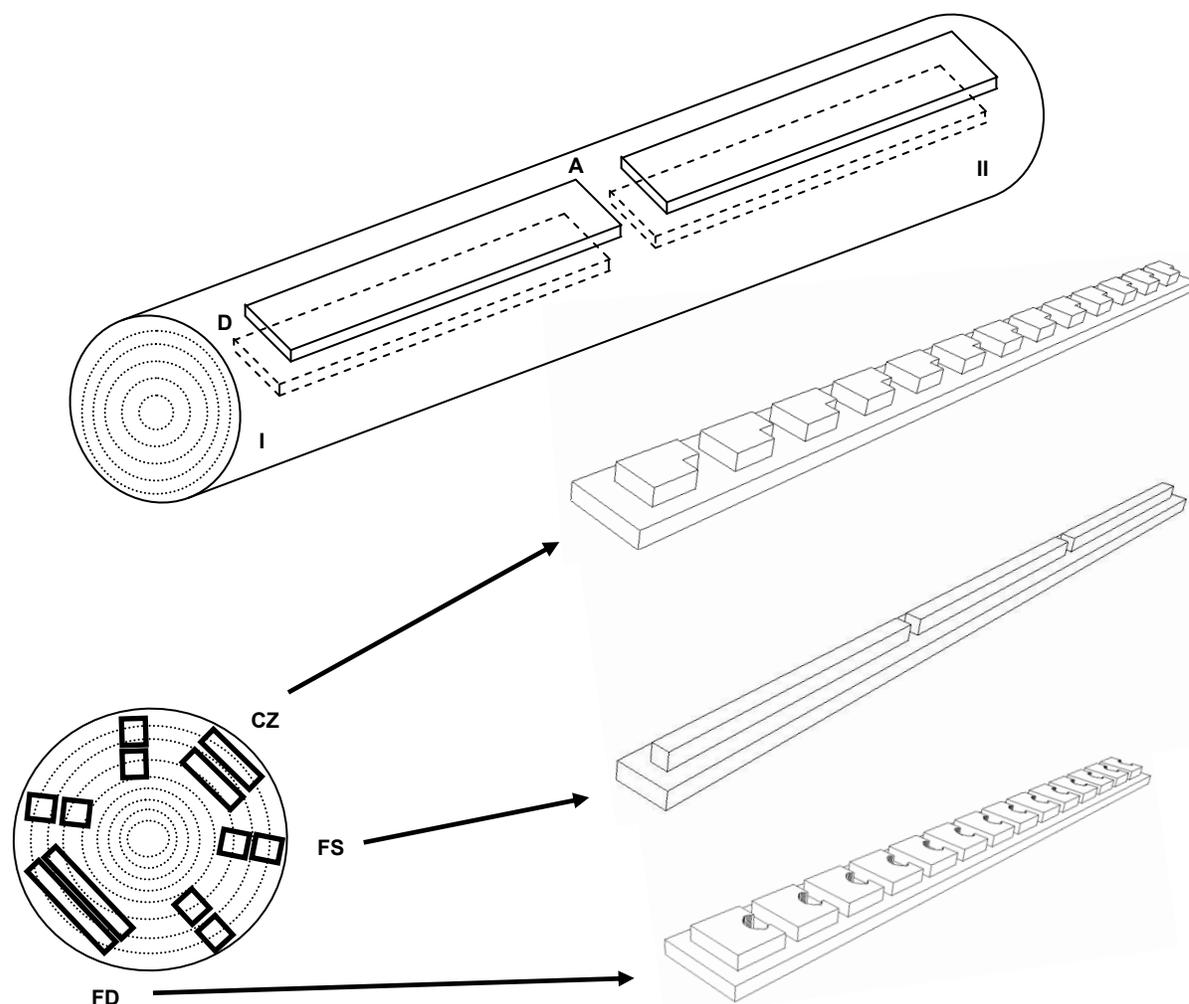
#### 2.1 Matériel d'essai

Dix billes d'épinette noire [*Picea mariana* (Mill.) B.S.P] et dix billes de sapin baumier [*Abies balsamea* (L.) Mill.] provenant de Saint-Lambert de Lauzon, dans la région de Chaudière-Appalaches, Québec, ont été sélectionnées dans le cadre de cette étude. Ces espèces ont une grande importance économique au Québec et au Canada et sont utilisées comme bois d'œuvre et bois à pâte. Les billes non écorcées furent tronçonnées à 1,4 m de longueur et les deux bouts furent enveloppés immédiatement avec un film de polyéthylène. Elles furent ensuite entreposées dans un congélateur à -4°C jusqu'à leur utilisation. Elles étaient à l'état vert, droites, sans pourriture visible et avaient un minimum de nœuds.

#### 2.2 Préparation des échantillons

Chaque bille a été tronçonnée à la mi-longueur afin de faciliter sa manipulation lors de la préparation des échantillons. La première moitié correspondante à la base fut identifiée avec le chiffre I et la deuxième moitié avec le chiffre II. Les billes d'épinette noire ont été numérotées de 1 à 10 et celles de sapin baumier de 11 à 20. Des planches furent obtenues suivant le fil du bois à l'aide d'une scie à ruban, puis dégauchies et rabotées afin d'obtenir des baguettes d'orientation longitudinale tangentielle du duramen et de l'aubier (figure 2.1). Ces baguettes avaient 10 mm d'épaisseur et trois largeurs variables selon le type d'échantillon à être obtenu. De chaque type de baguette, on a préparé des échantillons jumelés pour les essais mécaniques de cisaillement [10 mm (R) X 25 mm (T) X 35 mm (L)], fendillement [10 mm (R) X 45 mm (T) X 45 mm (L)] et flexion statique [10 mm (R) X 10 mm (T) X 190 mm (L)]. Ces dimensions furent employées afin d'être comparables à celles des copeaux produits lors de la fragmentation par l'équarrisseuse-fragmenteuse. La

figure 2.1 montre la disposition des baguettes dans une bille. La première éprouvette de chaque baguette, c'est-à-dire, la plus proche de la base de l'arbre, a été sélectionnée pour le traitement à 20°C, la deuxième pour le traitement à 10°C et ainsi de suite jusqu'à la sixième, utilisée pour le traitement à -30°C. La septième fut assignée à nouveau au traitement à 20°C, jusqu'à la douzième, utilisée pour le traitement à -30°C. On a donc pris 24 échantillons de chaque arbre pour chaque essai mécanique, 12 du duramen et 12 de l'aubier, donnant un total de 72 échantillons par arbre. De cette façon, un échantillon nommé *1 I duramen 1* signifie qu'il est venu de la bille numéro 1 (épinette noire), obtenu d'une baguette de la partie I du duramen et localisé dans la position la plus proche de la base de l'arbre. Le prochain échantillon obtenu était le *1 I duramen 2* et ainsi de suite. Cette nomenclature fut utilisée pour les trois types d'échantillons. On a essayé aussi d'obtenir le maximum d'échantillons par baguette de la partie I de la bille. Lorsque le nombre d'échantillons de la partie I n'était pas suffisant, les autres échantillons furent obtenus de la partie II. Les éprouvettes avaient le fil droit et étaient exemptes de défauts majeurs. Les cernes étaient parallèles aux faces tangentielles des éprouvettes. La figure 2.1 illustre aussi l'obtention des échantillons de chaque type de baguette. Le matériau d'essai a été maintenu à l'état vert pendant son obtention à l'aide d'un vaporisateur et gardé dans des sacs en plastique hermétiques. Par la suite, les échantillons furent conservés dans un congélateur à une température moyenne de -4°C jusqu'au début des essais mécaniques.



**Figure 2.1.** Distribution des échantillons pour les essais mécaniques de cisaillement longitudinal (CZ), fendillement (FD) et flexion statique (FS). A : aubier ; D : duramen ; I : moitié de la bille près de la base de l'arbre ; II : deuxième moitié.

## 2.3 Essais mécaniques

Les essais furent faits sur un banc d'essai Universel Qtest/5. Ce banc est muni d'une cellule de charge de 5 kN, dont la précision a été de  $\pm 2$  N. Cette machine est reliée à un ordinateur muni du logiciel Test Works 4, lequel sert à faire fonctionner la machine et à prendre de données brutes. Les essais mécaniques ont été conduits à des températures variant entre  $-30^{\circ}\text{C}$  et  $20^{\circ}\text{C}$  et à des intervalles de  $10^{\circ}\text{C}$ . Pour ce faire, les échantillons, provenant du congélateur réglé à  $-4^{\circ}\text{C}$ , ont été protégés avec des protections de styromousse

(Styrofoam<sup>®</sup>, conductivité thermique de 0.033 W/mK) pour réduire les échanges de température entre eux et l'air ambiant de la salle d'essai mécanique à 21°C. Ces protections ont été conservées intactes au cours des essais. Ensuite, les éprouvettes ont été mises à la chambre de refroidissement CSZ Z44 Plus à fin d'atteindre la température désirée pour chaque essai mécanique. La chambre, initialement à la température de 20°C, fut programmée pour avoir un taux de refroidissement moyen lent et constant. Ce taux fut variable selon la température ciblée : 3,4°C/min (20°C à 10°C), 4,7°C/min (20°C à 0°C), 4,0°C/min (20°C à -10°C), 3,1°C/min (20°C à -20°C) et 1,7°C/min (20°C à -30°C). Les échantillons ont été y laissés pour au moins 24 heures avant les essais mécaniques. Le temps compris entre l'enlèvement des échantillons de la chambre de refroidissement et le début des essais mécaniques fut d'à peu près 1,5 min. La durée des essais mécaniques a varié selon le type (cisaillement, fendillement ou flexion) et la température d'essai. En général, la durée fut de 10 à 30 s. Les échantillons ont été pesés juste après les tests, afin de déterminer ultérieurement leur teneur d'humidité.

### 2.3.1 Essais de cisaillement longitudinal

L'essai de cisaillement parallèle au fil fut réalisé selon la norme ASTM D 143 - 94 (ASTM 1997) avec quelques modifications afin d'être adapté aux objectifs du présent projet (figure 2.2). Les échantillons ont été testés suivant le plan de rupture radial-longitudinal. La charge fut appliquée à un taux de déplacement de la traverse mobile de 5,0 mm à la minute jusqu'à la rupture de l'échantillon. On n'a pas mis de décalage, c'est-à-dire, l'écartement entre l'extrémité de la base d'appui et l'axe théorique de cisaillement. La figure 2.3 montre un échantillon utilisé pour l'essai de même que ses dimensions. La surface de cisaillement de chaque échantillon a été de 250 mm<sup>2</sup>. Toutes les parties en métal de la guillotine furent couvertes avec des plaquettes de Nyloil<sup>®</sup> en vue d'éviter les échanges de température entre l'éprouvette et les parties métalliques. La résistance au cisaillement parallèle au fil — contrainte maximale —  $\tau_{\parallel}$  fut calculée comme suit :

$$\tau = \frac{P}{S} \quad (\text{MPa})$$

Où :  $P$  = charge à la rupture (N)

$S$  = surface cisailée (mm<sup>2</sup>)

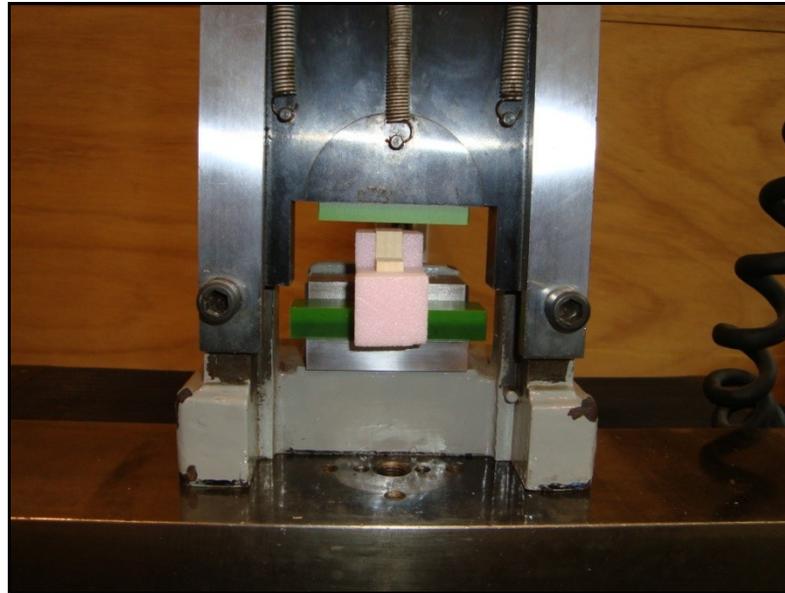
### 2.3.2 Essais de fendillement

L'essai de fendillement fut réalisé selon la norme ASTM D 143 - 94 (ASTM 1997) avec quelques modifications pour satisfaire les objectifs du présent projet (figure 2.4). Les échantillons ont été testés suivant le plan de rupture radial-longitudinal. Les éprouvettes ont été placées bien serrées sur les mors de la machine d'essai avant le début de l'essai. Une autre précaution prise fut de placer les échantillons dans le milieu des mors afin que la force exercée par ces derniers soit répartie uniformément suivant l'épaisseur de l'éprouvette. La charge fut appliquée à une vitesse de 5,0 mm à la minute jusqu'à la rupture de l'échantillon. La figure 2.5 montre un échantillon utilisé pour l'essai ainsi que ses dimensions. La contrainte maximale —  $\tau$  — de fendillement fut calculée comme suit :

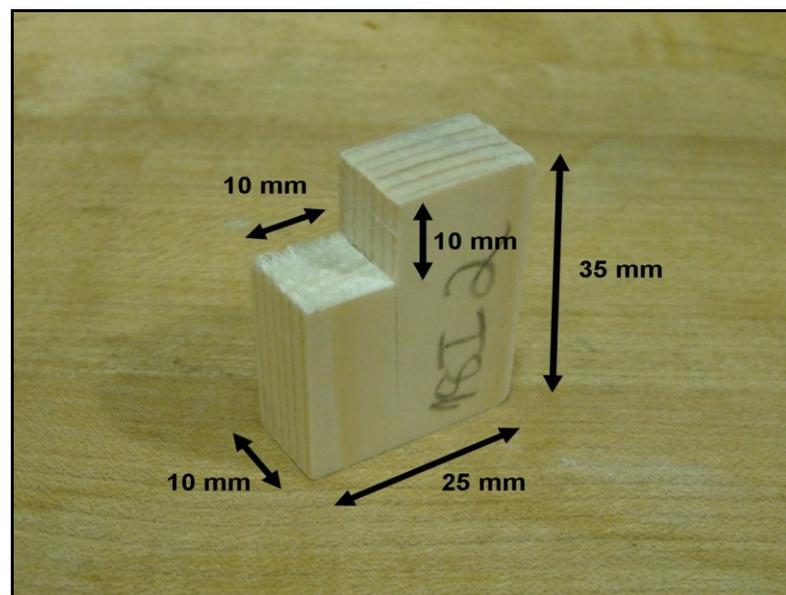
$$\tau = \frac{P}{b} \quad (\text{N/mm})$$

Où :  $P$  = charge à la rupture (N)

