

# Table des matières

Remerciements .....	i
Résumé .....	ii
Avant - propos .....	iii
Table des matières .....	v
Liste des tableaux .....	vii
Liste de Figures.....	viii
Introduction.....	1
Chapitre 1.....	3
Revue de littérature .....	3
1.1. La coupe orthogonale du bois.....	3
1.1.1. Efforts induits lors de la coupe orthogonale du bois .....	4
1.1.2. Formation du copeau .....	6
1.1.2.1. Coupe 90°-0° .....	6
1.1.2.2. Coupe 90°-90° .....	8
1.1.2.3. Coupe 0° -90° .....	8
1.2. Usinage à l'aide d'une équarrisseuse-fragmenteuse.....	9
1.3. La qualité de surface du bois .....	16
1.3.1. Défauts reliés à la qualité de surface du bois.....	17
1.3.1.1. Le fil arraché.....	17
1.3.1.2. Le fil laineux ou le fil pelucheux .....	18
1.3.1.3. Marques de couteau .....	18
1.3.2. Topographie de la surface.....	19
1.3.2.1. Caractérisation des profils .....	19
1.3.2.2. Les appareils de mesure.....	20
1.3.2.3. Les filtres .....	22
1.3.2.4. Les paramètres de mesure .....	24
1.4 Objectifs et hypothèses du travail.....	28
Chapitre 2.....	29
Matériel et méthodes.....	29
2.1. Matériel d'essai.....	29
2.2. Expériences à l'usine .....	29
2.3. Expériences au laboratoire.....	31
2.3.1. Mesures de la masse volumique basale et de la teneur en humidité.....	32
2.3.2. Mesures de la topographie de la surface du bois .....	32
2.3.3. Évaluation de la profondeur du fil arraché .....	36
2.3.4. Analyse statistique .....	37

Chapitre 3.....	39
Article scientifique.....	39
Effect of cutting width and cutting height on the wood surface quality of black spruce cants produced by a chipper-canter.....	39
3.1. Abstract .....	39
3.2. Introduction.....	40
3.3. Materials and methods.....	42
3.3.1. Sawmill experiments .....	42
3.3.2. Laboratory experiments .....	43
3.3.3. Surface topography evaluation.....	46
3.3.4. Statistical analyses .....	48
3.4. Results and discussion .....	48
3.4.1. Principal component analysis (PCA).....	49
3.4.2. Along the grain assessment .....	51
3.4.3. Across the grain assessment .....	56
3.4.4. Torn grain evaluation.....	57
3.4.5. Correlation Analysis .....	61
3.5. Conclusions and recommendations .....	62
3.6. Literature cited.....	63
Conclusions générales .....	65
Bibliographie .....	68
Annexe A .....	74
Annexe B .....	83

## Liste des tableaux

<b>Tableau 1.1.</b> Paramètres généraux, norme ISO 4287 (1998).....	25
<b>Tableau 1.2.</b> Tableau récapitulatif des profils caractéristiques des états de surface: correspondance entre les profils, les courbes de densité les valeurs d'obliquité et d'aplatissement et leur signification (adapté de Triboulot 1984). .....	27
<b>Tableau 2.1.</b> Description des billes utilisées lors de l'expérience.....	32
<b>Tableau 2.2.</b> Paramètres définis par ISO 4287 (1998) utilisés lors de l'évaluation de la qualité de surface du bois.....	36
<b>Table 3.1.</b> Description of logs used in the experiments.....	43
<b>Table 3.2.</b> Quality surface assessment parameters used in the surface quality evaluation ....	47
<b>Table 3.3.</b> Factor analysis scores for all surface quality parameters following principal components initial factor method (factor loadings $>0.6$ are shown in bold). ....	50
<b>Table 3.4.</b> Results of the variance analysis for the along and across the grain measurements and for torn grain depth measurements (simple effects and interaction statistically significant at the 0.01 probability level that were analyzed are showed in bold). .....	52
<b>Table 3.6.</b> Averages of $R_a$ (arithmetic mean deviation of the roughness profile) and $W_a$ (arithmetic mean deviation of the waviness profile) for the analysis across the grain.....	59
<b>Table 3.7.</b> Averages of torn grain depth.....	60

## Liste de Figures

<b>Figure 1.1.</b> Principaux types de coupe orthogonale (d'après Hoadley 2000).....	5
<b>Figure 1.2.</b> Géométrie de la coupe orthogonale et des composantes des forces de coupe (adaptée de Woodson et Koch 1970). .....	5
<b>Figure 1.3.</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).....	7
<b>Figure 1.4.</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). .....	7
<b>Figure 1.5.</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). .....	7
<b>Figure 1.6.</b> Transition de copeau de type B à copeau de type A. Le copeau de type B a été obtenu à un angle d'attaque de 60° et à 0,25 mm de profondeur de coupe. Le copeau de type A a été obtenu à un angle d'attaque de 60° et à 1 mm de profondeur de coupe (adaptée de Stewart 1979). .....	9
<b>Figure 1.7.</b> Tête porte-outils d'une équarrisseuse-fragmenteuse, munie de 8 porte-couteaux (tiré de Hernández et Lessard 1997). .....	10
<b>Figure 1.8.</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 l'autre plus longue qui sert à fragmenter les copeaux (b).....	10
<b>Figure 1.9.</b> Schéma montrant l'action de coupe du couteau et du contre-fer des équarrisseuses-fragmenteuses Comact et Sawquip (tiré d'Hernández et Quirion 1993).....	11
<b>Figure 1.10.</b> Exemple du changement de l'orientation de la partie plus courte du couteau plié le long de sa trajectoire de coupe (diamètre de coupe de 203,2 mm et largeur de coupe de 25 mm). Notez qu'au début, le couteau va couper presque perpendiculairement au fil (orientation 10°-80°) et que l'orientation devient oblique à la fin de sa course dans la bille (orientation 39°-51°). r = rayon de l'axe de rotation de la tête porte-couteaux (283,4 mm); d = distance entre la barre d'appui et l'axe de rotation de la tête (212,7 mm). .....	12
<b>Figure 2.1.</b> Schéma montrant la position relative du petit bout pour chaque classe de diamètre dans l'équarrisseuse-fragmenteuse; LC = largeur de coupe; HC = hauteur de coupe.....	30
<b>Figure 2.2.</b> Schéma montrant la position des éprouvettes dans la bille usinée: a, b et c représentent les éprouvettes pour la mesure de la masse volumique basale et de la teneur en humidité; et 1, 2, 3 et 4 représentent les planches pour la mesure de qualité de surface du bois du côté droit et gauche de la bille.....	33

<b>Figure 2.3.</b> Défonceuse à commandes numériques «Fulltech» avec les capteurs laser montés sur son arbre.....	35
<b>Figure 3.1.</b> View of the end-milling cutterhead (left side) of the swecan chipper-canter showing some knife holders.....	44
<b>Figure 3.2.</b> Diagram showing the relative position of the small log end for each diameter class (in mm) on the chipper-canter; CW = cutting width; CH = cutting height. Note that since the lower bedplate is fixed, the relative position through which the knife edge enters the wood will change with log diameter and taper.....	45
<b>Figure 3.3.</b> Effect of cutting height and position in the cant on roughness (a) and waviness (b) along the grain. Filled and open symbols correspond to the upper and lower position in the cant, respectively. The figure was made with the estimates of surface parameters, which have been transformed ( $R_a^{-1.5}$ and $W_a^{-0.5}$ ). Consequently, an inverse interpretation is required. ....	53
<b>Figure 3.4.</b> Diagram showing the variation in the orientation of the finishing knife edge during their path on the log (203.2 mm of log diameter and 25 mm of cutting width). The angle of the finishing knife edge increases from about 10° (orientation 10°-80°) at the point of entrance to 39° (orientation 39°-51°) at the point of exit of the log. r= radius of the cutting circle of the cutterhead (283.4 mm); d= distance from the bedplate of the machine to center of the cutting circle of the cutterhead .....	55

## Introduction

La qualité de surface du bois est un domaine important pour tous les secteurs de l'industrie de transformation de bois. Une surface du bois de bonne qualité est désirable même dès le premier débitage. Elle pourrait contribuer ainsi à minimiser les coûts de production, les pertes de matière ligneuse en diminuant les dimensions cibles, les pertes par classement des débits de même que les coûts ultérieurs pour la deuxième transformation du bois tels que les traitements de finition.

Dans l'industrie de la transformation du bois de l'est du Canada, le premier débitage est couramment confié à une équarrisseuse-fragmenteuse. Cette machine permet de transformer des billes de faible diamètre en quartelots sans pourtant produire de la sciure. En plus d'éliminer la présence virtuelle des dosses, elle produit des équarris et des copeaux dans une seule opération. En effet, les équarris et les copeaux obtenus sont des produits désirés: le premier pour le bois de sciage et le deuxième pour la fabrication de la pâte. Au Québec, l'équarrisseuse-fragmenteuse la plus répandue est celle fabriquée par les équipementiers Sawquip et Comact. Elle est constituée principalement de deux têtes de coupe, installées face à face, d'un support plat qui sert d'appui à la bille et d'un système d'alimentation.

Les avantages économiques de cette machine et la diminution du diamètre moyen du bois débité en scierie ont favorisé son utilisation au premier débitage. Cela a permis son développement depuis les années 60 dans l'industrie du bois canadienne. L'amélioration de la performance des équarrisseuses-fragmenteuses doit se faire en fonction de deux objectifs, soit de produire des copeaux ayant des dimensions optimales, soit de fournir des surfaces de bois de bonne qualité. En somme, il faut trouver des combinaisons des variables de coupe capables de satisfaire d'une part, un marché de pâte qui fixe le prix d'achat en fonction de la distribution des dimensions des fragments, et d'autre part, faire face à l'évolution de la demande des clients en termes de qualité de la surface de sciage.

Les travaux de recherche sur l'effet des variables de coupe de l'équarrisseuse-fragmenteuse sur la qualité de surface produite sont très limités. Ce genre de travail reste à faire et constitue donc l'objet principal de cette étude. En revanche, des études sur l'amélioration de la qualité des copeaux produits par cette machine sont plus nombreuses. Les travaux se sont principalement orientés sur la diminution de l'épaisseur des copeaux et l'augmentation de la quantité de copeaux acceptables. Par exemple, la modification de l'angle du contre-fer ainsi que sa position (ou recul) par rapport à l'arête tranchante du couteau provoque une diminution de l'épaisseur des copeaux. La largeur de coupe a également un effet important sur la taille des copeaux: une diminution de celle-ci entraîne une diminution de l'épaisseur de copeaux. Cette épaisseur diminue également au fur et à mesure que la vitesse de coupe augmente.

L'objectif principal du présent travail fut d'étudier l'influence de la largeur et de la hauteur de coupe sur la qualité de surface des équarris produite par une équarrisseuse-fragmenteuse. Pour atteindre notre objectif, des billes d'épinette noire de trois classes de diamètre ont été usinées à deux largeurs de coupe, soit un total de six conditions de coupe. Cette expérience a été réalisée en deux étapes afin d'évaluer également l'effet de la saison (hiver et été) sur la qualité de surface.

# Chapitre 1

## Revue de littérature

### 1.1. La coupe orthogonale du bois

La coupe conventionnelle du bois est définie comme étant l'action de l'arête tranchante d'un outil sur une pièce de bois, qui produit des copeaux de dimensions variables. La formation de ces copeaux dépendra entre autres de la géométrie de l'outil, des propriétés du bois et de la direction de coupe par rapport à l'orientation des éléments ligneux. La qualité de la surface obtenue suite à l'usinage sera ainsi reliée à la formation des copeaux. L'usinage est alors un procédé de déformations, contraintes et ruptures (Hoadley 2000). Pour fins d'analyse, on distingue deux modes principaux de coupe, soit les coupes orthogonale et périphérique.