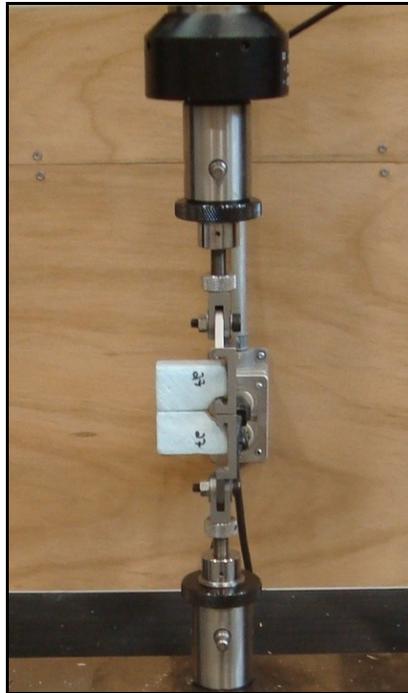
$b$  = épaisseur de l'échantillon (mm)



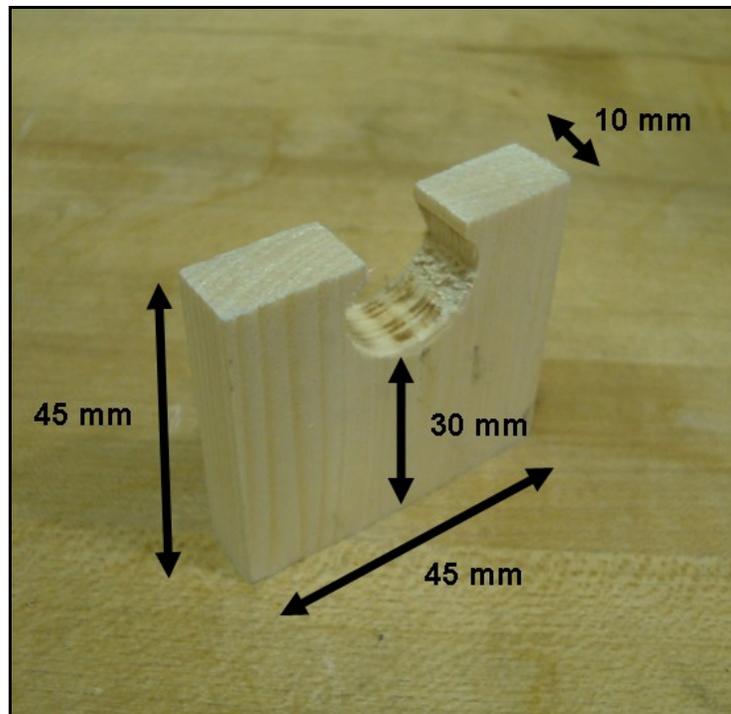
**Figure 2.2.** Photo montrant l'échantillon avec des protections en styromousse monté sur l'accessoire de cisaillement muni des éléments isolants de Nylol<sup>®</sup> (en vert).



**Figure 2.3.** Échantillon de cisaillement avec ses dimensions (rupture déjà atteinte).



**Figure 2.4.** Détail du positionnement de l'échantillon avec des protections en styromousse lors de l'essai de fendillement.



**Figure 2.5.** Échantillon de fendillement avec ses dimensions.

### 2.3.3 Essais de flexion statique

L'essai de flexion statique fut réalisé selon la norme ASTM D 143 - 94 (ASTM 1997) avec quelques adaptations pour satisfaire les objectifs du présent projet (figure 2.6). Les échantillons ont été placés avec les cernes orientés horizontalement et le côté de la moelle dirigé vers le haut. L'appui supérieur, qui exerce la charge, et les deux supports de l'éprouvette ont été faits en bois dense, afin de diminuer les échanges de température. Ces appuis avaient un rayon de 15 mm. La portée possédait une distance de 140 mm. La charge fut appliquée à un taux de déplacement de l'appui mobile supérieur de 30,0 mm à la minute jusqu'à la rupture complète de l'échantillon. Deux types de mesures furent réalisés, une pour les propriétés élastiques et l'autre pour les propriétés de rupture de l'échantillon. La figure 2.7 montre un échantillon utilisé pour l'essai ainsi que ses dimensions. Le module de rupture (MOR) fut calculé comme suit :

$$MOR = \frac{1,5PL}{bh^2} \quad (\text{MPa})$$

Où :  $P$  = charge maximale (N)

$L$  = portée (mm)

$b$  = largeur de l'échantillon (mm)

$h$  = épaisseur de l'échantillon (mm)

Le module d'élasticité (MOE) fut calculé comme suit :

$$MOE = \frac{0,25P_{LP}L^3}{D_{LP}bh^3} \quad (\text{MPa})$$

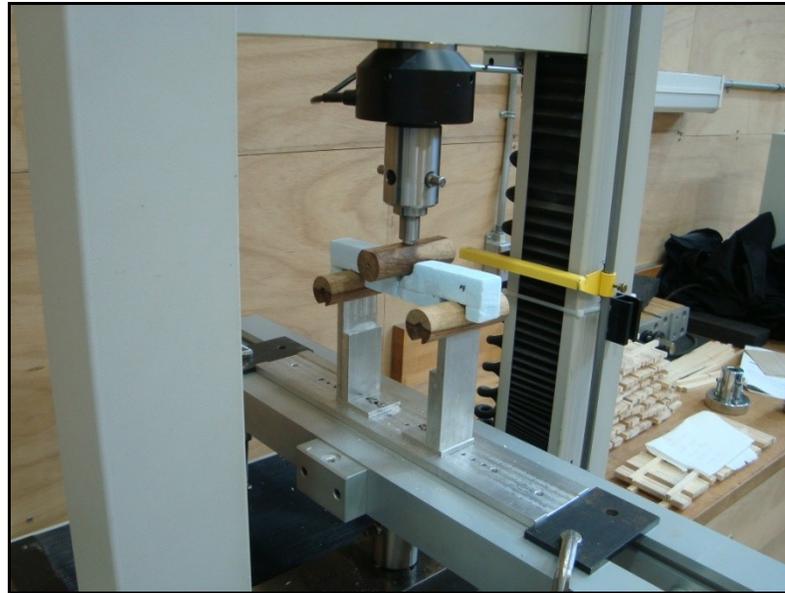
Où :  $P_{LP}$  = charge à la limite proportionnelle (N)

$L$  = portée (mm)

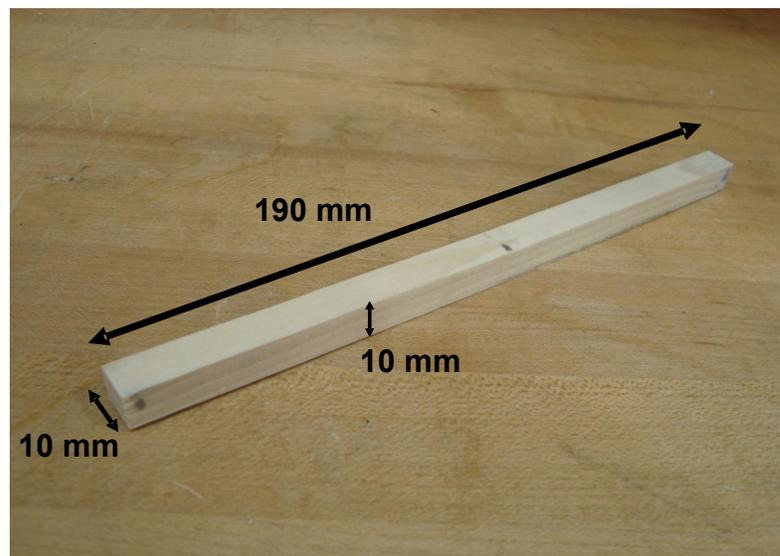
$D_{LP}$  = déplacement de l'échantillon à la limite proportionnelle (mm)

$b$  = largeur de l'échantillon (mm)

$h$  = épaisseur de l'échantillon (mm)



**Figure 2.6.** Détail du placement de l'échantillon sur ses appuis avec des protections en styromousse lors de l'essai de flexion statique.



**Figure 2.7.** Échantillon de flexion statique avec ses dimensions.

## 2.4 Mesures de la masse volumique basale, teneur en humidité et de la largeur moyenne des cernes de croissance

La masse humide ( $M_H$ ) de chacun des échantillons a été prise à 0,0001 g près immédiatement après leur essai mécanique. Le volume saturé ( $V_S$ ) a été ensuite mesuré par immersion dans l'eau, à 0,01 g près. Les échantillons furent par la suite séchés à l'étuve à 103°C durant au moins 24 heures, puis leur masse anhydre ( $M_0$ ) fut obtenue à 0,0001 g près. Ces mesures ont servi à calculer la masse volumique basale ( $D_b$ ) et la teneur en humidité ( $H$ ) durant l'essai mécanique. Les cernes de croissance de chaque éprouvette furent comptés et ensuite divisés par l'épaisseur de l'échantillon (10 mm pour les trois types) dans le but de calculer la largeur moyenne des cernes.

## 2.5 Analyses statistiques des données

Les analyses statistiques furent faites à l'aide du logiciel *Statistical Analysis System* (SAS) 9.2 (SAS Institute 2007). D'abord, des modèles d'analyse de variance (ANOVA) à un ou deux facteurs ont été ajustés aux données selon les variables à l'étude. Dépendant des variables, les procédures GLM et MIXED ont été utilisées. La procédure MIXED fut utilisée quand aucune transformation n'était trouvée qui permettait d'améliorer la normalité et l'homogénéité des données. De cette façon, une analyse de variance afin de modéliser l'hétérogénéité a été faite à l'aide de la procédure MIXED. Lorsque l'hypothèse de normalité n'était pas rencontrée, une transformation logarithmique ou racine carrée des données a été utilisée. Les comparaisons multiples furent effectuées à l'aide de la méthode LSD protégé de Fisher. Cette méthode a été réalisée afin de déterminer s'il y avait des effets significatifs de la température et du type de bois (duramen et aubier) sur la résistance au cisaillement, fendillement et flexion statique. On a fait des analyses de corrélation de Pearson entre ces trois propriétés mécaniques,  $H$ ,  $D_b$  et la largeur moyenne des cernes à un seuil de probabilité de 1% et 5%. Ces analyses ont permis d'identifier certaines variables indépendantes pouvant expliquer la variation observée dans les propriétés mécaniques étudiées. Des analyses de régression multiple ont été effectuées pour déterminer l'influence

ou non de chaque variable indépendante (H,  $D_b$  et la largeur moyenne des cernes) sur la variable dépendante à chacune des températures étudiées. L'inclusion ou exclusion de chaque variable indépendante dans le modèle proposé a été fixée à un seuil de probabilité de 10%, une valeur recommandée lorsqu'il s'agit de régressions multiples. La contribution quantitative de chaque variable indépendante sur les modèles a été déterminée par les coefficients de régression normalisés obtenus par le calcul des coefficients bêta.

## **Chapitre 3**

### **Article scientifique**

#### **Effects of temperature and moisture content on wood mechanical properties associated to the chipping process**

##### **3.1 Abstract**

The effects of temperature and moisture content on the mechanical properties associated to the chipping process by a chipper-canter were evaluated. In chipping, mechanical properties such as shear parallel to the grain, cleavage, and bending are involved. Matched samples of heartwood and sapwood were obtained from freshly harvested logs of black spruce and balsam fir to determine each mechanical property. The mechanical tests were carried out between  $-30^{\circ}\text{C}$  and  $20^{\circ}\text{C}$ , at intervals of  $10^{\circ}\text{C}$ . Moisture content (MC), basic density (BD) and annual ring width (RW) were measured for each sample. The results showed that, for both wood species, temperature had a significant effect on all mechanical properties under freezing conditions (below  $0^{\circ}\text{C}$ ). This effect was more important for sapwood than for heartwood, given the difference in MC between these two types of wood. Between  $0^{\circ}\text{C}$  and  $20^{\circ}\text{C}$ , temperature and type of wood did not have significant effects on the mechanical properties. Multiple regression analyses showed that MC was the most important factor to explain the mechanical properties below  $0^{\circ}\text{C}$ . However, for temperatures of  $0^{\circ}\text{C}$  and higher, BD was the principal factor to predict the mechanical properties. RW was not a significant factor to predict any mechanical properties. Moreover, cleavage was the most sensitive property to changes in temperature followed by shear, MOR and MOE. This fact could have a great importance in the chipping process.

## Résumé

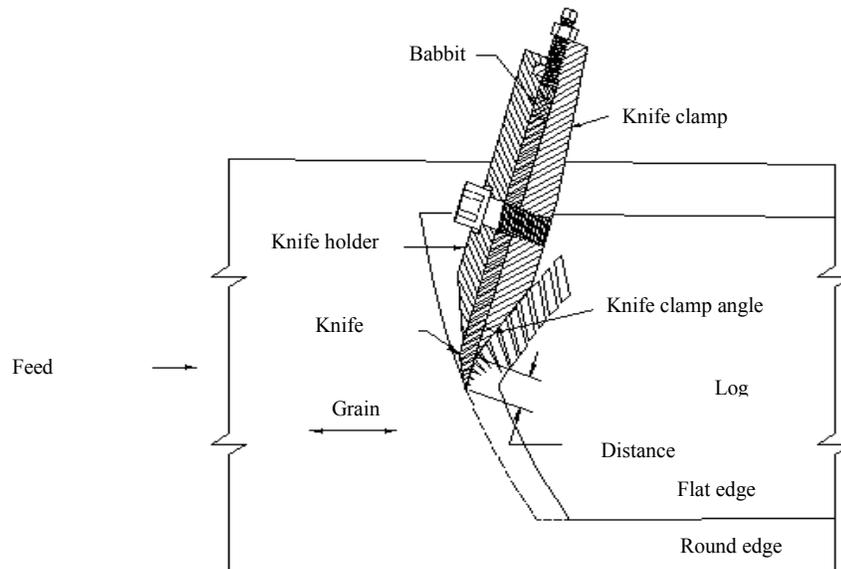
Cette étude a évalué les effets de la température et de la teneur en humidité sur les propriétés mécaniques associées au procédé de fragmentation par équarrisseuse-fragmenteuse. Le cisaillement parallèle au fil, le fendillement et la flexion statique sont parmi les propriétés les plus importantes impliquées lors du procédé de fragmentation par ces machines. Des échantillons jumelés du duramen et de l'aubier ont été pris des billes d'épinette noire et de sapin baumier à l'état vert pour chaque propriété mécanique. Les essais mécaniques ont été conduits à des températures variant entre  $-30^{\circ}\text{C}$  et  $20^{\circ}\text{C}$  et à des intervalles de  $10^{\circ}\text{C}$ . La teneur en humidité, la masse volumique basale et la largeur des cernes ont aussi été mesurées pour chaque échantillon. Les résultats montrent que, pour les deux espèces et pour toutes les propriétés mécaniques étudiées, la température a eu un effet significatif sur les propriétés mécaniques uniquement au-dessous de  $0^{\circ}\text{C}$ . Dans ce cas, cet effet a été plus évident pour l'aubier que pour le duramen en conséquence de la différence de teneur en humidité entre ces deux types de bois. Entre  $0^{\circ}\text{C}$  et  $20^{\circ}\text{C}$ , la température et le type de bois n'ont pas eu des effets significatifs sur les propriétés mécaniques. Des analyses de régression multiple ont montré que la teneur en humidité a été l'élément le plus important pour expliquer les propriétés mécaniques au-dessous de  $0^{\circ}\text{C}$ . En revanche, pour les températures de  $0^{\circ}\text{C}$  et plus, la masse volumique basale fut le facteur principal pour expliquer les propriétés mécaniques. La largeur des cernes de croissance n'a pas constitué un élément significatif pour prédire aucune propriété mécanique. De plus, le fendillement a été la propriété mécanique la plus sensible à la variation de la température, suivi par le cisaillement et le MOR et le MOE. Ce fait pourrait avoir une grande importance dans le processus de fragmentation.