La coupe orthogonale décrit une action dans laquelle l'arête tranchante de l'outil est perpendiculaire à la direction du mouvement de la pièce de bois, et où la surface créée est parallèle à l'originale. L'orientation et la direction de la force sont contrôlées par le type d'outil de coupe et par la machine. L'outil présente une certaine géométrie tandis que le bois a des propriétés physiques et mécaniques particulières. La direction du mouvement de l'outil de même que sa forme déterminent le développement des contraintes imposées au bois et, par conséquent, la manière dont la rupture ou « coupe » est réalisée.

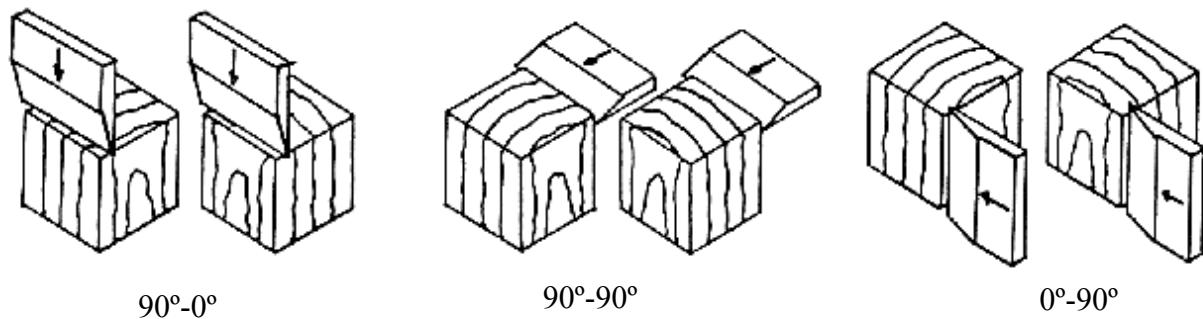
McKenzie (1960) décrit les principales situations qui peuvent se présenter en coupe orthogonale avec une notation comportant deux chiffres (figure 1.1). Le premier représente l'angle entre l'arête tranchante de l'outil et le fil du bois tandis que le deuxième indique

l'angle entre la direction de coupe et celle du fil. Il y a donc trois principaux types de coupe orthogonale de base:  $90^\circ-0^\circ$ ,  $90^\circ-90^\circ$  et  $0^\circ-90^\circ$

En coupe orthogonale, on distingue trois angles de coupe principaux (figure 1.2), soit : l'angle d'attaque ( $\alpha$ ), l'angle de dépouille ( $\gamma$ ) et l'angle de l'outil ( $\beta$ ). Le premier affecte la pénétration de l'arête tranchante dans le bois et intervient lors du dégagement du copeau. Un angle  $\alpha$  faible provoque un effort important dans le bois et l'outil gratte le bois plutôt qu'il ne le coupe. Un angle  $\alpha$  important diminue les efforts mais tend à provoquer l'arrachement des fibres. L'angle de dépouille  $\gamma$  sert à éviter le talonnement de l'outil sur le bois. S'il est trop faible, la face de dépouille va frotter sur le bois, provoquant de l'échauffement et l'usure de l'outil. S'il est trop grand, l'arête tranchante devient plus fragile. Finalement, le troisième angle  $\beta$  est complémentaire aux deux précédents et conditionne la résistance de l'outil à l'usure. Les angles les plus adéquats sont choisis en fonction du type d'usinage, du matériau usiné et de la composition de l'outil (Jodin 1994).

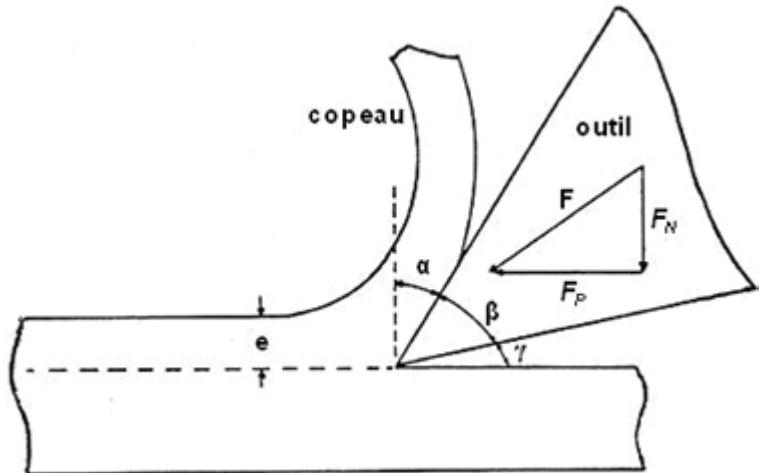
### 1.1.1. Efforts induits lors de la coupe orthogonale du bois

La force de coupe résultante qui agit sur le bois peut être décomposée en une force parallèle ( $F_P$ ) et une force normale ( $F_N$ ) par rapport à la surface générée (figure 1.2). La magnitude et la direction des composantes parallèle et normale de la force résultante vont dépendre des divers facteurs propres à l'outil de coupe, aux conditions de travail ainsi qu'au matériau travaillé (Koch 1985). Parmi les facteurs reliés à l'outil, on peut mentionner la vitesse de coupe, les angles d'attaque ( $\alpha$ ), de dépouille ( $\gamma$ ) et de l'outil ( $\beta$ ), l'état d'affutage de l'outil, la friction entre le copeau et la face d'attaque de l'outil et la vibration induite durant l'usinage. Hernández et Rojas (2002) et Hernández et de Moura (2002) ont remarqué que les forces de coupe augmentent avec l'usure des outils de coupe. Par ailleurs, les forces diminuent avec l'augmentation de l'angle d'attaque (Woodson et Koch 1970, Stewart 1977). Également, les facteurs d'aménage (la hauteur de coupe, centrage de la bille et



**Figure 1.1.** Principaux types de coupe orthogonale (d'après Hoadley 2000)

- $\mathbf{F}$  = force résultante  
 $\mathbf{F}_N$  = force normale  
 $\mathbf{F}_P$  = force parallèle  
 $e$  = épaisseur de coupe  
 $\alpha$  = angle d'attaque  
 $\beta$  = angle de couteau  
 $\gamma$  = angle de dépouille



**Figure 1.2.** Géométrie de la coupe orthogonale et des composantes des forces de coupe (adaptée de Woodson et Koch 1970).

l'orientation de fil du bois par rapport à la coupe) et ceux reliés au bois affectent les forces impliquées lors de la coupe.

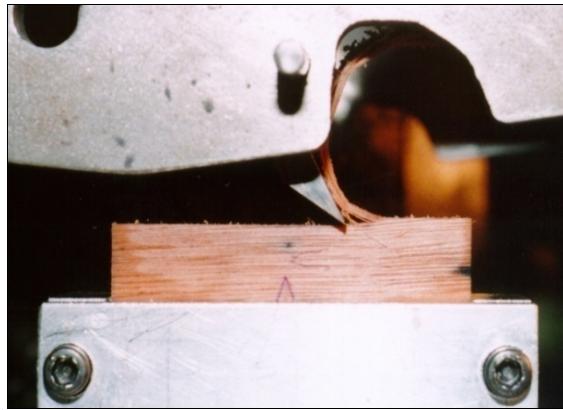
## 1.1.2. Formation du copeau

### 1.1.2.1. Coupe 90°-0°

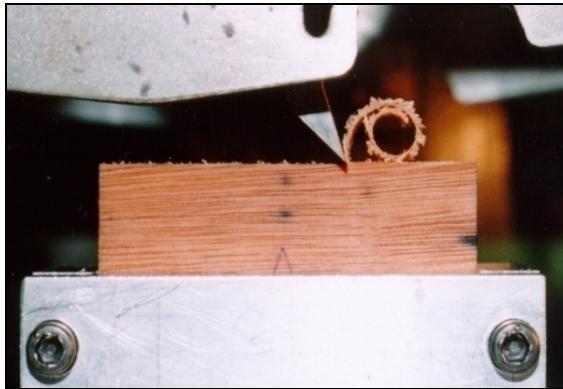
La coupe orthogonale en direction 90°-0° est présente dans tout travail du bois effectué suivant la direction parallèle au fil, par exemple, dans des procédés comme le tranchage longitudinal et le rabotage manuel. Franz (1958) a étudié l'usinage de ce genre de coupe et a identifié trois types de copeaux : I, II et III.

Le copeau de type I (figure 1.3) se forme lorsque les conditions de coupe sont telles que le bois fend devant le tranchant du couteau formant un copeau qui est ensuite séparé, tel une poutre encastrée en porte-à-faux, quand la contrainte de flexion excède la contrainte de rupture du bois. Le copeau produit par fendage suit le fil du bois de telle manière qu'il peut se former même en dessous du plan de coupe provoquant ainsi un défaut du type fil arraché. L'emploi d'un angle d'attaque élevé (supérieur à environ 25°), de même qu'une épaisseur de copeau trop grande favorisent la formation des copeaux de type I.

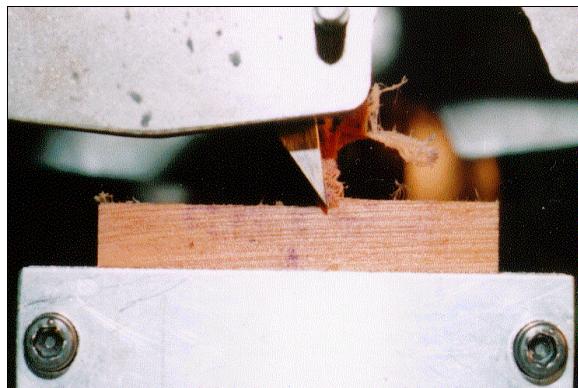
Le copeau de type II (figure 1.4) se forme dans des conditions plus limitées. Le mouvement de l'outil déforme le bois devant l'arête tranchante en compression longitudinale et provoque des contraintes de cisaillement diagonales. La rupture du bois se produit le long d'une ligne qui s'étend à partir de l'arête tranchante de l'outil, formant ainsi un copeau en continu. Les principaux facteurs qui permettent la formation de ce type de copeau sont l'emploi d'angles d'attaque entre 10° et 25° et de faibles épaisseurs de coupe. Le copeau de type II est obtenu, généralement, lorsque la force normale de coupe est proche de zéro ou légèrement négative (Franz 1958).



**Figure 1.3.** 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)



**Figure 1.4.** 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).



**Figure 1.5.** 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).

Stewart (1977) a proposé ainsi une méthode pour estimer un angle d'attaque susceptible de favoriser leur formation à partir des valeurs moyennes des forces normale et parallèle de coupe.

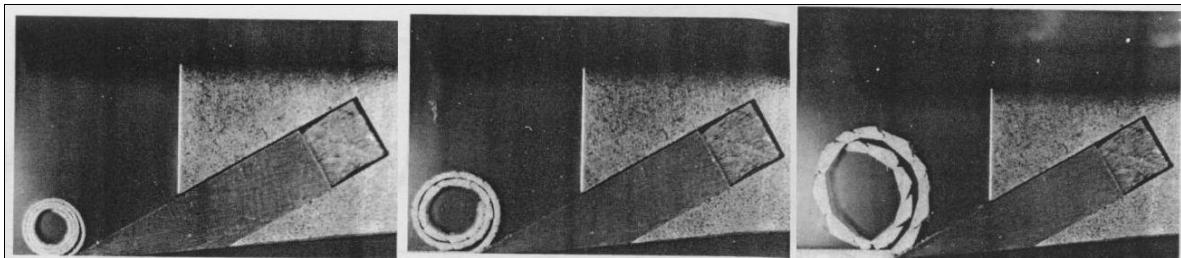
Finalement, le copeau de type III (figure 1.5) est formé lorsque les forces induites par l'outil produisent des ruptures par compression et cisaillement longitudinal devant l'arête tranchante. Le copeau obtenu est sans forme précise et a de la difficulté à s'échapper de la face d'attaque du couteau, se faisant compacter contre cette face. Les principales conditions qui favorisent la formation de ce type de copeau sont l'utilisation d'un angle d'attaque faible ainsi que l'emploi des couteaux émoussés. Ce type de copeau provoque le défaut appelé grain laineux ou pelucheux, ainsi que le fil soulevé.

### **1.1.2.2. Coupe 90°-90°**

Ce type de coupe orthogonale se présente quand l'arête tranchante de l'outil et la direction de coupe sont orientées perpendiculairement au fil du bois (figure 1.1). Les copeaux sont alors formés par le cisaillement transversal et la flexion des fibres produits par le passage de l'outil de coupe. Plusieurs outils travaillent en ce mode de coupe, soit les scies à ruban, les scies circulaires, les outils à coupe longitudinale, etc.

### **1.1.2.3. Coupe 0° -90°**

Ce type de coupe est présent lors du déroulage traditionnel de billes et également lors du tranchage (figure 1.1). Ce mode permet d'usiner le bois avec un minimum d'effort, les forces de coupe étant ainsi plus faibles qu'en coupe 90°-0°. Deux types de copeaux sont en général observés lors de la coupe 0°-90°. Le premier est le copeau de type A, qui est similaire à celui de type I de la coupe 90°-0°. Ce copeau se caractérise par la propagation de fissures à l'avant de l'outil de coupe et par une faible contrainte de compression parallèle à

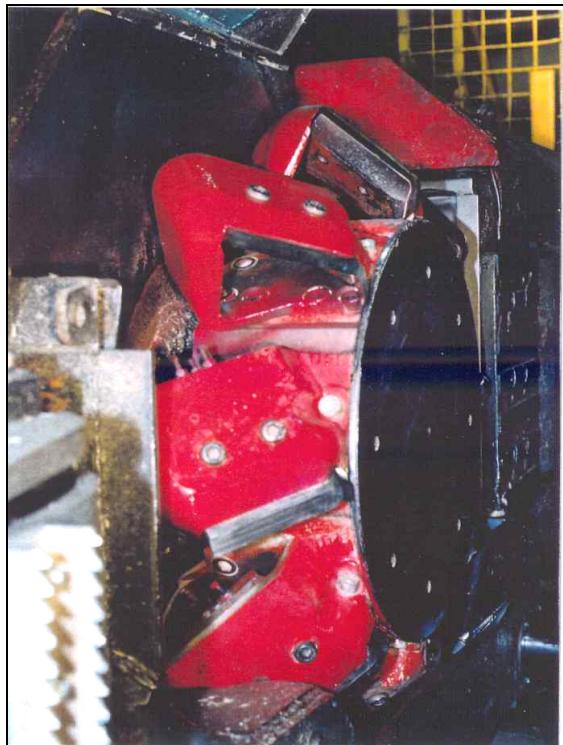


**Figure 1.6.** Transition de copeau de type B à copeau de type A. Le copeau de type B a été obtenu à un angle d'attaque de  $60^\circ$  et à 0,25 mm de profondeur de coupe. Le copeau de type A a été obtenu à un angle d'attaque de  $60^\circ$  et à 1 mm de profondeur de coupe (adaptée de Stewart 1979).

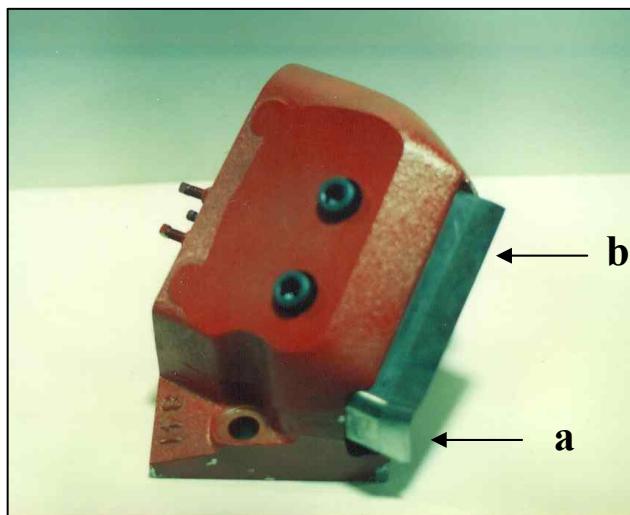
la direction de l'outil. Le type B, s'apparente au copeau de type III de la coupe  $90^\circ-0^\circ$ , où il y a une compression des fibres devant de l'outil. Stewart (1979) a observé qu'il existe une transition graduelle de copeau de type B vers le type A lorsque l'épaisseur de coupe augmente avec un angle d'attaque fixe (figure 1.6). Cet auteur a proposé l'utilisation d'un angle d'attaque élevé combiné à une faible épaisseur de coupe pour obtenir une surface de bonne qualité.

## 1.2. Usinage à l'aide d'une équarrisseuse-fragmentuse

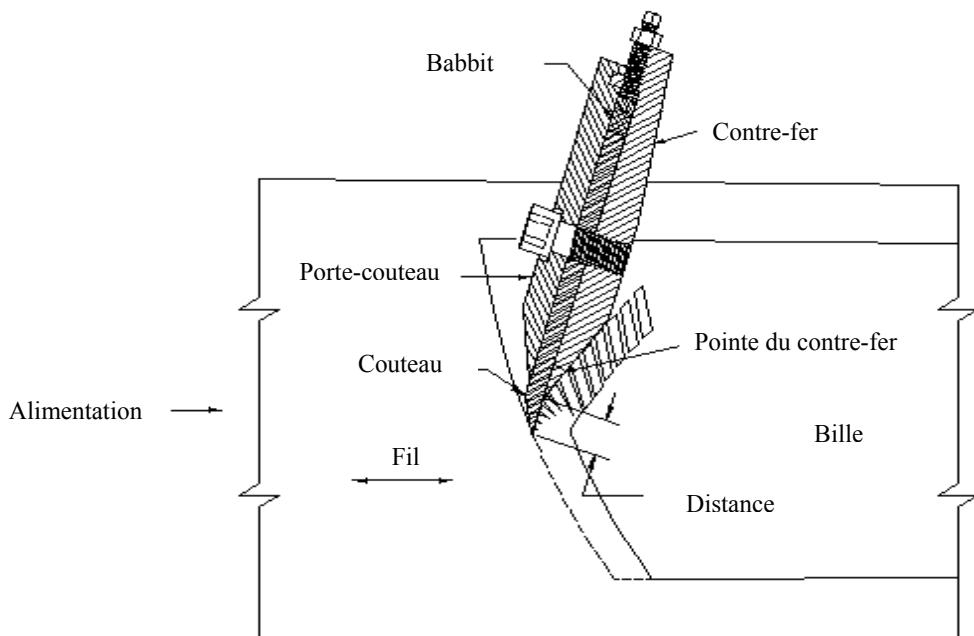
Généralement, l'équarrisseuse-fragmentuse présente deux têtes porte-outils placées face à face, lesquelles ont un mouvement de rotation suivant leurs axes. Les têtes sont en général munies de 6 à 8 porte-couteaux, chacun avec un contre-fer et un couteau (figure 1.7). La coupe est réalisée par l'action des couteaux, qui comportent deux parties distinctes: une plus courte qui sert à couper la surface des équarris et une autre plus longue qui fragmente les copeaux (figure 1.8). L'action de coupe de cette dernière est présentée à la figure 1.9. Une tranche de bois correspondant à l'avance de chaque couteau est obtenue initialement. Cette tranche est immédiatement projetée vers le contre-fer. Les contraintes exercées vont produire la fragmentation principalement par fendage longitudinal (Hernández et Quirion 1993, 1995).



**Figure 1.7.** Tête porte-outils d'une équarrisseuse-fragmenteuse, munie de 8 porte-couteaux (tiré de Hernández et Lessard 1997).

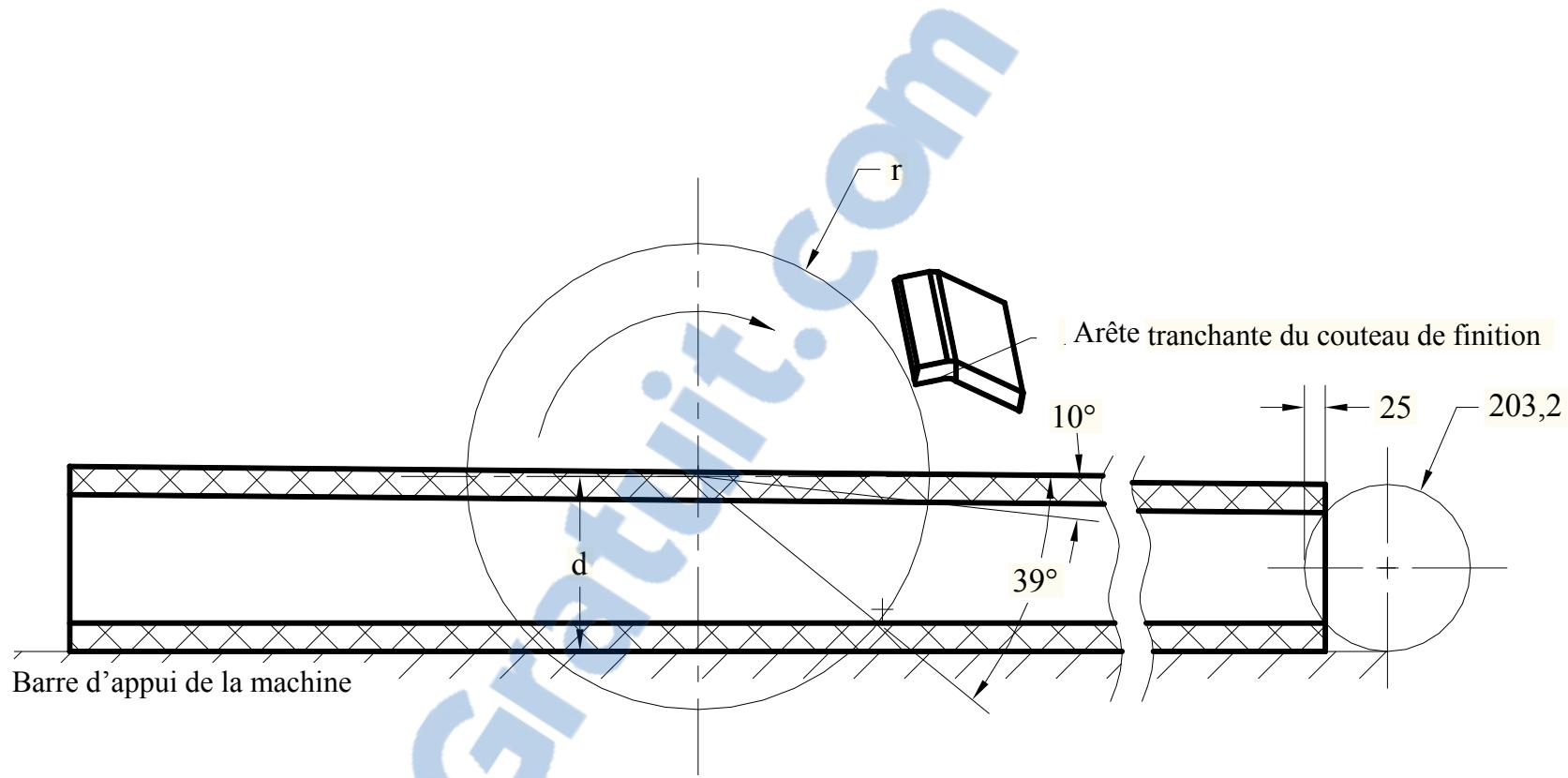


**Figure 1.8.** Porte-outil muni d'un couteau de type plié présentant deux parties: une plus courte qui sert à couper la surface des équarris (a) et l'autre plus longue qui sert à fragmenter les copeaux (b).