## 3.2 Introduction

In the Province of Quebec, Canada, about half of the raw material used in pulp industries comes from chips (Parent 2010), which are mainly produced by chipper-canters (Hernández and Quirion 1993). These machines have been designed to obtain chips and cants from small diameter logs with very low sawdust production. The Comact, Sawquip, and Swecan chipper-canters are commonly used in this region. The dimensions of chips produced by these chipper-canters are not inherently uniform making homogeneous pulping difficult to obtain. Chip classification improves chip homogeneity but lead to raw material such as fines, pin chips, and overthick chips. Overthicks are generally rechipped but fines and pin chips are recycled for less profitable uses, such as fuel. Therefore, any improvement in the amount of pulpable chips is profitable for the sawmills.

The optimal chip dimensions required to obtain homogeneous pulping have been widely studied (Christie 1986, 1987). Uniform chip thickness is important in mechanical and chemimechanical pulping (Hoekstra et al. 1983; Robertsén and Lönnberg 1986), as well as in kraft pulping (Olson *et al.* 1980; Tikka *et al.* 1993). It is therefore essential to understand the chip formation process in order to improve the fragmentation methods of logs (Hernández and Lessard 1997; Hernández and Boulanger 1997).

The chip formation is a complex process that involves several factors which interactions are difficult to predict. The response to the change of a parameter of the chipping process depends on the values of other factors related to the wood and cutting parameters (McLauchlan and Lapointe 1979; Fuller 1983; Uhmeier 1995; Hellström *et al.* 2008; Hellström *et al.* 2009). Hernández and Quirion (1993) studied the effect of the knife clamp on the formation of chips by a chipper-canter (Figure 3.1). According to these authors, at the beginning of the process, the knife acts almost across to the wood grain to cut a slice by shearing. This slice and the newly formed wood surface undergo shear stresses parallel to the grain, which should produce cracks in both parts. The slice is then directed to the knife clamp placed at some distance of the knife edge. The change in the trajectory angle of slice,



**Figure 3.1.** Schematic representation of chipping by a chipper-canter (from Hernández and Quirion 1995).

caused by the knife clamp, produces other stresses that contribute to the slice fragmentation by parallel shearing or splitting. The knife clamp angle and the distance between the knife edge and the knife clamp edge affect the development of these stresses and, consequently, the chip size. The impact force or the cutting speed, which reduces the required time to cover the distance knife clamp/knife edge, also influences the chip size (Hernández and Boulanger 1997). It is also important that fragmentation takes place by parallel splitting (lower energy consumption) than by parallel shearing (higher energy consumption).

The mechanical properties of wood are affected by several internal and external factors. The temperature and moisture content (MC) of wood are among the most important parameters affecting its mechanical behavior. Wood becomes more resistant as temperature decreases (Siimes 1967; Koran 1979; Gerhards 1982; Mishiro 1990; FPL 1999; Green *et al.* 1999; Deomano and Zink-Sharp 2004; Green and Evans 2008). The effect of MC on the mechanical strength of wood is especially important at MC below the fiber saturation point (FSP). Above FSP, MC affects mechanical strength when temperature decreases below 0°C. In this case, the portion of liquid water freezes, expands and reinforces the strength of

wood (Mishiro and Asano 1984; Mishiro 1990). For instance, Gerhards (1982) found that when MC is higher than the FSP, the MOR and MOE in bending are, respectively, 110% and 50% greater at -50°C than at 20°C. In another work, the MOR and MOE were 130% and 86% greater at 50% MC, and 485% and 220% greater at 210% MC when temperature decreased from 20°C to -30°C (Mishiro and Asano 1984). Further, temperature and MC of wood have a significant impact on chipping. Hatton (1975) reported that production of pin chips and fines was two to three times greater in winter than in summer for three species and three types of chippers. Hernández and Quirion (1993) studied the distribution of black spruce chips produced by a Swecan chipper-canter. The results showed that a reduction of temperature from 21°C to -8°C produced nearly two times more fines and pin chips. Also, the acceptable chips increased at the expense of the overthick chips. According to these authors, the different sensitivity of the mechanical properties of wood to the temperature variation has an influence on the ratio of parallel-to-the-grain strength (bending) to perpendicular-to-the-grain strength (splitting). This ratio will be higher under low temperatures and will create thinner chips in winter conditions. Hernández and Quirion (1993) hypothesized that the greater proportion of ice in sapwood plays an important role in the increase of mechanical properties of black spruce wood. Similar tendencies were reported later by Hernández and Lessard (1997) and Hernández and Boulanger (1997).

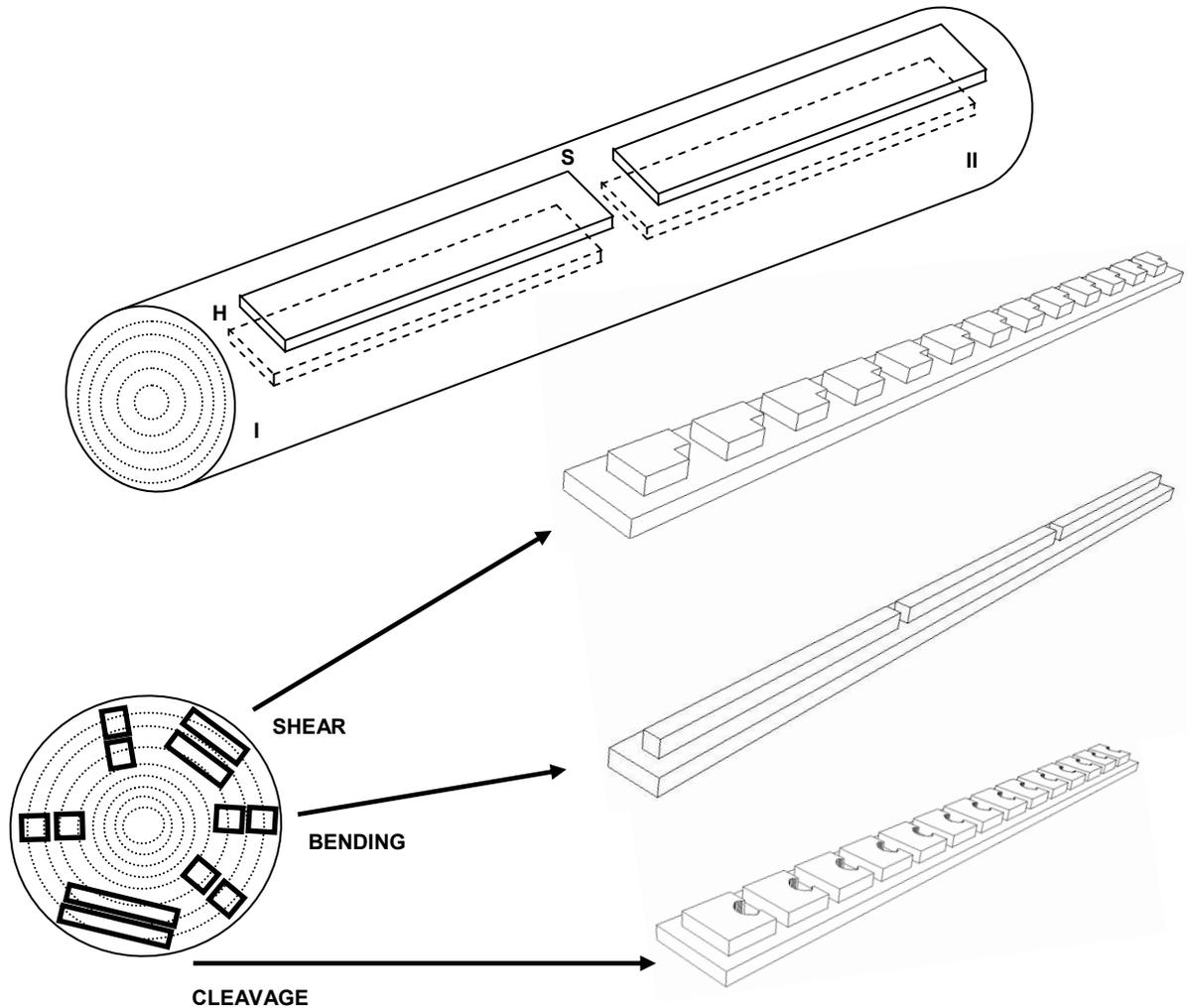
The main objective of this study was to evaluate the effects of temperature and MC of wood on the mechanical properties associated to the fragmentation process by a chipper-canter. The species used were black spruce [*Picea mariana* (Mill.) B.S.P] and balsam fir [*Abies balsamea* (L.) Mill].

### **3.3 Materials and methods**

Ten stems of black spruce [*Picea mariana* (Mill.) B.S.P] and ten stems of balsam fir [*Abies balsamea* (L.) Mill.] from Saint-Lambert de Lauzon, in the Chaudière-Appalaches area of Quebec, were harvested for this experiment. These species have a great economic

importance to the Quebec province and they are used as building timber and pulpwood. The stems were crosscut into two 1.40-m logs obtained at 1.0 m from the base of the tree. Logs were kept with bark and their ends were wrapped in polyethylene and stored at  $-4^{\circ}\text{C}$  until their utilization. The logs were without crook or visible decay and had a minimum of knots. They also had straight grain and concentric growth rings.

Each log was crosscut at the mid-length to facilitate its handling during sample preparation. The half part nearest to the base of the tree was identified with the symbol I and the second half with the symbol II. Afterwards, boards were obtained with a bandsaw and then jointed and planed to obtain planks from heartwood and sapwood having a longitudinal-tangential orientation (Figure 3.2). There were three types of planks, each one with a different width according to the type of sample to be obtained and all ones with 10 mm of thickness. From each type of plank, matched samples for shear [10 mm (R) X 25 mm (T) X 35 mm (L)], cleavage [10 mm (R) X 45 mm (T) X 45 (L)] and static bending [10 mm (R) X 10 mm (T) X 190 mm (L)] tests were prepared. Dimensions were chosen to represent those chips obtained from a chipping process by a chipper-canter. The distribution of planks within a stem is shown in Figure 3.2. The first sample from each plank, that is, the nearest from the base of the tree, was chosen for the  $20^{\circ}\text{C}$  treatment, the second for the  $10^{\circ}\text{C}$  treatment and then until the sixth, used for the  $-30^{\circ}\text{C}$  treatment. The seventh was used again for the  $20^{\circ}\text{C}$  treatment, until the twelfth, utilized to the  $-30^{\circ}\text{C}$  treatment. Therefore, we took 24 samples from each tree, 12 from heartwood and 12 from sapwood, for each mechanical test, giving a total of 72 samples per tree. The same approach was used for the three types of samples. They all had straight grain and were without any major defect. Growth rings were oriented parallel to the tangential plane of the samples. The preparation of samples from each type of plank is shown in Figure 3.2. All samples were kept in green conditions at  $-4^{\circ}\text{C}$  and wrapped in a polyethylene protection until the beginning of mechanical tests.



**Figure 3.2.** Distribution of samples for the mechanical tests of shear, cleavage and static bending. H: heartwood; S: sapwood; I: half part of the log nearest to the base of tree; II: second half of the log.

The mechanical tests were performed on a universal testing machine equipped with a 5 kN load cell. The temperatures of treatment were between  $-30^{\circ}\text{C}$  and  $20^{\circ}\text{C}$  with a  $10^{\circ}\text{C}$  interval. To do this, the samples initially at  $-4^{\circ}\text{C}$  were covered with an extruded polystyrene foam (Styrofoam<sup>®</sup>, thermal conductivity of  $0.033\text{ W/mK}$ ) in order to maintain its initial temperature during the mechanical test. This protection was kept intact during the tests. Afterwards, the samples were put in the CSZ Z44 Plus cold room in order to attain the temperature desired to each mechanical test. The cooling rate was variable according to the temperature needed:  $3.4^{\circ}\text{C}/\text{min}$  ( $20^{\circ}\text{C}$  to  $10^{\circ}\text{C}$ ),  $4.7^{\circ}\text{C}/\text{min}$  ( $20^{\circ}\text{C}$  to  $0^{\circ}\text{C}$ ),  $4.0^{\circ}\text{C}/\text{min}$  ( $20^{\circ}\text{C}$

to  $-10^{\circ}\text{C}$ ),  $3.1^{\circ}\text{C}/\text{min}$  ( $20^{\circ}\text{C}$  to  $-20^{\circ}\text{C}$ ) et  $1.7^{\circ}\text{C}/\text{min}$  ( $20^{\circ}\text{C}$  to  $-30^{\circ}\text{C}$ ). The samples were left there at least 24 hours before mechanical testing. The time spend between the removal of samples from the cold room and the end of mechanical testing was about 2 minutes. The three mechanical properties were determined according to the ASTM D-143-94 standard (ASTM 1997), with some modifications in order to achieve the objectives of this work.

The shear strength parallel to the grain test was carried out in the radial-longitudinal failure plane. Load was applied at a rate of 5.0 mm per min until complete failure. There was no offset between the inner edge of the supporting surface and the specific plane along which the failure occurs. The calculated fracture area of each sample was  $250\text{ mm}^2$ . The shear strength  $\tau$  is defined as the load at failure (N) divided by the shear area ( $\text{mm}^2$ ), expressed in MPa.

The cleavage or splitting was performed following the radial-longitudinal failure plane. Samples were fixed in the center of jaws before starting the test in order to distribute the forces equally. Load was applied at a rate of 5.0 mm per min until complete failure. The cleavage strength  $\tau$  is the ratio of load at failure (N) divided by the sample width (mm), expressed in N/mm.

The static bending test was performed with a three-point loading system. Both the upper support, which carries the load, and the two lower supports were made with a dense wood to avoid changes in temperature between the sample and the external environment. These three supports had a radius of 15 mm. The span length was 140 mm and load was applied at a crosshead rate of 30.0 mm per min until complete failure. MOR and MOE were calculated with data obtained with an acquisition hardware.

Green weight of each sample was taken immediately after each mechanical test to the nearest 0.0001 g. The green volume of the sample was then measured by immersion in water to the nearest 0.01 g. Samples were then oven-dried at  $103^{\circ}\text{C}$  during at least 24 hours to obtain their oven-dry weight, measured to the nearest 0.0001 g. These measurements

served to calculate the MC at the time of mechanical tests as well as the basic density (oven-dry mass divided by green volume, BD). The growth rings of each sample were counted and then divided by the thickness of sample, 10 mm for the three types, in order to calculate the average annual growth width (RW). In this study, as in other works (cf. Zhang 1995) RW was used as indicator of growth rate. This variable may influence BD and mechanical properties in some species (Zhang 1995).