**Figure 1.9.** Schéma montrant l'action de coupe du couteau et du contre-fer des équarrisseuses-fragmenteuses Comact et Sawquip (tiré d'Hernández et Quirion 1993).

La transformation des billes à l'aide d'une équarrisseuse-fragmenteuse est souvent associée à une coupe orthogonale. Les forces impliquées lors de la coupe, de même que les paramètres particuliers à cette machine peuvent conditionner sa performance, car ils sont responsables du type de copeau formé et de la qualité de la surface. Hernández (2009b) mentionne que le diamètre de la tête porte-outil de l'équarrisseuse-fragmenteuse affecte le rayon de courbure du cylindre de coupe et la consommation d'énergie. Par ailleurs, la position d'entrée de la pièce à couper par rapport à l'axe de rotation de la tête porte-outil variera avec le diamètre de la bille car il y a souvent une distance fixe entre le centre de l'axe de rotation de la tête et la barre d'appui. Ainsi, cette coupe peut passer d'une direction perpendiculaire à la bille lorsque le haut de celle-ci est alimenté au niveau du centre de l'axe de rotation de la tête porte-outil, à une direction oblique à la bille lorsque les couteaux sortent ou terminent la coupe (figure 1.10). Les forces de coupe varieront donc tout au long du parcours des couteaux.



**Figure 1.10.** Exemple du changement de l'orientation de la partie plus courte du couteau plié le long de sa trajectoire de coupe (diamètre de coupe de 203,2 mm et largeur de coupe de 25 mm). Notez qu'au début, le couteau va couper presque perpendiculaire au fil (orientation  $10^\circ$ - $80^\circ$ ) et que l'orientation devient oblique à la fin de sa course dans la bille (orientation  $39^\circ$ - $51^\circ$ ).  $r$  = rayon de l'axe de rotation de la tête porte-couteaux (283,4 mm);  $d$  = distance entre la barre d'appui et l'axe de rotation de la tête (212,7 mm).

Hernández (2009b) signale d'autres paramètres qui peuvent affecter la performance des équarrisseuses fragmenteuses. Le premier est la stabilisation de la bille durant la coupe. En effet, plusieurs machines sont munies de tables d'alimentation à courroie qui ne permettent pas une bonne fixation de la bille, ce que se traduit par une diminution de la qualité de surface du bois ainsi que des copeaux obtenus. Le deuxième paramètre est le système d'évacuation des copeaux, qui doit se faire en évitant une désagrégation de ces copeaux en particules plus fines.

Les travaux sur les facteurs qui affectent et conditionnent la performance des équarrisseuses-fragmenteuses en ce qui concerne la qualité de surface produite sont limités. Néanmoins, quelques articles sur l'amélioration de la qualité des copeaux méritent d'être cités.

Keitaanniemi et Virkola (1975), à partir d'essais faits sur une équarrisseuse-fragmenteuse Karhula, ont démontré que la vitesse et l'épaisseur de coupe sont les paramètres qui ont le plus d'influence sur la qualité de surface de l'équarri produit. Ils ont aussi observé que les quantités des copeaux en forme d'aiguille et de fines augmentent lors du travail à hautes vitesses et à faibles épaisseurs de coupe.

L'effet de la vitesse des têtes des équarrisseuses-fragmenteuses sur la qualité des copeaux fut étudié par LeBoeuf (1987). L'augmentation de la vitesse de rotation des têtes a produit une diminution importante de la longueur et de l'épaisseur des copeaux ainsi qu'une production plus grande des copeaux en forme d'aiguille. Cependant, cette étude n'a pas conservé une longueur de copeaux constante lors du changement de la vitesse de rotation des têtes. Par conséquent, la diminution de l'épaisseur des copeaux pourrait être expliquée autant par la diminution de la longueur moyenne des copeaux que par l'augmentation de la vitesse de coupe.

Hernández et Quirion (1993) ont étudié l'effet de la géométrie des contre-fers, de la distance entre les pointes du contre-fer et du couteau ainsi que la température des billes sur la distribution des copeaux d'épinette noire produits par une équarrisseuse-fragmenteuse

Swecan. Cette étude a été faite sur des billes de 154 mm de diamètre au petit bout, des têtes de coupe de 8 couteaux et avec une vitesse d'alimentation et de rotation de 171 m/min et de 778 tr/min, respectivement. Cela produit ainsi une longueur des copeaux de 27,5 mm. L'augmentation des angles des contre-fers de 30° ou à 40°, ainsi qu'une augmentation de la distance entre les pointes du contre-fer et du couteau de 8 à 22 mm, ont produit un gain de copeaux acceptables suite à une diminution de l'épaisseur des copeaux. Les meilleurs résultats furent obtenus avec les contre-fers de 30° ayant une distance de 22,5 mm pour l'hiver (-10 à -5°C) et de 15,9 mm pour l'été (19 à 23°C). Ces nouvelles configurations des contre-fers ont produit plus de copeaux acceptables par rapport au contre-fer utilisé couramment par l'industrie. Il y a eu 6% de plus d'acceptables pour l'hiver et 5,2% de plus pour l'été. De plus, la proportion des copeaux acceptables fut plus grande en hiver malgré que celles de fines et des copeaux minces aient doublées.

Plus tard, Hernández et Quirion (1995) ont comparé le contre-fer à 30° avec celui standard (22°) sur des billes de sapin baumier et d'épinette blanche de deux classes de diamètres: 154 mm et 204 mm au petit bout. La largeur de coupe a été ajustée à 28 mm au petit bout mais a varié au gros bout car le défilement des billes était différent pour les deux classes de diamètre. Par contre, la longueur des copeaux fut gardée constante à 19,5 mm. Les meilleurs résultats furent obtenus avec les contre-fers à 30° ayant une distance entre les pointes du contre-fer et du couteau de 18 mm. Ces contre-fers ont produit 1,8% et 3,4% de plus de copeaux acceptables pour les billes de 154 mm et de 204 mm de diamètre, respectivement. L'épinette a eu un gain supérieur (3,1%) à celui obtenu pour le sapin baumier (2,1%). Enfin, à cause que le défilement des billes était différent pour les deux classes de diamètre, les auteurs n'ont pas pu dissocier l'effet séparé de la hauteur et de la largeur de coupe sur la distribution de copeaux.

Hernández et Lessard (1997) ont trouvé un effet très significatif de la largeur de coupe et un effet négligeable de la hauteur de coupe sur la distribution de la dimension des copeaux. Cette recherche a été faite avec des billes d'épinette noire de trois classes de diamètre (101,6 mm, 152,4 mm et 203,3 mm) et deux largeurs de coupe (25 mm et 12,5 mm) par classe,

mesurées au petit bout. Les vitesses d'alimentation et de rotation (sur une tête à huit couteaux) furent de 197 m/min et 783 tr/min, respectivement. La longueur des copeaux fut ainsi de 31,5 mm. Les résultats ont montré une réduction de la taille des copeaux avec la diminution de la largeur de coupe. Il y a eu, alors, une augmentation des copeaux acceptables. Cet effet fut aussi plus important l'hiver que l'été, c'est-à-dire, une réduction de la température de 25 à -10°C a produit une augmentation des copeaux acceptables. De plus, l'effet de la température fut plus prononcé à 12,5 mm qu'à 25 mm de largeur de coupe. Cela a été expliqué par le rôle joué par la glace située principalement dans l'aubier des billes.

L'effet de la vitesse de coupe sur la distribution de la dimension des copeaux a été étudié par Hernández et Boulanger (1997). Cela a été fait avec des billes d'épinette noire ayant un diamètre au petit bout de 152,4 mm et un défilement moyen de 8 mm/m. Les billes ont été mises en copeaux en utilisant quatre vitesses de rotation et une vitesse d'alimentation ajustée pour obtenir dans tous les cas une longueur de copeau fixe de 27,5 mm. L'expérience a été faite durant l'hiver (-15° à -5°C) et durant l'été (11° à 16°C). Les résultats ont montré que l'augmentation de la vitesse de rotation de 546 à 783 tr/min a produit une réduction de la taille des copeaux. La plus grande proportion des copeaux acceptables fut ainsi obtenue à 783 tr/min. Cette étude a également confirmé les résultats des travaux précédents concernant l'importance de la température sur la fragmentation des copeaux.

Finalement, Laganière (2004) a étudié l'effet de la vitesse de rotation, de la vitesse d'alimentation aussi que de la position verticale des billes sur la qualité de surface du bois et la distribution des copeaux. La position verticale fait référence à la distance entre la barre d'appui de la machine et le centre de l'axe de rotation de la tête porte-outils. L'étude comporta trois essais: le premier a mis en copeaux les billes en utilisant une vitesse de rotation fixe de 577 tr/min et trois vitesses d'alimentation (61, 76 et 91 m/mm). Dans, le second essai, 4 vitesses de rotation (625, 577, 526 et 476 tr/min) ont été combinées avec une vitesse d'alimentation fixe de 91 m/mm. Le troisième essai a consisté à placer les billes en deux différentes positions verticales: soit la position originale (203,2 mm au-dessous du centre de rotation de la tête porte-outils) et une deuxième position 114 mm plus haute que

celle-ci. Les résultats ont montré en effet une diminution des dimensions des copeaux produits par soit l'augmentation de la vitesse d'alimentation (premier essai), soit la réduction de la vitesse de rotation (deuxième essai). Cependant, ces essais, tout comme celui de LeBoeuf (1987), n'ont pas conservé une longueur de copeaux constante lors du changement des vitesses de rotation ou d'avance. Alors, la diminution de l'épaisseur des copeaux sera expliquée par le changement conjoint de deux variables de coupe. Enfin, l'utilisation de la position verticale la plus haute a montré une réduction de la qualité des copeaux ainsi que de la qualité de surface des équarris.

### 1.3. La qualité de surface du bois

L'évaluation de la qualité de surface du bois est un outil important de contrôle de qualité. À partir d'un examen critique de la surface, le producteur peut déterminer la qualité du produit final, l'usure générale des outils de coupe, aussi bien que les erreurs qui surgissent aux centres d'usinage eux-mêmes (Lemaster et Taylor 1999). La surface du bois peut être affectée par certains paramètres d'usinage. Parmi ces derniers, on retrouve le régime de coupe, la géométrie des outils de coupe, leur usure, la qualité de l'arête tranchante et l'état de la face d'attaque, la rigidité des éléments des machines d'usinage et l'orientation des fibres (Triboulot 1984). Par exemple, Iskra et Hernández (2009) ont mesuré la qualité de surface du bois à différents niveaux de pente du fil en coupe périphérique. Ils ont noté une détérioration de la qualité à mesure que l'angle du fil augmente de 0° (parallèle au fil) à 135° (contre le fil). Également, des problèmes de qualité de surface du bois peuvent être reliés aux propriétés physiques de l'essence du bois, telles que les propriétés mécaniques, la masse volumique, la teneur en humidité, la température du bois et le gel.

La qualité de surface du bois peut être évaluée à l'aide d'une analyse visuelle des défauts provoqués par l'usinage. Cependant, cela rapporte seulement des évaluations subjectives et qualitatives qui ne peuvent pas être employées pour assurer la qualité des produits ou des procédés ou pour contrôler la transformation automatique du bois (Fujiwara *et al.* 2005).

Stumbo (1963) recommande que la rugosité soit considérée lors de l'évaluation de la qualité de la surface du bois. La rugosité est souvent le paramètre principal d'évaluation de qualité de surface pour les procédés de ponçage et de rabotage du bois (Triboulot *et al.* 1995; Lemaster et Beall 1996; Taylor *et al.* 1999; de Moura et Hernández 2005, 2006a, 2006b, 2006c, 2007; Malkoçoğlu 2007; Hernández et Cool 2008a, 2008b). Yang *et al.* (2005) indiquent que les marques des couteaux sont un des facteurs les plus importants reliés à l'évaluation de la surface du bois. Le niveau de l'endommagement cellulaire produit par l'usinage du bois est également un facteur couramment relié à la qualité de sa surface.

### 1.3.1. Défauts reliés à la qualité de surface du bois

La qualité de surface produite par l'usinage du bois est particulièrement sensible aux changements pouvant survenir sur la machine elle-même ou bien elle peut tout simplement être affectée par la variation des caractéristiques du bois.

#### 1.3.1.1. Le fil arraché

Le fil arraché est associé à l'usinage contre le fil, lequel est produit lorsque le fendillement du copeau suit le fil en face du couteau et en laissant des particules de bois rompues et enlevées en dessous du plan de coupe (Panshin et de Zeeuw 1980). Les arrachements de fil sont surtout localisés autour des nœuds ou à un autre endroit présentant une déviation du fil, où sa profondeur sera plus prononcée (Franz 1958; Hernández *et al.* 2001; Bustos *et al.* 2009). En général, des angles d'attaque élevés, de grandes épaisseurs de coupe et l'usinage de bois trop secs ou trop humides augmentent l'incidence du fil arraché (Koch 1964; Stewart 1971; Stewart 1980; Stewart 1986; Hernández *et al.* 2001).

Dans le cas des équarisseuses, on remarque une présence plus importante de fil arraché à la fin de la coupe de chaque couteau sur la bille (figure 1.10). Ainsi, au début de la coupe, le

tranchant du couteau faisant la finition est presque horizontal, la formation du copeau est alors réalisée par fendillement transversal. Par contre, en fin de coupe, ce même tranchant est plus incliné par rapport au fil, le copeau tendra à se former par fendillement suivant le fil du bois. Le processus de coupe est ainsi sensible à l'orientation du fil par rapport à la coupe. En début de coupe, l'orientation, plus près de 0°-90° du couteau, nécessite des forces de coupe plus faibles qu'en fin de coupe où l'orientation se dirige vers le mode 90°-0° (figure 1.10).

### **1.3.1.2. Le fil laineux ou le fil pelucheux**

Le fil pelucheux est produit par des fibres ou des groupes des fibres qui sont partiellement coupées lors de l'usinage (Franz 1958; Stewart 1980). Ce type de défaut devient aussi plus visible suite à un gonflement due à l'action de l'humidité des cellules écrasées (Panshin et de Zeeuw 1980). Les principaux facteurs causant le fil pelucheux sont l'usure des outils de coupe ainsi que l'emploi d'un angle d'attaque faible (Stewart 1980; Hoadley 2000; Hernández *et al.* 2001). En coupe périphérique parallèle au fil, l'incidence du grain laineux diminue à mesure que celle du fil arraché augmente (Hernández *et al.* 2001).

### **1.3.1.3. Marques de couteau**

Les marques de couteau sont un défaut de surface le long du chemin de l'outil produit par l'engagement périodique du tranchant. En coupe périphérique, les marques de couteau sont souvent appelées des ondulations. Du point de vue de la métrologie, ce sont des variations de la surface suivant la hauteur et à une longueur d'onde moyenne (Sandak et Negri 2005). Certains auteurs ne le considèrent pas comme des défauts d'usinage, car elles résultent du mode d'usinage choisi (Khazaieian 2006). Dans le cas des équarrisseuses, les marques de couteau sont produites par coupe orthogonale et deviennent visibles à cause du

désalignement entre les couteaux. La différence de profondeur entre les marques de couteaux peut, dans certains cas, s'ajouter à la sévérité du fil arraché.

### **1.3.2. Topographie de la surface**

La topographie d'une surface représente une superposition d'irrégularités avec différentes longueurs d'onde. Elle indique le niveau de rugosité et d'ondulation, ainsi que l'erreur de forme et la distribution des aspérités de celle-ci. L'erreur de forme est la longue déviation de la longueur d'onde et l'ondulation est intermédiaire entre la rugosité et l'erreur de forme. La rugosité contient les variations topographiques à faible longueur d'onde tandis que l'ondulation comporte les irrégularités dont la longueur d'onde est plus importante. Jackson *et al.* (2002) décrivent la rugosité comme la topographie résultante de la structure du bois et des effets produits par l'arête tranchante des outils de coupe. L'ondulation d'autre part est produite par le procédé d'usinage lui même et inclut toutes les déviations par rapport au profil idéal d'ondulation.

#### **1.3.2.1. Caractérisation des profils**

On peut différencier 4 types de profils: le profil total (D), le profil primaire (P), le profil d'ondulation (W) et le profil de rugosité (R). Le premier est le profil de la surface tel qu'il est capté par l'instrument de mesure tout au long de sa trajectoire et sert de point de départ à tous les calculs. Le profil primaire se distingue du profil total par le fait qu'il est mis à niveau sur la longueur d'exploration, c'est-à-dire, la pente générale du profil a été supprimée. Par la suite, il suffit d'appliquer un filtre pour délimiter les profils d'ondulation et de rugosité. Cette délimitation va dépendre des conditions de mesure et de filtrage employés lors de l'évaluation topographique. La caractérisation des profils va permettre une évaluation numérique de la surface en utilisant des paramètres standards. Cela permettra des comparaisons fiables entre différentes surfaces (Gurău *et al.* 2006). La qualité de la surface

du bois dépend des procédés d'usinage et des propriétés intrinsèques du bois. Triboulot (1984), Ohtani *et al.* (2004) et Gurău *et al.* (2005a, 2005b, 2005c, 2006) suggèrent de séparer les profils d'ondulation et de rugosité afin de pouvoir mesurer quantitativement l'effet des paramètres de coupe sur le produit fini.

### 1.3.2.2. Les appareils de mesure

Ils existent, sur le marché, de nombreuses technologies pour mesurer la topographie des surfaces, mais seulement certaines de celles-ci sont applicables au bois. Ces technologies peuvent être classées en deux familles : par contact et sans contact. La surface du bois a été principalement évaluée par les technologies par contact, spécifiquement, avec les rugosimètres à palpeur (Mothe 1987; Zhao 1995). Ces appareils de mesure effectuent un « palpage » mécanique le long d'un profil en déplaçant un palpeur. Cependant, Triboulot (1984) fait appel à la prudence quand à leur utilisation. Si le diamètre de la pointe est trop élevé, le palpeur ne suivra pas tout le profil de la surface et les creux du profil ne pourront pas être détectés. Au contraire, si le diamètre de la pointe est trop petit, le palpeur pourra entrer dans les cavités cellulaires et donner un profil qui suivra la structure du bois. Aussi, la pression appliquée par la pointe sur la surface devient un paramètre important: elle va varier en fonction du diamètre de la pointe ainsi que de l'espèce de bois étudiée. Si la pression est trop grande, elle peut même provoquer des rayures et donc donner une mauvaise estimation de la rugosité. En effet, Mothe (1987) a constaté que les rugosimètres à palpeur avaient pour effet d'abréger en partie la surface à chaque passage, ce qui affecte la lecture. L'écrasement cellulaire associé à cette abrasion peut générer une erreur de 10% sur les mesures de rugosité pour les bois de conifères. Pour les bois de feuillus, l'erreur est moins importante, dû au fait qu'en général leur masse volumique est plus élevée. Également, Zhao (1995) et Sinn *et al.* (2009) mentionnent que le palpeur mécanique a une vitesse de mesure lente ce qui rend difficile son insertion dans une ligne de production. Toutefois, cet appareil devrait permettre de faire une distinction comparative entre différents procédés d'usinage (Kiliç *et al.* 2006).

Les résultats coïncident souvent avec ceux obtenus par une analyse visio-tactile (Mothe 1987; Fujiwara *et al.* 2005).

D'autre part, les technologies sans contact ont l'avantage de mesurer la surface sans risque de les rayer et de fausser ainsi les mesures. Elles atteignent les performances des capteurs à contact en termes de résolution et les surpassent parfois sur certains points tels la rapidité de mesure. Les appareils optiques les plus répandus dans l'industrie du bois sont ceux basés sur la triangulation laser (Funck *et al.* 1992). Ce type de capteur utilise un laser qui projette un point de lecture sur la surface à mesurer. La position du point sur la surface est repérée par un détecteur disposé sur le côté à un angle donné. L'altitude est déduite à partir de la connaissance de la parallaxe entre le laser et le point d'observation. Lundberg et Porankiewicz (1995) mentionnent que la triangulation laser permet une vitesse d'analyse élevée et la détection des défauts profonds, ce qui facilite leur utilisation dans une ligne de production. De même, Lemaster et Taylor (1999) signalent que la triangulation laser peut produire des résultats satisfaisants pour des surfaces du bois très rugueuses ou ondulées. Lemaster *et al.* (1985), Lemaster et Beall (1996) et Lemaster et Taylor (1999) recommandent cette méthode pour l'analyse de la surface du bois. Par contre, Sandak et Tanaka (2003) mentionnent que les mesures de rugosité à l'aide de la triangulation laser peuvent être affectées par la masse volumique et la couleur du bois. Gurău *et al.* (2005b) ont ainsi rapporté que les mesures effectuées avec les rugosimètres à palpeur sont plus précises et répétitives que celles réalisées avec la triangulation laser pour des surfaces poncées et rabotées. De plus, Sinn *et al.* (2009) signalent que les appareils optiques permettent seulement de balayer un profil de la surface à la fois, c'est-à-dire de faire une analyse en deux dimensions (2D), ce qui est inapproprié pour des matériaux anisotropes tel que le bois.

Honkanen (2005) a rapporté que la direction des mesures de la surface du bois affecte de manière très significative la mesure de la rugosité. Cela confirme les limitations de l'utilisation de l'analyse 2D pour les matériaux anisotropes et indique le besoin d'une analyse en trois dimensions (3D). Pour étudier cette anisotropie, les chercheurs font des analyses 2D suivant les directions transversale et longitudinale du bois (de Moura et

Hernández 2005, 2006a, b, c, 2007; Hernández et Cool 2008a, b). La nature même de certains procédés d'usinage (par exemple le ponçage) provoque également des surfaces anisotropes (de Moura et Hernández 2006c; Hernández et Cool 2008b).