Data were analyzed using the software Statistical Analysis System (SAS) version 9.2 (SAS Institute 2007). First, models of analysis of variance (ANOVA) of one or two factors were adjusted to data according to the variables of the study. The GLM procedure of SAS was initially used for analysis. When the assumption of normality was not found, a log or square root transformation was used. However, when no transformation was found that could improve the normality and the homogeneity of data, the MIXED procedure was applied. Multiple comparisons of means were made using the "Fisher Protected LSD" (least significant difference) method. This approach was carried out to verify significant effects of temperature and wood types (heartwood and sapwood) of samples on shear, cleavage and static bending properties. Correlation analyses among these three mechanical properties, MC, BD and RW were performed at a probability level of 0.05 and 0.01. Such analyses allowed to identify some independent variables that may explain the variation observed in the mechanical properties. Multiple regression analyses were performed to determine the influence or not of each independent variable (MC, BD and RW), on the dependent variable at each temperature of study. The stepwise method was used, with inclusion or exclusion of independent variables in the models set at the 0.10 probability level. The autonomy between independent variables was accomplished for the model used. The quantitative contribution of each independent variable on the three mechanical properties of wood was obtained by calculating the beta coefficients.

## 3.4 Results and discussion

### 3.4.1 Wood properties

The main results of average MC, BD, RW for the two species and wood types (heartwood and sapwood) by pooling all specimens used for all temperatures are shown in Table 3.1. MC was significantly higher for sapwood than for heartwood for both species. Balsam fir had a higher MC than black spruce wood. MC of black spruce logs are similar to those reported by Hernández and Quirion (1993), Hernández and Quirion (1995), Hernández and Lessard (1995) and Hernández and Boulanger (1997).

The main BD of black spruce wood was higher than that of balsam fir wood (Table 3.1). Means of BD of the two species were slightly higher than those reported by Jessome (1977), 406 kg/m<sup>3</sup> for black spruce and 335 kg/m<sup>3</sup> for balsam fir, and by Laganière and Bédard (2009), 409 kg/m<sup>3</sup> and 326 kg/m<sup>3</sup>, respectively.

There was a statistically significant difference in BD between heartwood and sapwood of black spruce. Sapwood was slightly denser than heartwood. RW was higher in heartwood than in sapwood of this species (Table 3.1). Density and RW are negatively correlated in black spruce (Koubaa *et al.* 2000; Koubaa *et al.* 2005). However, Koubaa *et al.* (2000) highlighted that for black spruce, this relationship is not clear yet and that it may be age-dependent, with a decrease when wood reaches maturity.

Despite of the statistically significant difference in BD found between heartwood and sapwood for balsam fir, values of RW for heartwood and sapwood were not statistically significant (Table 3.1). Zhang (1995) found that BD was negatively but not significantly correlated with RW for *Abies nephrolepis* and *Abies fabri*.

**Table 3.1.** Means and standard error (in parentheses) of the mean of MC, BD and RW of the two species studied.

| Species      | MC (%)                                |              | BD (kg/cm <sup>3</sup> ) |                  | RW (mm)          |                  |
|--------------|---------------------------------------|--------------|--------------------------|------------------|------------------|------------------|
|              | H                                     | S            | H                        | S                | H                | S                |
| Black spruce | 50 A <sup>1</sup><br>(1) <sup>2</sup> | 139 B<br>(2) | 417 A<br>(0.002)         | 425 B<br>(0.003) | 1.38 A<br>(0.02) | 0.88 B<br>(0.02) |
| Balsam fir   | 105 A<br>(2)                          | 178 B<br>(2) | 357 A<br>(0.002)         | 351 B<br>(0.001) | 1.51 A<br>(0.03) | 1.43 A<br>(0.03) |

MC = moisture content; BD = basic density; RW = annual ring width; H = heartwood; S = sapwood.

<sup>1</sup> Means within a row followed by the same letter are not significantly different at 0.05 probability level, for each property tested separately.

<sup>2</sup> Number in parentheses correspond to the standard error of the mean.

The higher RW for balsam fir wood was noted by Jessome (1977). He found values of 1.3 mm and 2.8 mm for black spruce and balsam fir, respectively. However, this author did not study probable differences between heartwood and sapwood.

### 3.4.2 Shear strength

The temperature and wood type had a significant effect on shear strength for the two wood species (Tables 3.2 and 3.3, and Figure 3.3). Shear strength increased as temperature decreased from 0°C to -30°C for samples of heartwood and sapwood. The increase in shear strength was higher in sapwood than in heartwood for the two wood species. Between -10°C and -30°C, the difference between sapwood and heartwood was statistically significant at 0.05 probability level for black spruce and balsam fir.

The influences of temperature and wood type on shear strength were negligible for temperatures of 0°C and higher, except for sapwood of balsam fir at 10°C (Tables 3.2 and 3.3, and Figure 3.3). In this case, shear strength of heartwood samples was significantly higher than those of sapwood. This difference is not important for practical purposes because the numerical difference between both types of wood (0.8 MPa) is negligible in comparison to the difference obtained under freezing temperatures. There was also an unexpected high value for shear strength at 20°C for balsam fir heartwood and sapwood samples compared to temperatures of 0°C and 10°C. In this case, the high coefficients of

variation observed (24% and 31% for heartwood and sapwood, respectively) could explain this result. Despite of higher BD of black spruce, shear strength of balsam fir was higher than for black spruce for the same temperature below 0°C (Figure 3.3). As discussed later, the higher MC of balsam fir wood was responsible for a more pronounced mechanical reinforcement with decreasing temperature.

**Table 3.2.** Effects of temperature and type of wood on three mechanical properties of black spruce wood.

| Temperature (°C) | Shear (MPa)   |                  | Cleavage (N/mm) |              | Static bending |               |                   |                   |
|------------------|---|------------------|-----------------|--------------|----------------|---------------|-------------------|-------------------|
|                  |   |                  |                 |              | MOR (MPa)      |               | MOE (MPa)         |                   |
|                  | H   | S                | H               | S            | H              | S             | H                 | S                 |
| -30° C           | 7.7 A <sup>1</sup> a <sup>2</sup><br>(0.2) <sup>3</sup> | 10.3 Ba<br>(0.3) | 27 Aa<br>(1)    | 67 Ba<br>(3) | 89 Aa<br>(2)   | 140 Ba<br>(6) | 10045 Aa<br>(164) | 15012 Ba<br>(560) |
| -20° C           | 7.0 Ab<br>(0.2)   | 9.2 Bb<br>(0.3)  | 30 Aa<br>(1)    | 60 Bb<br>(3) | 83 Aab<br>(2)  | 119 Bb<br>(5) | 9786 Aa<br>(160)  | 14064 Ba<br>(555) |
| -10° C           | 5.8 Ac<br>(0.2)   | 7.8 Bc<br>(0.2)  | 29 Aa<br>(1)    | 47 Bc<br>(2) | 74 Abc<br>(2)  | 98 Bc<br>(4)  | 9164 Aab<br>(188) | 11814 Bb<br>(501) |
| 0° C             | 4.2 Ade<br>(0.1)  | 4.1 Ad<br>(0.1)  | 20 Ab<br>(1)    | 24 Bd<br>(1) | 68 Acd<br>(2)  | 68 Ad<br>(2)  | 8671 Abc<br>(160) | 8630 Ac<br>(238)  |
| 10° C            | 4.5 Ad<br>(0.2)   | 4.1 Ad<br>(0.1)  | 19 Ab<br>(1)    | 22 Bd<br>(1) | 66 Ade<br>(2)  | 66 Ad<br>(2)  | 8506 Abc<br>(171) | 8605 Ac<br>(238)  |
| 20° C            | 3.9 Ae<br>(0.1)   | 4.0 Ad<br>(0.2)  | 18 Ab<br>(1)    | 21 Bd<br>(1) | 61 Ae<br>(2)   | 62 Ad<br>(2)  | 8121 Ac<br>(195)  | 8345 Ac<br>(249)  |

H = heartwood; S = sapwood.

<sup>1</sup> Means within a row followed by the same uppercase letter are not significantly different at 0.05 probability level. Means of each mechanical property tested separately.

<sup>2</sup> Means within a column followed by same lowercase letter are not significantly different at 0.05 probability level.

<sup>3</sup> Number in parentheses corresponds to the standard error of the mean.

**Table 3.3.** Effects of temperature and type of wood on three mechanical properties of balsam fir wood.

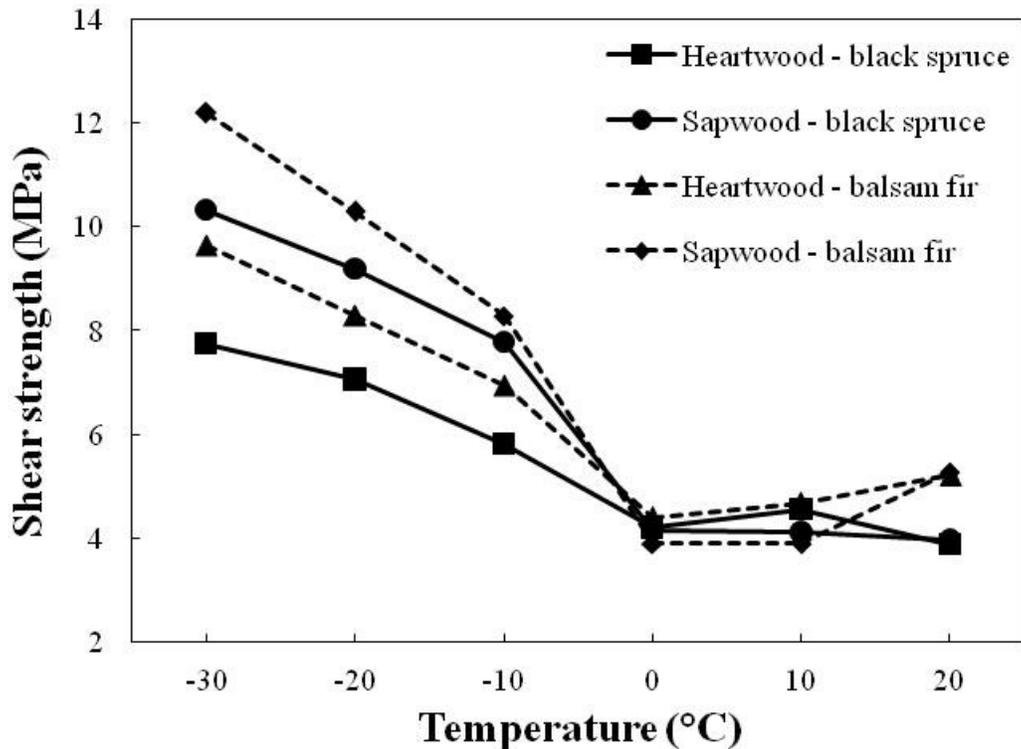
| Temperature (°C) | Shear (MPa)   |                  | Cleavage (N/mm) |                | Static bending |               |                   |                   |
|------------------|---|------------------|-----------------|----------------|----------------|---------------|-------------------|-------------------|
|                  |   |                  |                 |                | MOR (MPa)      |               | MOE (MPa)         |                   |
|                  | H   | S                | H               | S              | H              | S             | H                 | S                 |
| -30° C           | 9.6 A <sup>1</sup> a <sup>2</sup><br>(0.5) <sup>3</sup> | 12.2 Ba<br>(0.4) | 40 Aab<br>(2)   | 56 Ba<br>(3)   | 99 Aa<br>(4)   | 145 Ba<br>(5) | 11119 Aa<br>(507) | 14040 Ba<br>(552) |
| -20° C           | 8.3 Ab<br>(0.3)   | 10.3 Bb<br>(0.3) | 41 Aa<br>(2)    | 64 Bb<br>(3)   | 83 Ab<br>(4)   | 113 Bb<br>(5) | 9864 Ab<br>(469)  | 12413 Bb<br>(482) |
| -10° C           | 6.9 Ac<br>(0.3)   | 8.3 Bc<br>(0.2)  | 35 Ab<br>(1)    | 49 Bc<br>(2)   | 76 Ab<br>(3)   | 90 Bc<br>(3)  | 9482 Ab<br>(414)  | 11089 Bc<br>(485) |
| 0° C             | 4.4 Ad<br>(0.2)   | 3.9 Ad<br>(0.1)  | 19 Ac<br>(1)    | 18 Ad<br>(0.6) | 65 Ac<br>(2)   | 58 Bd<br>(1)  | 8189 Ac<br>(357)  | 7577 Ad<br>(304)  |
| 10° C            | 4.7 Ade<br>(0.2)  | 3.9 Bd<br>(0.2)  | 17 Ac<br>(1)    | 18 Ad<br>(0.3) | 60 Ac<br>(2)   | 60 Ad<br>(1)  | 7867 Ac<br>(291)  | 7486 Ad<br>(247)  |
| 20° C            | 5.2 Ae<br>(0.3)   | 5.3 Ae<br>(0.4)  | 18 Ac<br>(1)    | 17 Ad<br>(0.4) | 55 Ad<br>(2)   | 55 Ae<br>(1)  | 7611 Ac<br>(336)  | 7169 Ad<br>(229)  |

H = heartwood; S = sapwood.

<sup>1</sup> Means within a row followed by the same uppercase letter are not significantly different at 0.05 probability level. Means of each mechanical property tested separately.

<sup>2</sup> Means within a column followed by same lowercase letter are not significantly different at 0.05 probability level.

<sup>3</sup> Number in parentheses corresponds to the standard error of the mean.



**Figure 3.3.** Effect of wood temperature on shear strength of black spruce and balsam fir woods.

### 3.4.3 Cleavage strength

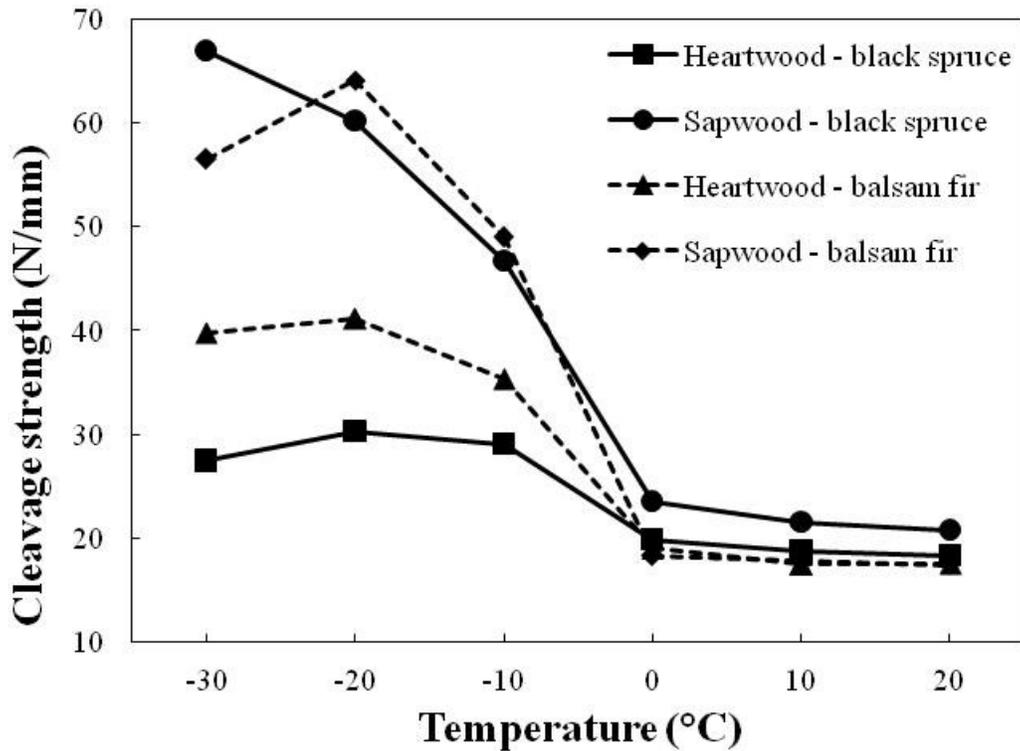
The effects of temperature and type of wood on cleavage strength of the two species studied are shown in Tables 3.2 and 3.3 and Figure 3.4. Cleavage strength increased as temperature decreased from 0°C to -20°C. As for shear strength, the increase in cleavage strength was greater in sapwood than in heartwood for the two wood species. Between -10°C and -20°C, the difference between sapwood and heartwood was statistically significant at 0.05 probability level for black spruce and balsam fir woods.

Table 3.2 also shows that for black spruce there was a statistically significant difference between cleavage strength of heartwood and sapwood for temperatures of 0°C, 10°C and

20°C. The multiple comparison test used in this work is very powerful and it may detect little differences between means. The p-values observed were close to the confidence level of 0.05 to 20°C and 10°C and close to 0.01 for 0°C (not shown). Moreover, the numerical difference between cleavage strength of heartwood and sapwood for these temperatures for black spruce (4 N/mm, 3 N/mm and 3 N/mm, respectively) compared to that of freezing temperatures is negligible. This fact could be explained in part by the slightly higher BD of sapwood (423 kg/m<sup>3</sup> – 0°C; 424 kg/m<sup>3</sup> – 10°C; 423 kg/m<sup>3</sup> – 20°C) samples than heartwood ones (418 kg/m<sup>3</sup> – 0°C; 421 kg/m<sup>3</sup> – 10°C; 418 kg/m<sup>3</sup> – 20°C). Thus, for practical purposes, after a careful observation of data, we may admit that the effect of temperature and MC in cleavage strength was negligible in this specific case.

Except for samples from sapwood of black spruce, a decrease from -20°C to -30°C involves an unexpected decrease of cleavage strength (Tables 3.2 and 3.3 and Figure 3.4). This result could be explained by the inefficiency of Styrofoam<sup>®</sup> sample protection to keep constant the temperatures at the time of the cleavage test at -30°C. Cleavage strength at this temperature was equivalent to a theoretical value obtained at about -15°C.

The higher MC of balsam fir wood in relation to black spruce wood was responsible for higher values of cleavage strength for freezing temperatures despite of the higher black spruce wood BD. As well as in shear strength, higher MC under freezing conditions provides greater reinforcement of wood strength due to a greater ice formation. The values obtained for cleavage strength at -20°C were approximately two times higher than those achieved at 20°C for heartwood and three times for sapwood for black spruce wood. This increase was approximately two and four times, respectively, for balsam fir wood.



**Figure 3.4.** Effect of wood temperature on cleavage strength of black spruce and balsam fir woods.

Jessome (1977) obtained a cleavage strength of 31.5 N/mm and 25.7 N/mm for green samples of black spruce and balsam fir, respectively, that is, higher than the results of this work. Among the plausible explanations, there is the fact that small clear wood samples were used compared to those used by Jessome (1977).

The literature concerning cleavage test are scarce and under freezing temperatures is inexistent. However, some work was done with tensile strength perpendicular to the wood grain. This test may provide some light on the effects of temperature and MC on a transverse mechanical test. Koran (1979) found a linear relationship between tensile stress perpendicular to the grain and temperature for black spruce green samples at temperatures

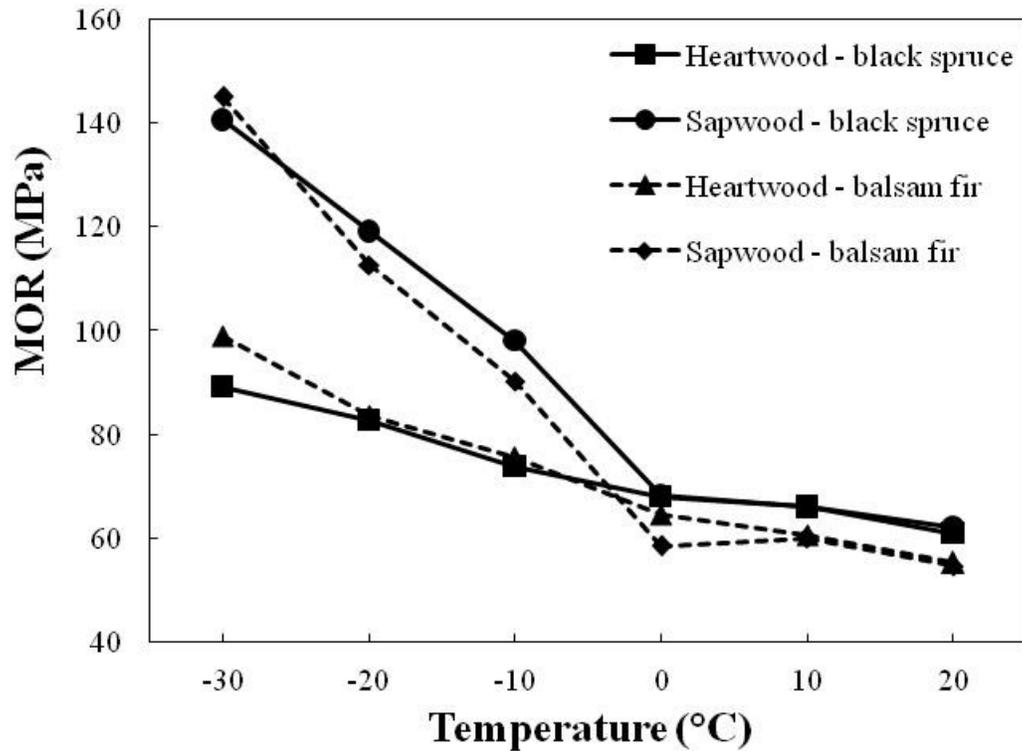
ranging from  $-60^{\circ}\text{C}$  to about  $100^{\circ}\text{C}$ . As temperature decreased from  $20^{\circ}\text{C}$  to  $-30^{\circ}\text{C}$  tensile strength increased about only 30%.

### **3.4.4 Bending strength**

There was a gradual increase in MOR and MOE as temperature decreased under  $0^{\circ}\text{C}$  for both species (Tables 3.2 and 3.3 and Figures 3.5 and 3.6). This increase in MOR and MOE was more pronounced for sapwood than for heartwood.

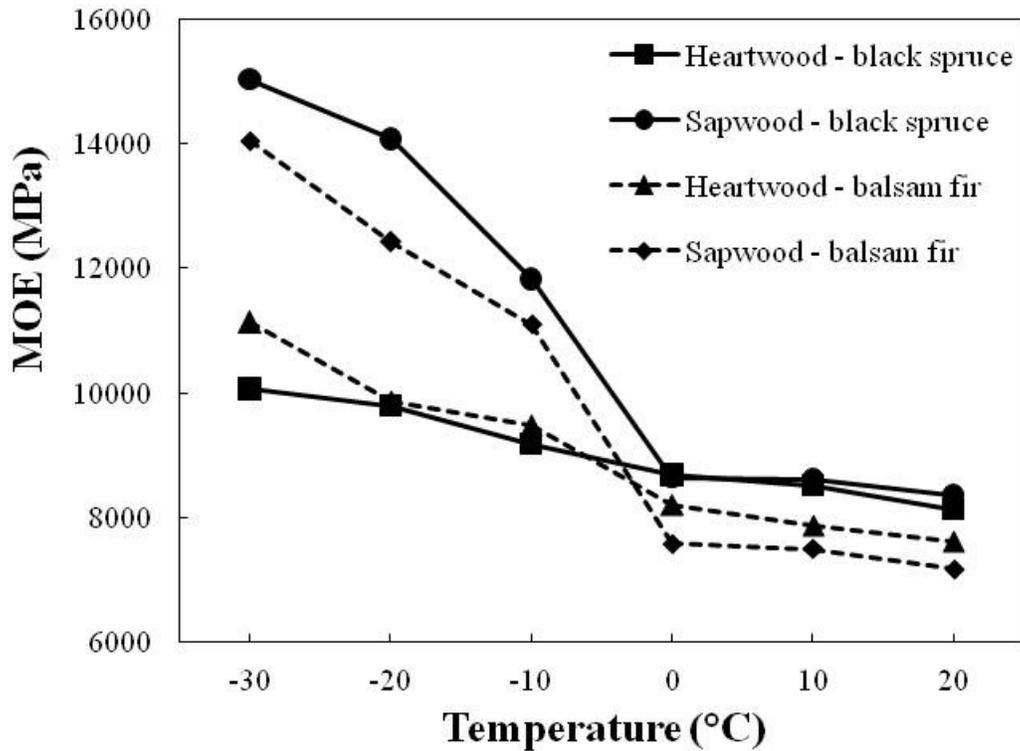
In general, there was not a statistically significant difference between heartwood and sapwood at 0.05 probability level for temperatures of  $0^{\circ}\text{C}$ ,  $10^{\circ}\text{C}$  and  $20^{\circ}\text{C}$  for both species (Table 3.2 and 3.3). The exception was for MOR samples of balsam fir at  $0^{\circ}\text{C}$  where a significant difference between the two types of wood was observed. However, the numerical difference between these values (7 MPa) compared to the other values relative to the freezing temperatures indicate that this variation is not important for practical purposes.

The higher BD of black spruce wood was responsible for its higher MOR and MOE than balsam fir for temperatures of  $0^{\circ}\text{C}$ ,  $10^{\circ}\text{C}$  and  $20^{\circ}\text{C}$ . However, the means values obtained for these properties were close under  $0^{\circ}\text{C}$  (Tables 3.2 and 3.3 and Figures 3.5 and 3.6). Thus, the stiffening of wood cells carried out by the ice formed in cell lumens was more important for balsam fir than for black spruce wood. This difference was not great enough to allow a noticeable variation of values of MOR and MOE for the two species. Moreover, the increase in strength with decreasing temperature for MOR and MOE was more uniform than those for shear and cleavage strength. This uniformity may be due to the fact that the bending test is simple to conduct and generally undeviating (Bodig and Jayne 1982). Thus, the errors induced by the complexity of execution of the mechanical test are minimized.



**Figure 3.5.** Effect of wood temperature on MOR of black spruce and balsam fir woods.

The values obtained for MOR at  $-30^{\circ}\text{C}$  were approximately two times higher than those achieved at  $20^{\circ}\text{C}$  for heartwood and three times for sapwood in black spruce wood (Table 3.2). For balsam fir wood, this increase was approximately two and four times higher, respectively (Table 3.3). However, for MOE, this same increase was less pronounced, being not higher than two times for both species and types of wood (Tables 3.2 and 3.3). Mishiro and Asano (1984) confirmed that MOR is more sensitive than MOE in *Picea* to changes of temperature and MC.



**Figure 3.6.** Effect of wood temperature on MOE of black spruce and balsam fir woods.

### 3.4.5 Sensitivity of mechanical properties to temperature variation

Means values determined at  $-10^{\circ}\text{C}$  were divided by a mean pooling the results obtained at  $0^{\circ}\text{C}$ ,  $10^{\circ}\text{C}$  and  $20^{\circ}\text{C}$ . These ratios were calculated for each property and wood species and are shown in Table 3.4. Values obtained at  $-10^{\circ}\text{C}$  were used to minimize probable effects of the Styrofoam<sup>®</sup> protections at  $-20^{\circ}\text{C}$  and  $-30^{\circ}\text{C}$  for shear and cleavage tests. The average of  $0^{\circ}\text{C}$ ,  $10^{\circ}\text{C}$  and  $20^{\circ}\text{C}$  was used because, in general, as discussed earlier, the effects of temperature in this temperature range were not significant at 0.05 probability level.

**Table 3.4.** Ratios of averages of each mechanical property at -10°C and the average of 0°C, 10°C and 20°C for black spruce and balsam fir woods.

| Species      | Shear |     | Cleavage |     | MOR |     | MOE |     |
|--------------|-------|-----|----------|-----|-----|-----|-----|-----|
|              | H     | S   | H        | S   | H   | S   | H   | S   |
| Black spruce | 1.4   | 1.9 | 1.5      | 2.1 | 1.1 | 1.5 | 1.1 | 1.4 |
| Balsam fir   | 1.5   | 1.9 | 2.0      | 2.8 | 1.3 | 1.6 | 1.2 | 1.5 |

The mechanical properties of balsam fir wood were more influenced by temperature changes than those of black spruce wood (Table 3.4). This was already expected because MC of balsam fir was higher than black spruce. Thus, the effects of ice reinforcement were more evident in the case of higher MCs. The ratios also confirmed that sapwood was more sensitive to temperature changes than heartwood. Again, the higher MC of sapwood was responsible for this behavior. Consequently, to take into account the MC values of the specie and its average sapwood thickness may be a good practice in sawmills at the time of chipping process by a chipper-canter in winter conditions.

For both species, the most sensitive mechanical property to temperature decrease was cleavage, followed by shear, MOR and MOE (Table 3.4). The higher sensitivity to temperature changes for MOR than MOE was already noted by Mishiro and Asano (1984). They obtained an increase of 65% and 16%, respectively, at 150% MC for the same temperature conditions of those of Table 3.4. Koran (1979) studied the effect of temperature on tensile strength perpendicular to the grain for green wood samples of black spruce. For the same temperature variation, this author found only 14% increase versus 50% (heartwood) and 110% (sapwood) for the same species in the present work.

Wood is an orthotropic material and the tubular forms of the cells and the orientation of the cellulose of the walls are responsible for the higher strength parallel to the grain than perpendicular to the grain. Thus, compressive tensile and shear strength are quite variable in these two directions (Panshin and de Zeeuw 1980). According to Wangaard (1950), tension perpendicular to the grain is only a small fraction of that parallel to the grain and closely related to the cleavage strength. It can be admitted that cleavage, as a perpendicular

mechanical property, is more prone to be influenced by ice reinforcement than the other parallel properties studied. In this case, the role played by the ice in the wood-ice composite is more evident when a perpendicular property is tested.

The different sensitivity of the mechanical properties of black spruce and balsam fir to temperature changes affects chipping process. As discussed earlier, shear, cleavage and bending are involved in this process. A modification in this relationship among these three properties due to the temperature change leads to a variation in chip size. This relationship of mechanical properties obtained in this work face to the temperature change is contrary to the discussion of Hernández and Quirion (1993), Hernández and Lessard (1995) and Hernández and Boulanger (1997). They stated that the ratio parallel to the grain and perpendicular to the grain is higher under frozen conditions and as a consequence thinner chips will be produced under these conditions. In the present work is suggested that as the cleavage and shear strength increase with decreasing temperature, the knife penetration in wood would be lower and thinner chips should be formed.