Des méthodes qui permettent une analyse 3D ont été récemment examinées. Par exemple, Jackson *et al.* (2007) ont démontré que la méthode stéréo photométrique avec deux images est capable de mesurer de manière efficace l'ondulation des surfaces du bois poncé. De même, Sandak et Tanaka (2005) ont étudié la méthode du profilomètre des ombres, laquelle s'est montrée très rapide et précise pour l'évaluation de différents matériaux anisotropes comme le bois et le papier. De plus, elle pourrait être facilement insérée dans une ligne de production. Par ailleurs, d'autres technologies d'analyse 3D sans contact existent, tel que le microscope confocal Micromeasure. Cet appareil est basé sur le principe confocal chromatique. Ce type de capteur utilise une source de lumière blanche qui projette un faisceau lumineux sur la surface à travers un objectif chromatique, dispersant ainsi les longueurs d'onde de la lumière le long de l'axe optique. L'altitude du point de la surface est alors repérée par un spectromètre qui détermine quelle longueur d'onde est focalisée sur la surface. Cette technologie a été utilisée récemment pour le bois par Hernández et Cool (2008a, b).

### 1.3.2.3. Les filtres

Le filtrage est un procédé qui vise à séparer les composantes de fréquence telles que l'ondulation, la rugosité et les caractéristiques de forme d'un profil de surface. La définition du filtrage dépend de la composante désirée. Les différences entre les composantes de la texture de surface sont basées sur la longueur d'onde de la surface. La fonction attribuée à la surface et engendrée par le procédé d'usinage détermine les longueurs d'onde de l'ondulation et de la rugosité de surface. Ce qui sera considéré comme rugosité pour une pièce de bois pourrait être pris comme erreur d'ondulation ou de forme pour d'autres matériaux (Khazaeian 2006). Le choix de la méthode de filtrage devient ainsi un aspect

important lors l'évaluation de la qualité de surface. Le calcul des paramètres dépend significativement de la méthode de filtrage et de la longueur de base choisie pour le filtre. Tous les filtres distorsionnent d'une manière ou d'une autre la forme réelle du profil (Sandak et Tanaka 2003).

Plusieurs types de filtres existent mais, ceux-ci ont été développés pour l'analyse de métaux, c'est-à-dire pour des surfaces plus lisses et uniformes que celles du bois. Le filtre gaussien définit par la norme ISO 11562 (1996) est celui utilisé par défaut pour le filtrage des profils. Cependant, il a pour effet de créer des fausses amplitudes lorsque la rugosité due à l'anatomie du bois est plus grande que celle due à l'usinage (Krisch et Csiha 1999; Gurău *et al.* 2005a, c, 2006). Dans ce cas, la ligne moyenne est perturbée par les saillies et creux locaux modifiant ainsi légèrement la valeur des paramètres d'état de surface. Le filtre double-gaussien (ISO 13565 -1 1998) a alors été conçu pour corriger la tendance de ce dernier à être perturbé par les creux locaux. Il s'agit d'un algorithme en plusieurs étapes, basé sur deux filtrages successifs et d'une opération d'écrêtage des creux que permet d'améliorer le comportement du filtre près des creux. Néanmoins, seulement des nouveaux filtres dits robustes arrivent à corriger complètement ce problème. Selon Brinkmann *et al.* (2000), le fait de rendre le filtre gaussien plus robuste (ISO 16610-31 2002) permettrait d'analyser des surfaces complexes en engendrant moins de distorsions de la réalité. Gurău *et al.* (2005a, c) et Fujiwara *et al.* (2004) ont conclu que l'usage de ce filtre est le plus approprié pour les surfaces du bois. Également, la méthode d'élimination des creux le plus profond définie en ISO 13565-3 (2002) peut diminuer les distorsions créées par des creux locaux (Fujiwara *et al.* 2003). Hendarto *et al.* (2006) ont proposé l'utilisation combiné du filtre gaussien robuste avec la méthode d'élimination des creux les plus profonds afin d'obtenir des résultats plus fiables pour des surfaces de bois poncé.

La sélection adéquate de la longueur de base ou «cut-off» est aussi très importante, parce qu'elle permet de discriminer la rugosité de l'ondulation. Le choix de la longueur de base dépend théoriquement de la nature du profil et de sa structure (Zani 2003). Krisch et Csiha (1999) ont observé que la sélection de la longueur de base devient très critique quand le

filtre gaussien est utilisé pour le procédé de filtrage. Ils ont ainsi rapporté que la distorsion du profil de rugosité est supérieure quand le profil est obtenu avec une longueur de base courte. Gurău *et al.* (2006) ont précisé que, dans le cas de surfaces de bois, une longueur de base de 2,5 mm est plus convenable pour ne pas créer de fausses amplitudes.

### 1.3.2.4. Les paramètres de mesure

Il existe plusieurs paramètres pour qualifier l'état de surface d'une pièce et en particulier sa rugosité. Cependant, ceux définies dans la norme ISO 4287 sont probablement les plus utilisés lors les études de qualité de surface du bois (tableau 1.1). La rugosité moyenne,  $R_a$ , (moyenne arithmétique de toutes les ordonnées du profil par rapport à une ligne moyenne dans une longueur de base donnée) est le paramètre de mesure le plus employé. Pour augmenter la sensibilité aux valeurs extrêmes du profil, i.e. sommets et creux, la rugosité moyenne quadratique ( $R_q$ ) peut également être calculée. Ce paramètre est la racine carrée de la moyenne des carrés des déviations par rapport à la moyenne. Khazaian (2006) indique que  $R_a$  et  $R_q$  représentent une mesure globale de la topographie de surface et que leur variation est presque identique sauf que  $R_q$  est plus sensible aux défauts comme le fil pelucheux. Par ailleurs, les paramètres d'ondulation  $W_a$  et  $W_q$  semblent concorder avec la vibration de la pièce de bois ou de l'outil de coupe pendant l'usinage. Ils seraient moins reliés aux marques laissées par les couteaux en coupe périphérique. Pareillement, on peut calculer  $W_z$ , la hauteur moyenne du profil, qui représente la moyenne des amplitudes entre les hauteurs des saillies et les profondeurs des creux sur l'ensemble des longueurs de base considérées. Lemaster et Taylor (1999) ont constaté que  $R_q$  et  $W_z$  peuvent détecter l'occurrence du fil laineux et fil arraché simulés respectivement, dans une surface du bois. Malkoçoğlu (2007) a, par exemple, utilisé  $R_z$  pour évaluer la rugosité pour surfaces rabotées. On définit également les paramètres  $R_p$ , la plus grande hauteur de sommets,  $R_v$  la profondeur maximale des creux, et  $R_t$ , la hauteur totale ou l'amplitude maximale du profil (Mummery 1992; ISO 4287 1998).

**Tableau 1.1.** Paramètres généraux, norme ISO 4287 (1998).

Paramètre	Désignation	Définition
$R_p, W_p, P_p$	Hauteur maximale de saillie du profil	
$R_v, W_v, P_v$	Profondeur maximale de creux du profil	
$R_z, W_z, P_z$	Hauteur maximale du profil	Moyenne des hauteurs maximales $R_{ti}$ calculées sur chaque longueur de base
$R_t, W_t, P_t$	Hauteur totale du profil	
$R_c, W_c, P_c$	Hauteur moyenne des éléments du profil	
$R_a, W_a, P_a$	Ecart moyen arithmétique du profil	$Ra = \frac{1}{lb} \int_{lb} z(x) dx$
$R_q, W_q, P_q$	Ecart moyen quadratique du profil	$Rq = \sqrt{\frac{1}{lb} \int_{lb} z^2(x) dx}$
$R_{sk}, W_{sk}, P_{sk}$	Facteur d'asymétrie du profil	$Rsk = \frac{1}{lb} \frac{1}{Rq^3} \int_{lb} z^3(x) dx$
$R_{ku}, W_{ku}, P_{ku}$	Facteur d'aplatissement du profil	$Rku = \frac{1}{lb} \frac{1}{Rq^4} \int_{lb} z^4(x) dx$
$R_{Sm}, W_{Sm}, P_{Sm}$	Largeur moyenne des éléments du profil	
$R_{dq}, W_{dq}, P_{dq}$	Pente quadratique moyenne du profil	
$R_{mr(c)}, W_{mr}, P_{mr}$	Taux de longueur portante du profil	
$R_{dc} (M_{r1}, M_{r2}), W_{dc}, P_{dc}$	Différence de hauteur de coupe du profil	

$lb$  = longueur de base est égale au «cut-off». Les paramètres sont constitués d'un préfixe en majuscule et d'un suffixe désignant la nature du paramètre. Le préfixe  $P$  est pour les profils bruts,  $R$  pour les profils de rugosité et  $W$  pour les profils d'ondulation. La plupart des paramètres sont définis sur une longueur de base du profil, c'est-à-dire qu'ils sont estimés sur chaque longueur de base puis moyennés sur le nombre de longueurs de base choisi (par défaut, le nombre de longueurs de base est 5).

Pour l'étude de la forme et de la distribution des aspérités, des paramètres statistiques tels que les coefficients d'asymétrie ( $R_{sk}$ ) et d'aplatissement ( $R_{ku}$ ) peuvent être utilisés (tableau 1.2). Ces paramètres sont calculés à partir de la courbe de distribution d'amplitude, qui représente la distribution des valeurs des déviations le long de l'amplitude du profil (Mummery 1992; ISO 4287 1998). Les premier, deuxième, troisième et quatrième moments de cette courbe correspondent respectivement à sa moyenne, à sa variance, à son asymétrie et à son aplatissement. Une valeur négative de  $R_{sk}$  indique une plus grande concentration de matériau aux sommets du relief de rugosité, tandis qu'une valeur positive révèle la prédominance de matériau à la base du profil. Lemaster et Taylor (1999) ont démontré que des surfaces avec du fil arraché présentent des valeurs plus négatives d'asymétrie que des surfaces sans ce type de défaut. D'autre part, une valeur de  $R_{ku}$  inférieure à 3 signifie que les sommets et les creux sont petits et nombreux, tandis qu'une valeur supérieure à 3 indique la présence d'aspérités grandes, larges et moins nombreuses.

Également, les paramètres fonctionnels (appelés paramètres de taux de portance) tels que  $R_{pk}$ ,  $R_k$  et  $R_{vk}$  permettent de définir la forme du profil de rugosité en calculant la proportion de matière à différents niveaux. Cette proportion est rapportée sur une courbe appelée courbe d'Abbot-Firestone ou courbe de taux de longueur portante, qui définit la forme réelle du profil (ISO 13565-2 1998). Le paramètre  $R_{pk}$  (profondeur de rugosité des pics) caractérise la hauteur des pics dépassant la zone centrale du profil (définie par  $R_k$ ) ainsi que  $R_{vk}$ , profondeur de rugosité des vallées, caractérise la profondeur des creux situés en dessous de la zone centrale du profil. Fujiwara *et al.* (2005) ont noté qu'il existe une bonne relation entre la rugosité tactile et la profondeur de rugosité des pics  $R_{pk}$  et la profondeur de rugosité centrale  $R_k$  pour les surfaces du bois poncé.

De plus, des auteurs comme Lemaster et Taylor (1999) ont utilisé la fonction de densité du spectre de puissance du profil de la surface pour détecter certaines périodicités dans la surface telles que les marques d'outils. Cette approche est convenable parce que les profils se composent souvent de composantes aléatoires et périodiques. La magnitude des creux

**Tableau 1.2.** Tableau récapitulatif des profils caractéristiques des états de surface: correspondance entre les profils, les courbes de densité les valeurs d'obliquité et d'aplatissement et leur signification (adapté de Triboulot 1984).

Profil de la surface	Courbe de densité	$SR_{sk}$	$SR_{ku}$	Signification physique
		<0		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Le profil est plein.</li> <li>- Il y a une concentration de matière dans la partie supérieure du profil.</li> </ul>
		>0		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Le profil de la surface est creux.</li> <li>- La surface est en pointe.</li> </ul>
		=0	=3	<ul style="list-style-type: none"> <li>- La courbe de densité des hauteurs est symétrique, le profil aussi.</li> <li>- Distribution normale.</li> </ul>
			<3	<ul style="list-style-type: none"> <li>- La répartition est plus étendue ou aplatie.</li> </ul>
			>3	<ul style="list-style-type: none"> <li>- La répartition est serrée ou en pointe</li> </ul>

dans le spectre de puissance permet la mesure de la périodicité aussi bien que la longueur d'onde du dispositif périodique sur la surface du bois.

## 1.4 Objectifs et hypothèses du travail

Les hypothèses du présent travail sont:

- La hauteur et la largeur de coupe ont une influence significative sur la qualité de surface du bois produite par une équarrisseuse-fragmenteuse.
- La température des billes (gelées et non gelées) lors de l'usinage a une influence sur la qualité de surface du bois produite par cette machine.

Le but de ce travail est donc déterminer l'effet de la largeur et de la hauteur de coupe sur la qualité de surface du bois d'épinette noire (*Picea mariana* (Mill.) B.S.P) produite par une équarrisseuse-fragmenteuse. Cette expérience a été réalisée en deux étapes afin d'évaluer également l'effet de la saison (hiver et été) sur la qualité de surface.

## Chapitre 2

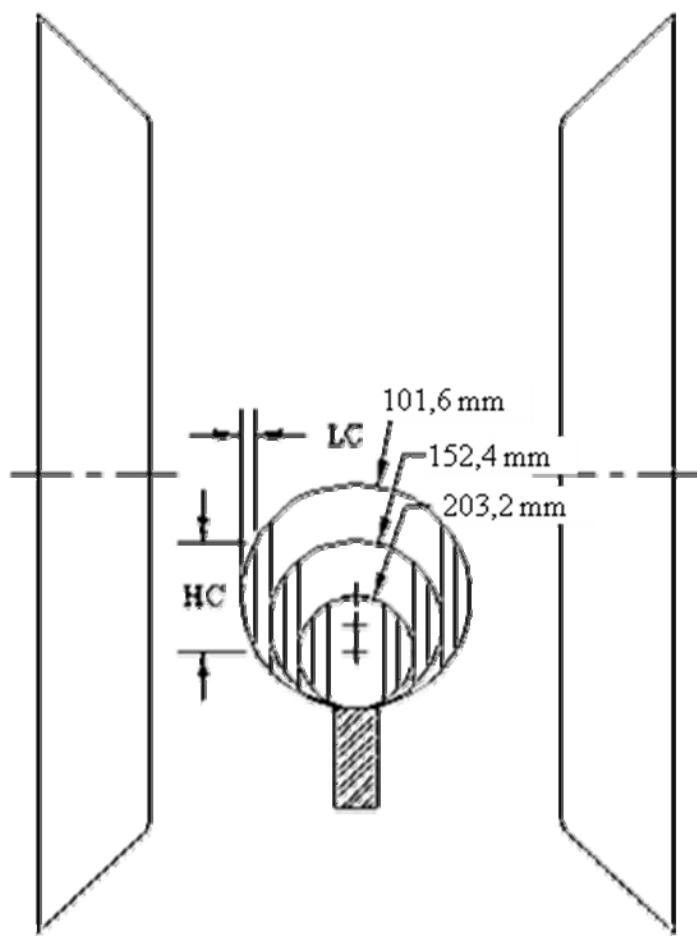
### Matériel et méthodes

#### 2.1. Matériel d'essai

Cent quarante quatre billes d'épinette noire (*Picea mariana* (Mill.) B.S.P) provenant d'une usine de sciage de Mistassini, Québec, furent soigneusement sélectionnées pour cette étude. Les billes ont été coupées à 2,44 m de longueur et furent écorcées à l'aide d'une plane. Ces dernières étaient à l'état vert, droites, sans pourriture visible et avaient un minimum de nœuds. La sélection des billes a été réalisée durant la semaine précédente à leur transformation dans l'usine.

#### 2.2. Expériences à l'usine

L'expérience a consisté à transformer des billes avec une équarrisseuse-fragmenteuse Swecan munie de deux têtes porte-outils placées face à face. Chaque tête présentait 8 porte-outils, chacun avec un contre-fer et un couteau. Les billes de 3 classes de diamètre (101,6, 152,4 et 203,2 mm au petit bout) furent usinées en considérant 2 largeurs de coupe (12,5 et 25 mm), soit un total de six conditions de coupe. Chaque bille était alors alimentée le petit bout en premier et usinée à plat sur deux côtés pour produire une section transversale de l'équarri dépendante de la largeur de coupe et des diamètres étudiés (figure 2.1). L'angle effectif de la section du couteau faisant la finition fut de 28° et celui d'attaque de 60°. L'angle du contre-fer fut de 30° alors que la distance entre sa pointe et celle du couteau fut de 22,5 mm (figure 1.9). Les billes furent usinées avec une vitesse de rotation de 783 tr/min et une vitesse d'avance ajustée à 197 m/min afin d'obtenir une longueur nominale de copeau de 31,5 mm.



**Figure 2.1.** Schéma montrant la position relative du petit bout pour chaque classe de diamètre dans l'équarrisseuse-fragmenteuse; LC = largeur de coupe; HC = hauteur de coupe.

Cette expérience a été réalisée en deux périodes de l'année, afin d'évaluer également l'effet de la température sur la qualité de surface. Le tableau 2.1 montre les différents diamètres et le défilement par saison et conditions de coupe. Les couteaux étaient fraîchement affûtés et les contre-fers étaient à l'état neuf pour limiter l'effet de l'usure du matériel de coupe sur la qualité de surface du bois. Avant la transformation, la température de la bille a été mesurée à une profondeur de 20 mm à l'aide d'un thermomètre digital. La température des billes a varié entre -14°C à -4°C l'hiver et entre 20°C à 26°C l'été.

### 2.3. Expériences au laboratoire

Après l'expérience à l'usine, les éprouvettes pour la mesure de la qualité de surface du bois et celles pour la mesure de la masse volumique basale et de la teneur en humidité durant l'usinage ont été préparées à partir des équarris produits (figure 2.2). Pour la mesure de la qualité de surface, quatre planches furent coupées à chaque extrémité (petit et gros bout) et de chaque côté (droit et gauche) de l'équarri. Les planches avaient 840 mm de longueur et 25 mm d'épaisseur. La largeur varia en fonction des largeurs de coupe et du diamètre des billes (figure 2.1). Pour chacune de ces planches, le numéro d'équarri, le haut d'équarri (point d'entrée des couteaux dans le bois) et s'il agissait du petit bout ou du gros bout ou du côté gauche ou droit furent notés. Également, une ligne qui divise la planche en deux parties (une partie haute et une autre basse) a été tracée. Cette ligne suivait l'axe longitudinal de la bille.

Trois éprouvettes provenant du petit bout, centre et du gros bout de l'équarri ont été prises pour la mesure de la masse volumique basale et de la teneur en humidité moyenne de la bille. Celles-ci avaient 150 mm de longueur, 30 mm de largeur et environ 60 mm d'épaisseur. Les éprouvettes provenant des extrémités ont été obtenues à partir d'au moins 150 mm des bouts des équarris.

**Tableau 2.1.** Description des billes utilisées lors de l'expérience.

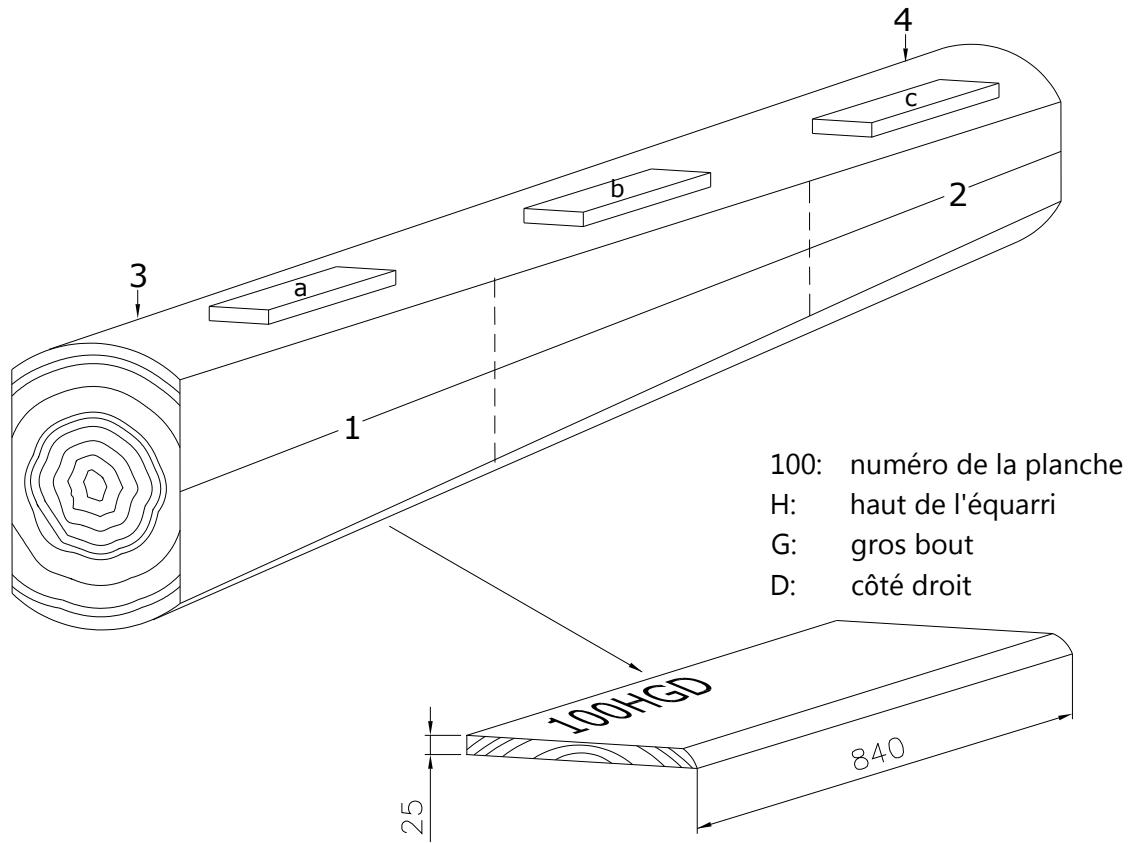
Largeur de coupe	Diamètre et défilement	Diamètre nominal					
		101,6 mm		152,4 mm		203,2 mm	
		Hiver	Été	Hiver	Été	Hiver	Été
12,5 mm	Petit bout (mm)	101,6	103,6	150,2	156,1	203,9	207
	Gros bout (mm)	124,5	120,7	169,5	175,1	228,8	237,1
	Défilement (mm/m)	9,4	7,0	7,9	7,8	10,2	12,4
25 mm	Petit bout (mm)	101,7	104,5	149,9	154,6	203,2	206,9
	Gros bout (mm)	124,1	123,2	174,1	173,8	227	226,2
	Défilement (mm/m)	9,2	7,7	9,9	7,9	9,8	7,9

### 2.3.1. Mesures de la masse volumique basale et de la teneur en humidité

L'épaisseur de l'aubier sur chacun des échantillons a d'abord été mesurée au millimètre près et par la suite, avec l'aide d'une scie à ruban, chacune des éprouvettes a été séparée en deux parties afin d'obtenir un échantillon de l'aubier et un autre du bois parfait. La masse au 0,01 g près de chacun des échantillons (trois d'aubier et trois du bois parfait par équarré) a été prise immédiatement après leur coupe. Le volume a été ensuite mesuré par immersion dans l'eau, au 0,01 g près. Les échantillons furent ensuite séchés à l'étuve à 103°C durant au moins 24 heures afin d'obtenir leur masse anhydre. Ces mesures ont servi à calculer la masse volumique basale et la teneur en humidité au moment de l'usinage.