### **3.4.6 Relationships among mechanical properties and MC, BD and RW**

A linear correlation analysis was performed among mechanical properties (shear, cleavage, MOR and MOE) and MC, BD and RW for each type of wood and for the two species separately to find general tendencies in the data and to detect relationships among variables (not shown). The comparisons were made with two different groups, one for the treatments of 20°C, 10°C, and 0°C (group I) and another for the treatments of -10°C, -20°C and -30°C (group II). We hypothesized that, contrary to group II, in group I there is not an effect of freezing by the ice in cell lumens. Samples from heartwood had lower MC than sapwood samples in the most cases. Thus, data analysis by MC without taking in consideration if samples were obtained from heartwood or sapwood was another approach used in this work.

### 3.4.6.1 Shear strength

In general, for both species and types of wood, the linear correlation analysis showed that MC and BD had a positive and highly significant correlation with shear strength for groups I and II. For heartwood, shear strength was negatively correlated to RW for the two species. For sapwood, these two variables were positively correlated for black spruce whereas for balsam fir, the tendency was not clear (not shown).

Multiple regression models were then created to estimate shear strength (dependent variable) from MC, BD and RW (independent variables) for each temperature and species. The multiple regression equations and the beta coefficients with their respective individual contribution of each independent variable on shear strength are shown in Tables 3.5 and 3.6.

The models could explain from 19% to 68% of the total variation in shear strength for black spruce, and from 9% to 81% for balsam fir. A high coefficient of variation (COV) was obtained in equations relatively to 20°C for both species and for 10°C for balsam fir (Tables 3.5 and 3.6). It means that these equations may not be used for predictive purposes. It is desirable that the COV be lower than 15% to represent an accurate model to explain the dependent variable.

The MC is the most important factor contributing to the variation in shear strength for freezing temperatures in both species, with BD having a secondary role (Tables 3.5 and 3.6). Therefore, shear strength increases as MC and BD increases, but MC is more important than BD for this temperature range. Previous study showed that wood density had positive effects on shear strength of tropical hardwoods (Hernández and Almeida 2003).

There was a tendency of higher  $R^2$  and lower COV for models of temperatures below 0°C for both species, showing a better relationship between independent and dependent

variables (Tables 3.5 and 3.6). This indicates that MC had a great role in the increase of shear strength under freezing temperatures. The effect of other factors not studied on shear strength would be minor. For temperatures higher than 0°C, other independent variables besides those studied (MC, BD, and RW) might influence shear strength.

The RW was not an important factor to estimate shear strength for all temperature levels in both species. RW had some impact on shear only for balsam fir at -30°C (Tables 3.5 and 3.6).

The beta coefficients of MC in shear strength for temperatures below 0°C together shows that this independent variable, in average, had greater contribution in the variation of shear strength explained by the models for black spruce than balsam fir (72% and 75%, respectively). BD was the main element to predict shear strength for black spruce for temperatures of 0°C or higher. BD contributed, in average, for 77% of shear strength variation represented by the equation of 0°C, 10°C and 20°C together. MC was the main significant factor to predict shear strength, and it was negatively correlated with this property, for the temperatures of 0°C and 10°C for balsam fir wood. The model for the temperature of 20°C was not statistically significant at 0.05 probability level (Tables 3.5 and 3.6).

**Table 3.5.** Regression equations for shear strength obtained from independent variables of MC, BD and RW for black spruce wood.

| Equations   | R <sup>2</sup> | COV (%) |
|---|----------------|---------|
| SH <sub>(-30°C)</sub> = -0.2 + 0.025 MC + 16 BD<br>(0.70) <sup>1</sup> (0.26)<br>(73%) <sup>2</sup> (27%) | 0.56           | 13.4    |
| SH <sub>(-20°C)</sub> = -4 + 0.023 MC + 22 BD<br>(0.71) (0.38)<br>(65%) (35%)                             | 0.65           | 11.9    |
| SH <sub>(-10°C)</sub> = -3 + 0.022 MC + 19 BD<br>(0.76) (0.37)<br>(67%) (33%)                             | 0.68           | 11.9    |
| SH <sub>(0°C)</sub> = -1 + 11 BD + 0.4 RW<br>(0.53) (0.29)<br>(64%) (36%)                                 | 0.26           | 12.5    |
| SH <sub>(10°C)</sub> = -2 + 17 BD - 0.005 MC<br>(0.57) (-0.27)<br>(67%) (33%)                             | 0.43           | 14.6    |
| SH <sub>(20°C)</sub> = -0.7 + 11.0 BD<br>(0.43)<br>(100%)   | 0.19           | 16.7    |

SH = shear strength; MC = moisture content; BD = basic density; RW = annual ring width; R<sup>2</sup> = coefficient of determination; COV = coefficient of variation (%).

<sup>1</sup> Number in parentheses corresponds to beta coefficients of the regression.

<sup>2</sup> Quantitative contribution of the independent variable on the mechanical property (%).

**Table 3.6.** Regression equations for shear strength obtained from independent variables of MC, BD and RW for balsam fir wood.

| Equations  | R <sup>2</sup> | COV (%) |
|--|----------------|---------|
| SH <sub>(-30°C)</sub> = 0.03 + 0.041 MC - 0.8 RW + 17 BD<br>(0.76) <sup>1</sup> (-0.25) (0.22)<br>(62%) <sup>2</sup> (21%) (18%) | 0.81           | 9.9     |
| SH <sub>(-20°C)</sub> = -3 + 0.028 MC + 24 BD<br>(0.75) (0.45)<br>(62%) (38%)  | 0.73           | 9.2     |
| SH <sub>(-10°C)</sub> = -3 + 0.020 MC + 22 BD<br>(0.73) (0.57)<br>(56%) (44%)  | 0.70           | 8.7     |
| SH <sub>(0°C)</sub> = 5.0 - 0.006 MC<br>(-0.46)<br>(100%)  | 0.21           | 12.3    |
| SH <sub>(10°C)</sub> = 3 - 0.008 MC + 7 BD<br>(-0.46) (0.27)<br>(62%) (38%)  | 0.32           | 16.7    |
| SH <sub>(20°C)</sub> = 0.3 + 14 BD<br>(0.30)<br>(100%)   | 0.09           | 26.4    |

SH = shear strength; MC = moisture content; BD = basic density; RW = annual ring width; R<sup>2</sup> = coefficient of determination; COV = coefficient of variation (%).

<sup>1</sup> Number in parentheses corresponds to beta coefficients of the regression.

<sup>2</sup> Quantitative contribution of the independent variable on the mechanical property (%).

### 3.4.6.2 Cleavage strength

The linear correlation analysis shows that BD was positively and significantly correlated with cleavage strength for groups I and II for both species. However, sapwood of group II did not show a significant correlation with BD for the two species with MC acting as the only significant factor. For heartwood, MC was highly significantly and negatively correlated to cleavage strength of groups I and II for black spruce. For both species, MC was highly significant and positively correlated to cleavage strength of sapwood of the group II for both species. There was not a clear tendency observed for other cases. It was found also a negative and significant R value only for heartwood of group I for RW of black spruce. RW was significantly and negatively correlated with all temperature levels and types of wood for balsam fir. The exception was group II of sapwood, where there was not a clear tendency observed for RW (not shown).

Multiple linear regressions and the beta coefficients with their respective percentage of contribution on cleavage strength for the two species are shown in Tables 3.7 and 3.8. The models retained explain from 62% to 90% of total variation in cleavage strength for black spruce and from 20% to 82% for balsam fir.

Despite high values of  $R^2$ , the COV of models for both species was high (more than 15%) (Tables 3.7 and 3.8). These values highlight the great variation of results obtained for the cleavage tests. Previous work had confirmed the high values of COV in cleavage strength in relation to the other mechanical properties of wood (Jessome 1977). The sample must be correctly placed in the jaws to allow an equal distribution of forces during the test.

However, even if the sample is well fitted, this even distribution of forces is not always reached, thus creating greater variability in the results.

**Table 3.7.** Regression equations for cleavage strength obtained from independent variables of MC, BD and RW for black spruce wood.

| Equations  | R <sup>2</sup> | COV (%) |
|--|----------------|---------|
| CL <sub>(-30°C)</sub> = -70 + 0.44 MC + 178 BD<br>(0.92) <sup>1</sup> (0.25)<br>(79%) <sup>2</sup> (21%) | 0.90           | 16.1    |
| CL <sub>(-20°C)</sub> = -59 + 0.33 MC + 172 BD<br>(0.84) (0.28)<br>(75%) (25%)                           | 0.80           | 19.0    |
| CL <sub>(-10°C)</sub> = -39 + 0.20 MC + 138 BD<br>(0.82) (0.38)<br>(68%) (32%)                           | 0.79           | 14.2    |
| CL <sub>(0°C)</sub> = -30 + 116 BD + 0.032 MC<br>(0.77) (0.35)<br>(69%) (31%)                            | 0.67           | 12.7    |
| CL <sub>(10°C)</sub> = -24 + 97 BD + 0.029 MC<br>(0.77) (0.32)<br>(70%) (30%)                            | 0.63           | 13.2    |
| CL <sub>(20°C)</sub> = -22 + 92 BD + 0.025 MC<br>(0.73) (0.30)<br>(71%) (29%)                            | 0.62           | 12.9    |

CL = cleavage strength; MC = moisture content; BD = basic density; RW = annual ring width; R<sup>2</sup> = coefficient of determination; COV = coefficient of variation (%).

<sup>1</sup> Number in parentheses corresponds to beta coefficients of the regression.

<sup>2</sup> Quantitative contribution of the independent variable on the mechanical property (%).

**Table 3.8.** Regression equations for cleavage strength obtained from independent variables of MC, BD and RW for balsam fir wood.

| Equations  | R <sup>2</sup> | COV (%) |
|--|----------------|---------|
| CL <sub>(-30°C)</sub> = -41 + 0.23 MC + 158 BD<br>(0.84) <sup>1</sup> (0.41)<br>(67%) <sup>2</sup> (33%) | 0.55           | 19.6    |
| CL <sub>(-20°C)</sub> = -75 + 0.32 MC + 231 BD<br>(1.05) (0.50)<br>(68%) (32%)                           | 0.82           | 14.2    |
| CL <sub>(-10°C)</sub> = -26 + 0.18 MC + 123 BD<br>(0.96) (0.43)<br>(69%) (31%)                           | 0.64           | 15.2    |
| CL <sub>(0°C)</sub> = 22 - 2.5 RW<br>(-0.45)<br>(100%)   | 0.20           | 13.0    |
| CL <sub>(10°C)</sub> = 21 - 2.5 RW<br>(-0.48)<br>(100%)  | 0.23           | 13.3    |
| CL <sub>(20°C)</sub> = 12 + 20 BD - 1.1 RW<br>(0.37) (0.33)<br>(53%) (47%)                               | 0.32           | 8.8     |

CL = cleavage strength; MC = moisture content; BD = basic density; RW = annual ring width; R<sup>2</sup> = coefficient of determination; COV = coefficient of variation (%).

<sup>1</sup> Number in parentheses corresponds to beta coefficients of the regression.

<sup>2</sup> Quantitative contribution of the independent variable on the mechanical property (%).

The same tendencies obtained for shear strength were observed for cleavage strength (Tables 3.7 and 3.8). MC is the most important factor involved in the variation of cleavage strength under freezing temperatures for both species. A less important role was played by BD. Therefore, cleavage strength increases as MC and BD increase, but MC is more important than BD for these temperature conditions.

The BD was the more important factor to explain cleavage strength variation for black spruce for temperatures of 0°C and higher, with MC playing a minor role. The most important variable for this temperature range was RW for balsam fir. However, the R<sup>2</sup>s of these equations were relatively low, which indicates that there are probably other factors implicated in cleavage strength than those included in this regression analysis (Tables 3.7 and 3.8).

The analysis of the beta coefficients of the different models for treatments below 0°C together shows that MC, in average, had a higher contribution to the variation in cleavage strength for black spruce than for balsam fir (74% and 68%, respectively) (Tables 3.7 and 3.8).

BD was the main factor to predict shear strength for black spruce for temperatures of 0°C or higher, with an average contribution of 70%. RW was negatively correlated to cleavage strength for all temperatures of 0°C and higher for balsam fir. This variable was the main factor to explain cleavage strength variation (100% of contribution), for the equations concerning 0°C and 10°C. However, for 20°C, BD was the most important factor to predict cleavage strength (53%), with RW playing a secondary role (47%).

### **3.4.6.3 Bending strength**

#### **3.4.6.3.1 MOR**

There was a highly and positively significant correlation of BD with MOR for groups I and II for the two types of wood and species, except for group II of black spruce sapwood. This correlation was also positive but not significant at 0.05 probability level. MC of black spruce was significantly and negatively correlated to group I for all types of wood; for group II, MC was positively and highly significant correlated with sapwood. This variable was only significant for balsam fir heartwood of group II. RW was highly significant and negatively correlated with MOR for the two groups and wood types of black spruce and balsam fir. However, this variable was highly significant and positively correlated with sapwood of group II of black spruce and not significant to the same group and type of wood for balsam fir (not shown).

The multiple regression equations for MOR are shown in Tables 3.9 and 3.10. The models obtained may explain from 51% to 86% of the total variation for black spruce and from 51% to 81% for balsam fir. These values, together with the low COVs obtained, indicate that these equations may be used to predictive purposes.

MC and BD were the main variable to explain MOR variation for both species (Tables 3.9 and 3.10). MC was the main responsible for this variation under freezing temperatures whereas BD was the main factor for temperatures of 0°C, 10°C and 20°C for both species. BD was always present in all models for both species, but it played a secondary role under temperatures below the freezing point of water. Moreover, RW was not an important factor to estimate MOR for both species in the studied temperature range.

An analysis of the beta coefficients of MC in MOR for treatments below 0°C together shows that this independent variable, in average, had greater contribution in the variation of MOR explained by the models to black spruce than to balsam fir (65% and 53%, respectively) (Tables 3.9 and 3.10).

**Table 3.9.** Regression equations for MOR obtained from independent variables of MC, BD and RW for black spruce wood.

| Equations   | R <sup>2</sup> | COV (%) |
|---|----------------|---------|
| MOR <sub>(-30°C)</sub> = -153 + 0.58 MC + 471 BD + 14 RW<br>(0.95) <sup>1</sup> (0.37) (0.16)<br>(64%) <sup>2</sup> (25%) (11%) | 0.86           | 11.2    |
| MOR <sub>(-20°C)</sub> = -103 + 0.40 MC + 396 BD<br>(0.82) (0.37)<br>(69%) (31%)  | 0.85           | 9.8     |
| MOR <sub>(-10°C)</sub> = -70 + 0.26 MC + 311 BD<br>(0.72) (0.45)<br>(61%) (39%)   | 0.78           | 10.3    |
| MOR <sub>(0°C)</sub> = -41 + 262 BD<br>(0.71)<br>(100%)   | 0.51           | 10.2    |
| MOR <sub>(10°C)</sub> = -34 + 265 BD - 6 RW - 0.03 MC<br>(0.70) (-0.25) (-0.19)<br>(61%) (22%) (17%)                            | 0.70           | 7.7     |
| MOR <sub>(20°C)</sub> = -51 + 269 BD<br>(0.81)<br>(100%)  | 0.66           | 7.5     |

MOR = modulus of rupture; MC = moisture content; BD = basic density; RW = annual ring width; R<sup>2</sup> = coefficient of determination; COV = coefficient of variation (%).

<sup>1</sup> Number in parentheses corresponds to beta coefficients of the regression.

<sup>2</sup> Quantitative contribution of the independent variable on the mechanical property (%).

**Table 3.10.** Regression equations for MOR obtained from independent variables of MC, BD and RW for balsam fir wood.

| Equations  | R <sup>2</sup> | COV (%) |
|--|----------------|---------|
| MOR <sub>(-30°C)</sub> = -159 + 0.57 MC + 562 BD<br>(0.93) <sup>1</sup> (0.63)<br>(60%) <sup>2</sup> (40%) | 0.81           | 11.5    |
| MOR <sub>(-20°C)</sub> = -59 + 0.38 MC + 325 BD - 6 RW<br>(0.83) (0.49) (-0.16)<br>(56%) (33%) (11%)       | 0.81           | 10.8    |
| MOR <sub>(-10°C)</sub> = -10 + 0.20 MC + 223 BD - 10 RW<br>(0.60) (0.43) (-0.35)<br>(43%) (31%) (26%)      | 0.76           | 9.6     |
| MOR <sub>(0°C)</sub> = -15 + 226 BD - 0.03 MC<br>(0.83) (-0.14)<br>(86%) (14%)                             | 0.76           | 7.5     |
| MOR <sub>(10°C)</sub> = -17 + 216 BD<br>(0.86)<br>(100%)   | 0.74           | 6.5     |
| MOR <sub>(20°C)</sub> = -3 + 162 BD<br>(0.71)<br>(100%)  | 0.51           | 9.5     |

MOR = modulus of rupture; MC = moisture content; BD = basic density; RW = annual ring width; R<sup>2</sup> = coefficient of determination; COV = coefficient of variation (%).

<sup>1</sup> Number in parentheses corresponds to beta coefficients of the regression.

<sup>2</sup> Quantitative contribution of the independent variable on the mechanical property (%).

BD was the main element to predict MOR for black spruce and balsam fir for temperatures of 0°C or higher, with an average contribution of 87%, versus 94% for balsam fir (Tables 3.9 and 3.10).

### **3.4.6.3.2 MOE**

The same correlation between MOR and BD was found for MOE. However, there was only a significant relationship for group II of black spruce sapwood for MC. RW was highly significantly correlated only for group II for this latter species. RW was negatively correlated with heartwood and positively correlated with sapwood. This independent variable was negatively correlated with all groups and types of wood for balsam fir (not shown).

The multiple regression equations for MOE are shown in Tables 3.11 and 3.12. The models obtained may explain from 17% to 87% of the total variation for black spruce and from 36% to 71% for balsam fir wood. These values, together with the low COV obtained, demonstrated that these equations are useful for predictive purposes, except for the case of the model of 0°C for black spruce. In this case, the  $R^2$  was too low (0.17) indicating that other factors not included in the model may play an important role in this property. Further investigations are needed. Moreover, the equation for 10°C for black spruce was not significant at 0.05 probability level.

MC and BD were the main variables to explain MOE variation for both species (Tables 3.11 and 3.12). MC was the most important factor for this variation under temperatures below 0°C whereas BD was the main factor for temperatures of 0°C and higher for both species. BD was always present in all models for both species, but it played a secondary role under temperatures below the freezing point of water. Moreover, RW was a minor contributor to estimate MOE for both species, especially for freezing temperatures.

**Table 3.11.** Regression equations for MOE obtained from independent variables of MC, BD and RW for black spruce wood.

| Equations  | R <sup>2</sup> | COV (%) |
|--|----------------|---------|
| MOE <sub>(-30°C)</sub> = -9082 + 57 MC + 34364 BD + 1747 RW<br>(0.99) <sup>1</sup> (0.29) (0.20)<br>(67%) <sup>2</sup> (19%) (14%) | 0.87           | 9.3     |
| MOE <sub>(-20°C)</sub> = -8654 + 52 MC + 34755 BD + 1126 RW<br>(0.91) (0.28) (0.16)<br>(68%) (21%) (11%)                           | 0.85           | 9.4     |
| MOE <sub>(-10°C)</sub> = -354 + 31 MC + 19016 BD<br>(0.75) (0.24)<br>(76%) (24%)   | 0.66           | 12.1    |
| MOE <sub>(0°C)</sub> = 2546 + 14612 BD<br>(0.41)<br>(100%)   | 0.17           | 10.0    |
| MOE <sub>(10°C)</sub> = MC, BD, RW n.s.  | 0.10           | 10.3    |
| MOE <sub>(20°C)</sub> = -360 + 20609 BD<br>(0.50)<br>(100%)  | 0.25           | 10.3    |

MOE = modulus of elasticity; MC = moisture content; BD = basic density; RW = annual ring width; R<sup>2</sup> = coefficient of determination; COV = coefficient of variation (%); n.s. = not significant at 0.05 probability level.

<sup>1</sup> Number in parentheses corresponds to beta coefficients of the regression.

<sup>2</sup> Quantitative contribution of the independent variable on the mechanical property (%).

**Table 3.12.** Regression equations for MOE obtained from independent variables of MC, BD and RW for balsam fir wood.

| Equations  | R <sup>2</sup> | COV (%) |
|--|----------------|---------|
| MOE <sub>(-30°C)</sub> = -12827 + 43 MC + 54613 BD<br>(0.79) <sup>1</sup> (0.69)<br>(56%) <sup>2</sup> (44%) | 0.68           | 12.7    |
| MOE <sub>(-20°C)</sub> = -3129 + 33 MC + 32181 BD - 1014 RW<br>(0.68) (0.46) (-0.27)<br>(48%) (33%) (19%)    | 0.71           | 12.3    |
| MOE <sub>(-10°C)</sub> = 642 + 22 MC - 1517 RW + 24982 BD<br>(0.47) (-0.40) (0.36)<br>(39%) (32%) (29%)      | 0.64           | 13.1    |
| MOE <sub>(0°C)</sub> = -4725 + 35676 BD<br>(0.80)<br>(100%)  | 0.64           | 11.5    |
| MOE <sub>(10°C)</sub> = 2323 + 18289 BD - 834 RW<br>(0.45) (-0.43)<br>(51%) (49%)                            | 0.66           | 9.3     |
| MOE <sub>(20°C)</sub> = -1299 + 24161 BD<br>(0.60)<br>(100%)   | 0.36           | 14.1    |

MOE = modulus of elasticity; MC = moisture content; BD = basic density; RW = annual ring width; R<sup>2</sup> = coefficient of determination; COV = coefficient of variation (%).

<sup>1</sup> Number in parentheses corresponds to beta coefficients of the regression.

<sup>2</sup> Quantitative contribution of the independent variable on the mechanical property (%).

The analysis of the beta coefficients of MC for temperatures below 0°C showed that this independent variable, in average, had a greater contribution in the variation of MOE for black spruce than for balsam fir (70% and 48%, respectively) (Tables 3.11 and 3.12).

BD was the main factor to predict MOE for black spruce and balsam fir for temperatures of 0°C or higher pooled, with an average contribution of 100%, versus 84% for balsam fir (Tables 3.11 and 3.12).

### **3.5 Conclusions and recommendations**

This study showed that temperature and moisture content of black spruce and balsam fir woods influence significantly the mechanical properties involved in the chip formation process by a chipper-canter. The results confirmed that the effect of moisture content must be taken into account only for temperatures below 0°C. At higher temperatures, there were no important effects of moisture content on wood strength for the two softwoods. Furthermore, the effects of changes in temperature were more evident under higher moisture content conditions, for both species. Thus, the higher strength values were obtained at -30°C for sapwood. The multiple regression analyses showed that under temperatures below 0°C, moisture content was the most important factor to explain all mechanical properties, with basic density playing a secondary role. However, for temperature of 0°C and higher, basic density was the principal factor, with moisture content playing a minor role. In general, growth rate did not affect significantly the mechanical properties for all temperatures. Moreover, mechanical properties of balsam fir wood were more sensitive to changes in temperature below 0°C than black spruce wood. Among the mechanical properties studied, cleavage was the most sensitive to changes in temperature, followed by shear, MOR and MOE for both species. This fact could play an important role in the chip formation process and could generate a significant variation in chip distribution size produced by a chipper canter. Finally, to take into account physical and mechanical properties of each specie and the utilization of adequate chipper-canter cutting variables in

summer and winter conditions may improve chipping process in sawmills in order to obtain a greater proportion of acceptable chips.

### 3.6 Literature cited

American Society for Testing and Materials. 1997. ASTM D 143–94. *Standard methods of testing small, clear specimens of timber*. Philadelphia, PA. 679 pp.

Bodig, J. and B. Jayne. 1982. *Mechanics of wood and wood composites*. Van Nostrand Reinhold, New York, NY. 712 pp.

Christie, R.D. 1986. *Chip thickness and its effect on pulping needs further study*. Pulp & Paper Canada, 87(3):37-38, 41, 43.

Christie, R.D. 1987. *Chip screening for pulping uniformity*. Tappi Journal, 70(4):113-117.

Deomano, E.C. and A. Zink-Sharp. 2004. *Bending properties of wood flakes of three southern species*. Wood and Fiber Science, 36(4):493-499.

Forest Products Laboratory. 1999. *Wood handbook - wood as an engineering material*. Gen. Tech. Rep. FPL–GTR–113. Madison, WI:U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. 463 pp.

Fuller, W.S. 1983. *Chipping, screening, and cleaning*. Pulp and Paper Manufacture. Volume 1: Properties of fibrous raw materials and their preparation for pulping, chapitre 14, 128-153. Edité par M.J. Kocurek et C.F.B. Stevens, troisième édition.

Gerhards, C.C. 1982. *Effect of the moisture content and temperature on the mechanical properties of wood : an analysis of immediate effects*. Wood and Fiber, 14(1):4-36.

Green, D.W., J.W. Evans, J.D. Logan, and W.J. Nelson. 1999. *Adjusting modulus of elasticity of lumber for changes in temperature*. Forest Products Journal 49(10):82-94.

Green, D.W. and J.W. Evans. 2008. *The immediate effect of temperature on the modulus of elasticity of green and dry lumber*. Wood and Fiber Science, 40(3):374-383.

Hatton, J.V. 1975. *WFPL chip quality analytical procedure: effect of chipper, wood species and season on production of pin chips and fines*. Pulp and Paper Canada, 76(8):64-70.

Hellström, L.M., P.A. Gradin, and T. Carlberg. 2008. *A method for experimental investigation of the wood chipping process*. Nordic Pulp and Paper Research Journal, 23(3):339-342.

- Hellström, L.M., P. Isaksson, P.A. Gradin, and K. Eriksson. 2009. *An analytical and numerical study of some aspects of the wood chipping process*. Nordic Pulp and Paper Research Journal, 24(2):225-230.
- Hernández, R.E. and B. Quirion. 1993. *Effect of chipper-canter knife clamp on the quality of chips produced from black spruce*. Forest Products Journal, 43(9):8-14.
- Hernández, R.E. and B. Quirion. 1995. *Effect of knife clamp, log diameter, and species on the size distribution of pulp chips produced by a chipper-canter*. Forest Products Journal, 45(7/8):83-90.
- Hernández, R.E. and J. Boulanger. 1997. *Effect of the rotation speed on the size distribution of black spruce pulp chips produced by a chipper-canter*. Forest Products Journal, 47(4):43-49.
- Hernández, R.E. and J. Lessard. 1997. *Effect of cutting width and cutting height on the size distribution of black spruce pulp chips produced by a chipper-canter*. Forest Products Journal, 47(3):89-95.
- Hernández, R.E. and G. Almeida. 2003. *Effects of wood density and interlocked grain on the shear strength of three Amazonian tropical hardwoods*. Wood and Fiber Science, 35(2):154-166.
- Hoekstra, P.L, M.A. Veal, P.F. Lee, and J.D. Sinkey. 1983. *The effects of chip size on mechanical pulp properties and energy consumption*. Tappi Journal, 69(9):119-122.
- Jessome, A.P. 1977. *Résistance et propriétés connexes des bois indigènes au Canada*. Laboratoire des produits forestiers de l'est, OT, Rapport technique de foresterie 21, 37 pp.
- Koran, Z. 1979. *Tensile properties of spruce under different conditions*. Wood and Fiber, 11(1):38-49.
- Koubaa, A., S.Y. Zhang, N. Isabel, J. Beaulieu, and J. Bousquet. 2000. *Phenotypic correlations between juvenile-mature wood density and growth in black spruce*. Wood and Fiber Science, 32(1):61-67.
- Koubaa, A., N. Isabel, S.Y. Zhang, J. Beaulieu, and J. Bousquet. 2005. *Transition from juvenile to mature wood in black spruce (Picea mariana (Mill) B.S.P.)*. Wood and Fiber Science. 37(3):445-455.
- Laganière, B. and N. Bédard. 2009. *Debarking enhancement of frozen logs. Part I: Effect of temperature on bark/wood bond strength of balsam fir and black spruce logs*. Forest Products Journal, 59(6):19-24.
- McLauchlan, T.A and J.A. Lapointe. 1979. *Production of chips by disc chippers*. Joint Textbook Committee of the Paper Industry (TAPPI), Chip quality monograph, 15-32.

- Mishiro, A. and I. Asano. 1984. *Mechanical properties of wood at low temperatures. Effect of moisture content and temperature on the bending properties of wood. II. Moisture content beyond the fiber-saturation point.* Mokuzai Gakkaishi, 30(4):277-286.
- Mishiro, A. 1990. *Effect of freezing treatments on the bending properties of wood.* Bull. Tokyo Univ. For., 82, 177-189.
- Olson, D., J.V. Hatton, and K. Hunt. 1980. *Effect of chip thickness in kraft-anthraquinone pulping of trembling aspen.* Tappi Journal, 63(2):109-110.
- Panshin, A.J. and C. de Zeeuw. 1980. *Textbook of wood technology: structure, identification, properties, and uses of the commercial woods of the United States and Canada.* New York : McGraw-Hill. 722 pp.
- Parent, B. 2010. *Ressource et industrie forestières, portrait statistique.* Ministère des Forêts, Gouvernement du Québec.
- Robertsén, L. and B. Lonnberg. 1986. *Significance of chip thickness in CRMP and RMP. Part 2. A laboratory study with pine chips.* Paperi Ja Puu, 68(12):932-940.
- SAS Institute. 2007. SAS/Stat User's Guide, release 9.2 ed. SAS Institute Inc, Cary, NC.
- Siimes, F.E. 1967. *The effect of specific gravity, moisture content, temperature and heating time on the tension and compression strength and elastic properties perpendicular to the grain of Finnish pine, spruce and birch wood and the significance of those factors on the checking of timber at kiln drying.* Publication 84, The State Institute for Technical Research, Helsinki.
- Tikka, P., H. Tähkänen, and K. Kovasin. 1993. *Chip thickness vs. kraft pulping performance: experiments by multiple hanging baskets in batch digesters.* Tappi Journal 76(3):131-136.
- Uhmeier, A. 1995. *Some fundamental aspects of wood chipping.* Tappi Journal, 78(10): 79-86.
- Wangaard, F.F. 1950. *The mechanical properties of wood.* John Wiley & Sons, Inc., New York, NY. 377 pp.
- Zhang, S.Y. 1995. *Effect of growth rate on wood specific gravity and selected mechanical properties in individual species from distinct wood categories.* Wood Sci. Technol, 32(3):197-204.

## Conclusions générales

Ce travail a eu comme objectif d'étudier les effets de la température et de la teneur en humidité du bois sur les propriétés mécaniques sollicitées lors du procédé de mise en copeaux d'équarrisseuse-fragmenteuse. Les propriétés mécaniques étudiées furent le cisaillement longitudinal, le fendillement et la flexion statique.

Pour ce faire, dix billes d'épinette noire et dix billes de sapin baumier furent sélectionnées de manière à obtenir des échantillons jumelés provenant du duramen et de l'aubier pour chaque propriété mécanique. L'épaisseur des éprouvettes fut fixée à 10 mm pour couvrir le plus possible la largeur moyenne de l'aubier des deux espèces. Les autres dimensions furent variables selon le type de propriété mécanique à étudier. De plus, les dimensions des échantillons de cisaillement et de fendillement furent choisies dans le but d'être comparables à la longueur moyenne des copeaux produits par équarrisseuse-fragmenteuse. La teneur en humidité des éprouvettes était toujours au-dessus du point de saturation des fibres. Les essais mécaniques furent conduits à des températures des échantillons entre  $-30^{\circ}\text{C}$  et  $20^{\circ}\text{C}$ , à des intervalles de  $10^{\circ}\text{C}$ . La teneur en humidité, la masse volumique basale et la largeur des cernes ont été également déterminées. Des analyses de corrélations simples et des régressions multiples furent réalisées afin de déterminer l'influence ou non de chaque variable indépendante (teneur en humidité, masse volumique basale et largeur des cernes) sur l'explication de la variable dépendante (cisaillement longitudinal, fendillement et flexion statique).

Les résultats ont montré que, pour les deux espèces, la teneur en humidité de l'aubier a été plus grande que celle du duramen. La teneur en humidité du sapin baumier fut plus élevée que celle de l'épinette noire, autant pour le duramen que pour l'aubier. Par contre, la masse volumique basale de l'épinette noire fut plus élevée que celle du sapin baumier, autant pour l'aubier que pour le duramen.

La température d'essai et la position d'obtention des échantillons dans les billes (aubier ou duramen) ont eu un effet significatif sur les propriétés mécaniques étudiées seulement au-dessous de 0°C, pour les deux espèces. Dans ce cas, l'effet de la température sur les propriétés mécaniques fut de loin plus fort pour l'aubier que pour le duramen. En général, pour des températures de 0°C et plus, les propriétés mécaniques n'ont pas été affectées par la température d'essai ni par la teneur en humidité des échantillons.

L'analyse de sensibilité des propriétés mécaniques aux changements de température a montré, qu'au-dessous de 0°C, les propriétés mécaniques du sapin baumier furent plus sensibles aux changements de température que celles de l'épinette noire. De plus, le fendillement fut la propriété la plus sensible face aux changements de température, suivie par le cisaillement et le MOR et le MOE en flexion. Ce fait aurait une grande importance durant le processus de formation des copeaux par les équarrisseuses-fragmenteuses, plus précisément sur la variation de la distribution de la taille des copeaux rencontrée en conditions hivernales par rapport à celles estivales.

Les analyses de corrélations simples et celles de régression multiple ont montré qu'au-dessous de 0°C la teneur en humidité fut le principal facteur explicatif de la variation des propriétés mécaniques suivi, en deuxième lieu, de la masse volumique basale. Par contre, cette dernière variable a été l'élément le plus important pour expliquer la variation des propriétés mécaniques étudiées à 0°C et plus. Dans la plupart des cas, les cernes de croissance n'ont pas eu d'effet important sur la variation des propriétés mécaniques.

À partir des résultats de cette étude, le procédé de production de copeaux papetiers au moyen d'équarrisseuse-fragmenteuse du point de vue du comportement mécanique du bois sera mieux compris. Les influences de la température et de la teneur en humidité du bois sur les propriétés mécaniques impliqués lors de la fragmentation par les équarrisseuses-fragmenteuses sont maintenant plus documentées. Ainsi, les résultats de ce travail devraient servir à obtenir une meilleure performance de ces machines durant toutes les conditions d'opérations des usines de sciage au Québec.

Finalement, les études des effets de la température sur les propriétés mécaniques du bois dans le contexte québécois sont à leur débuts. La compréhension des mécanismes d'action de ce facteur sur les propriétés du bois d'épinette noire et de sapin baumier permettra le développement de futures études sur d'autres espèces d'importance économique au Québec.

## Bibliographie

American Society for Testing and Materials. 1997. ASTM D 143–94. *Standard methods of testing small, clear specimens of timber*. Philadelphia, PA. 679 pp.

Bodig, J. et B. Jayne. 1982. *Mechanics of wood and wood composites*. Van Nostrand Reinhold, New York, NY. 712 pp.

Bowyer, J.L.; R. Shmulsky et J.G. Haygreen. 2007. *Forest products and wood science : an introduction*. 5th ed. Ames, Iowa : Blackwell. 558 pp.

Cousins, W.J. 1974. *Effects of strain-rate on the transverse strength of Pinus radiata wood*. Wood Science and Technology, 8:307-321.

Deomano, E.C. et A. Zink-Sharp. 2004. *Bending properties of wood flakes of three southern species*. Wood and Fiber Science, 36(4):493-499.

Forest Products Laboratory. 1999. *Wood handbook - Wood as an engineering material*. Gen. Tech. Rep. FPL–GTR–113. Madison, WI:U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. 463 pp.

Fuller, W.S. 1983. *Chipping, screening, and cleaning*. Pulp and Paper Manufacture. Volume 1: Properties of fibrous raw materials and their preparation for pulping, chapitre 14, 128-153. Edité par M.J. Kocurek et C.F.B. Stevens, troisième édition.

Franz, N.C. 1958. *An analysis of the wood-cutting process*. The University of Michigan Press, Michigan. 152 pp.

Gerhards, C.C. 1982. *Effect of the moisture content and temperature on the mechanical properties of wood : An analysis of immediate effects*. Wood and Fiber, 14(1):4-36.

Green, D.W.; J.W. Evans; J.D. Logan et W.J. Nelson. 1999. *Adjusting modulus of elasticity of lumber for changes in temperature*. Forest Products Journal 49(10):82-94.

Green, D.W. et J.W. Evans. 2008. *The immediate effect of temperature on the modulus of elasticity of green and dry lumber*. Wood and Fiber Science, 40(3):374-383.

Hatton, J.V. 1975. *WFPL chip quality analytical procedure: effect of chipper, wood species and season on production of pin chips and fines*. Pulp and Paper Canada, 76(8):64-70.

Hatton, J.V. 1976. *Effect of chipper, wood species and season on chip thickness distribution and chip packing density of sawmill and woodroom chips*. Tappi, 59(6):151-155.

Heger, L. 1974. *Longitudinal variation of specific gravity in stems of black spruce, balsam fir, and lodgepole pine*. Can. J. For. Res. 4: 321-326.

Hellström, L.M.; P.A. Gradin et T. Carlberg. 2008. *A method for experimental investigation of the wood chipping process*. Nordic Pulp and Paper Research Journal, 23(3):339-342.

Hellström, L.M.; P. Isaksson; P.A. Gradin et K. Eriksson. 2009. *An analytical and numerical study of some aspects of the wood chipping process*. Nordic Pulp and Paper Research Journal, 24(2):225-230.

Hernández, R.E. et B. Quirion. 1993. *Effect of chipper-canter knife clamp on the quality of chips produced from black spruce*. Forest Products Journal, 43(9):8-14.

Hernández, R.E. et B. Quirion. 1995. *Effect of knife clamp, log diameter, and species on the size distribution of pulp chips produced by a chipper-canter*. Forest Products Journal, 45(7/8):83-90.

Hernández, R.E. et J. Boulanger. 1997. *Effect of the rotation speed on the size distribution of black spruce pulp chips produced by a chipper-canter*. Forest Products Journal, 47(4): 43-49.

Hernández, R.E. et J. Lessard. 1997. *Effect of cutting width and cutting height on the size distribution of black spruce pulp chips produced by a chipper-canter*. Forest Products Journal, 47(3):89-95.

Hernández, R.E. et G. Rojas. 2002. *Effects of knife jointing and wear on the planed surface quality of sugar maple wood*. Wood and Fiber Science, 34(2):293-305.

Hernández, R.E. et L.F. de Moura. 2002. *Effects of knife jointing and wear on the planed surface quality of northern red oak wood*. Wood and Fiber Science, 34(4):540-552.

Hernández, R.E. 2007. *Influence of accessory substances, wood density and interlocked grain on the compressive properties of hardwoods*. Wood Sci Technol, 41:249-265.

Hernández, R.E. 2009. *L'usinage du bois. Dans: Manuel de Foresterie, chapitre 34: Procédés de transformation du bois*, pages 1428-1442.

Hernández, R.E. 2009b. *Notes de cours d'usinage*. Département des sciences du bois et de la forêt, Université Laval.

Hernández, R.E.; S. Kuljich et A. Koubaa. 2010. *Effect of cutting width and cutting height on the wood surface quality of black spruce cants produced by a chipper-canter*. Wood and Fiber Science, 42(3):1-12.

Hoadley, R.B. 2000. *Understanding wood: a craftsman's guide to wood technology*. Taunton Press, Newtown, Connecticut, 256 pp.

- Johansson, L.; F. Peng et R. Simonson. 1997. *Effects of temperature and sulfonation on shear deformation of spruce wood*. Wood Science and Technology, 31(2):105-117.
- Jodin, P. 1994. *Le bois matériau d'ingénierie*. Association pour la recherche sur le bois en Lorraine. École nationale du génie rural, des eaux et des forêts. Arbolor Nancy, 443 pp.
- Kwasniakova, K.; B.V. Kokta et Z. Koran. 1996. *Strength properties of black spruce wood under different treatment*. Wood Science and Technology, 30(6):463-475.
- Koch, P. 1985. *Utilization of hardwoods growing on southern pine sites*. Volume II. Processing. Agriculture handbook N° 605, USDA, Forest Service, Washington, DC.
- Kollmann, F. et W.A. Côté, Jr. 1968. *Principles of wood science and technology*. Vol. I. Springer-Verlag, New York, NY.
- Koubaa, A.; S.Y. Zhang; N. Isabel; J. Beaulieu et J. Bousquet. 2000. *Phenotypic correlation between juvenile-mature wood density and growth in black spruce*. Wood Fiber Science. 32(1): 61-67.
- Koubaa, A.; N. Isabel; S.Y. Zhang; J. Beaulieu et J. Bousquet. 2005. *Transition from juvenile to mature wood in black spruce (Picea mariana (Mill) B.S.P.)*. Wood Fiber Science. 37(3): 445-455.
- Koran, Z. 1979. *Tensile properties of spruce under different conditions*. Wood and Fiber, 11(1):38-49.
- Koran, Z. 1981. *Energy consumption in mechanical fibre separation as a function of temperature*. Transactions of the Technical Section 7(2):40-44.
- Lang, E.M. 1997. *An alternative method for shear strength assessment*. Forest Products Journal, 47(11/12):81-84.
- Lang, E.M. et Z. Kovacs. 2001. *Size effect on shear strength measured by the ASTM method*. Forest Products Journal, 51(3):49-52.
- Mishiro, A. et I. Asano. 1984. *Mechanical properties of wood at low temperatures. Effect of moisture content and temperature on the bending properties of wood. II. Moisture content beyond the fiber-saturation point*. Mokuzai Gakkaishi, 30(4):277-286.
- McKenzie, W.M. 1960. *Fundamental aspects of the wood cutting process*. Forest Products Journal, 10(9):447-456.
- McLauchlan, T.A et J.A. Lapointe. 1979. *Production of chips by disc chippers*. Joint Textbook Committee of the Paper Industry (TAPPI), Chip quality monograph, 15-32.
- Mishiro, A. 1990. *Effect of freezing treatments on the bending properties of wood*. Bull. Tokyo Univ. For., 82, 177-189.

Nadeau, J.S.; R. Bennett et E.R. Fuller Jr. 1982. *An explanation for the rate-of-loading and the duration-of-load effects in wood in terms of fracture mechanics*. Journal of Materials Science 17:2831-2840.

Okkonen, E.A. et B.H. River. 1989. *Factors affecting the strength of block-shear specimens*. Forest Products Journal, 39(1):43-50.

Panshin, A.J. et C. de Zeeuw. 1980. *Textbook of wood technology: structure, identification, properties, and uses of the commercial woods of the United States and Canada*. New York : McGraw-Hill. 722 pp.

Rodden, G. 1986. *Goodbye, Mr. (un-spec) Chips*. Pulp and Paper Canada, 87(9):46-47.

Palka, L.C. 1973. *Predicting the effect of specific gravity, moisture content, temperature and strain rate on the elastic properties of softwoods*. Wood Science and Technology, 7 (2):127-141.

Parent, B. 2010. *Ressource et industrie forestières, portrait statistique*. Ministère des Forêts, Gouvernement du Québec.

SAS Institute. 2007 SAS/Stat User's Guide, release 9.2 ed. SAS Institute Inc, Cary, NC.

Siimes, F.E. 1967. *The effect of specific gravity, moisture content, temperature and heating time on the tension and compression strength and elastic properties perpendicular to the grain of Finnish pine, spruce and birch wood and the significance of those factors on the checking of timber at kiln drying*. Publication 84, The State Institute for Technical Research, Helsinki.

Stewart, H.A. 1977. *Optimum rake angle related to selected strength properties of wood*. Forest Products Journal, 27(1):51-53.

Stewart, H.A. 1988. *How to determine rake angles from strength properties of wood*. Wood and Wood Products, (10):121-126.

Uhmeier, A. 1995. *Some fundamental aspects of wood chipping*. Tappi Journal, 78 (10): 79-86.

Umbanhowar, C.E.; A.M. Lambert et L. VanDelinder. 2008. *Effects of freezing on Young's modulus for twigs of coniferous and deciduous trees and shrubs*. Canadian Journal of Forest Research, 38(2):394-399.

Wangaard, F.F. 1950. *The mechanical properties of wood*. John Wiley & Sons, Inc., New York, NY. 377 pp.

Woodson, G.E. et P. Koch. 1970. *Tool forces and chip formation in orthogonal cutting of loblolly pine*. Forest Service Research Paper SO-52. U.S. Department of Agriculture.

Zhang, S.Y. 1995. *Effect of growth rate on wood specific gravity and selected mechanical properties in individual species from distinct wood categories*. Wood Sci. Technol, 32(3):197-204.