### 2.3.2. Mesures de la topographie de la surface du bois

Les mesures de qualité de surface du bois furent prises avec un système MTI Microtrack 7000, munie de deux capteurs laser MT-250. Les données ont été acquises avec le logiciel LabVIEW avec une fréquence de 50 Hz et une vitesse de 15 mm/s. Les capteurs laser ont été

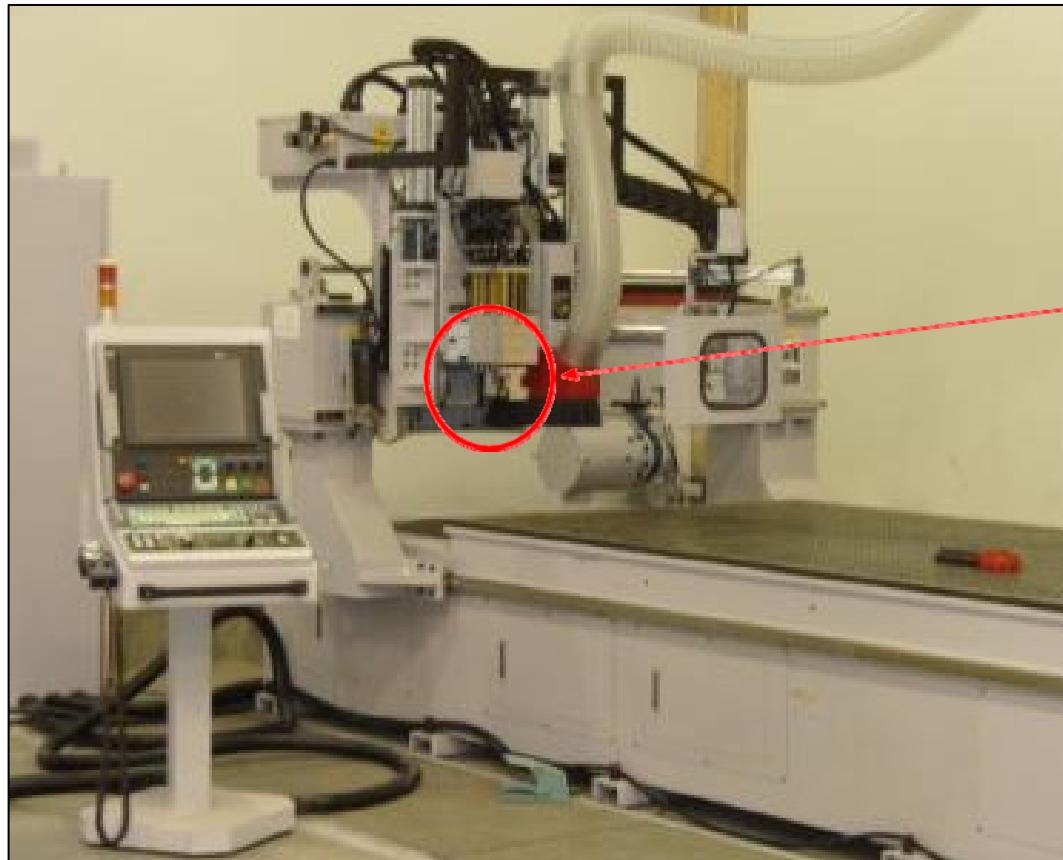


**Figure 2.2.** Schéma montrant la position des éprouvettes dans la bille usinée: a, b et c représentent les éprouvettes pour la mesure de la masse volumique basale et de la teneur en humidité; et 1, 2, 3 et 4 représentent les planches pour la mesure de qualité de surface du bois du côté droit et gauche de la bille.

montés sur une défonceuse à commandes numériques « Fulltech » pour utiliser le mouvement de l'arbre de cette machine (figure 2.3).

La prise de données a été faite de deux manières: parallèlement au fil du bois (lectures longitudinales) et perpendiculairement au fil du bois (lectures transversales). Pour le premier cas, quatre lectures consécutives ont été prises sur une distance équivalente à un tour complet de la tête porte-couteaux (huit traces de couteau). Ces lectures ont été faites à partir d'au moins 252 mm du bout de la bille (ce que représente le deuxième tour ou l'avant dernier tour de la tête porte-couteaux lors de la fragmentation de la bille). Quatre lectures ont été prises, deux dans la partie haute de la planche et les deux autres dans la partie basse de la planche. Ensuite, les lectures ont été coupées en profils de 252 mm de longueur (correspondant à un tour complet de la tête porte-couteaux) avec une routine informatique développée avec le logiciel LabView. Finalement, les paramètres de mesure de qualité de surface ont été obtenus avec le logiciel MountainsMap basé sur la norme ISO 4287 (1998) (tableau 2.2) avec une longueur de base ou « cut-off » de 2,5 mm et un filtre gaussien robuste ISO 16610-31 (2002).

Les lectures transversales ont été faites sur la largeur de la planche en suivant les traces des couteaux. Huit lectures consécutives espacées de 31,5 mm sur un tour complet de la tête porte-couteaux ont été prisées à partir de 252 mm du bout de la planche. Ces lectures ont été ensuite coupées en huit profils de différentes longueurs, étant donné que la largeur de la planche variait. Le programme utilisé pour cette opération a été développé avec le logiciel LabView. Enfin, les paramètres de mesure de qualité de surface (tableau 2.2) ont été obtenus avec un autre programme développé avec le logiciel LabView. La longueur de base ou «cut-off» utilisée a été de 2,5 mm avec un filtre gaussien robuste ISO 16610-31 (2002).



Capteurs laser MT-250

**Figure 2.3.** Défonceuse à commandes numériques «Fulltech» avec les capteurs laser montés sur son arbre.

**Tableau 2.2.** Paramètres définies par ISO 4287 (1998) utilisés lors de l'évaluation de la qualité de surface du bois.

Nom du paramètre	Profil	
	Ondulation	Rugosité
Écart moyen arithmétique du profil	$W_a$ *	$R_a$ *
Écart moyen quadratique du profil	$W_q$ *	$R_q$ *
Hauteur maximale de saillie du profil	$W_p$	$R_p$
Profondeur maximale de creux du profil	$W_v$	$R_v$
Hauteur maximale du profil	$W_z$	$R_z$
<u>Hauteur totale du profil sur la longueur d'évaluation</u>	<u><math>W_t</math>*</u>	<u><math>R_t</math>*</u>

\*paramètres utilisées lors de l'évaluation perpendiculaire au fil du bois.

### 2.3.3. Évaluation de la profondeur du fil arraché

La profondeur du bois arraché a été mesurée autour des nœuds comportant un diamètre supérieur à 10 mm. Ensuite, les dimensions (diamètres petit, grand, vertical et horizontal) des nœuds ont été mesurées. Cette opération a été réalisée dans le but d'évaluer l'effet de la déviation du fil associée aux nœuds sur l'incidence du fil arraché.

Également, la profondeur du plus grand fil arraché trouvé dans la planche a été mesurée. Afin d'établir l'existence d'une corrélation entre les paramètres de qualité de surface du bois et la profondeur du fil arraché, ce dernier a été mesuré dans le même secteur où les profils de surface avaient été pris. La position du fil arraché par rapport à l'axe longitudinal de la bille a été notée. Les mesures ont été faites avec un microscope confocal Micromeasure, dont les données ont été acquises avec le logiciel Surface Map 2.4.13 selon une fréquence de 300 Hz et une vitesse de 12,5 mm/s. Finalement, la profondeur a été obtenue avec le logiciel MountainsMap.

### 2.3.4. Analyse statistique

L'analyse statistique a été réalisée avec le logiciel SAS version 9.2 (2007). Elle a été effectuée comme suit:

Pour l'évaluation de la rugosité et de l'ondulation de la surface, l'analyse statistique a été divisé en deux; une analyse longitudinale (profils pris parallèlement au fil du bois) et une analyse transversale (profils pris perpendiculairement au fil du bois). Dans les deux cas, les données brutes de rugosité et d'ondulation ont été d'abord transformées avec la méthode Box et Cox, car ils ne respectaient pas les postulats des analyses de variance utilisées (l'homogénéité de la variance de l'erreur expérimentale et la distribution normale de l'erreur expérimentale). Deux types de transformations se sont avérées les plus performantes, soit la logarithmique ou la transformation exponentielle (exposants -0,5 ou -1,5). Ensuite, une analyse de composantes principales (ACP) a été exécutée dans le but de synthétiser l'information et ainsi faciliter l'interprétation des données. Les douze paramètres de qualité de surface ont été réduits à deux composantes principales pour l'analyse longitudinale et à une composante principale pour l'analyse transversale. Ces composantes sont une combinaison linéaire des variables originales et sont indépendantes entre elles (Tabachnick et Fidell 2007). Enfin, une analyse de la variance en parcelles divisées ou «split-plot» a été appliquée avec la saison, la hauteur et largeur de coupe comme sources de variation en parcelles principales et le bout en sous-parcelle. Pour le cas de l'analyse longitudinale, la position (haut et basse de la planche) a été ajoutée comme source de variation en sous-parcelle.

Pour l'analyse de la profondeur du fil arraché, les données brutes ont été également transformées avec la méthode Box et Cox. Ensuite, une analyse de la variance en parcelles divisées a été faite avec la saison, la hauteur et largeur de coupe comme sources de variation en parcelles principales et le bout et la position en sous-parcelles. Dans tous les cas, la normalité des données a été vérifiée avec les tests de Shapiro-Wilk, Kolmogorov-Smirnov et Cramer-Von mises.

Enfin, les analyses de corrélation entre les paramètres de qualité de surface du bois, la profondeur du fil arraché et les propriétés physiques du bois ont été faites avec la procédure Mixed du logiciel SAS 2007.

## Chapitre 3

### Article scientifique

#### **Effect of cutting width and cutting height on the wood surface quality of black spruce cants produced by a chipper-canter**

##### **3.1. Abstract**

The effects of the cutting height and cutting width on the surface quality of black spruce cants produced by a chipper-canter were evaluated. Three class diameters (101.6, 152.4 and 203.2 mm) measured at the small end of the log and processed using two cutting widths (12.5 and 25 mm) were studied. The rotation and feed speeds, kept constant at 783 rpm and 197 m/min, yielded a nominal feed per knife (chip length) of 31.5 mm. Twelve logs for each cutting condition were processed under frozen and unfrozen wood temperatures (winter and summer). The surface quality was analyzed according to roughness and waviness standard parameters. Torn grain was also evaluated. The results showed that the surface quality was affected by cutting height, cutting width and temperature of logs. In general, surface quality was better when processing unfrozen logs at lower cutting width and cutting height. Surface quality varied also within the cant, being better at the small end of the log and in the upper part of the cant. The results give useful information to improve the performance of the chipper-canter in terms of surface quality.

### 3.2. Introduction

Surface quality is an essential concern in many areas of the woodworking industry. Its assessment is an important performance control tool for wood products manufacturers. In fact, it is a criterion to determine the final product quality, general wear of cutting tools, as well as errors that are starting to arise in the machining centers themselves (Lemaster and Taylor 1999). Traditional methods to measure surface quality include visual and tactile approaches. Both methods are effective but are also highly subjective. Nowadays, there is a variety of different surface texture instruments available to measure wood surface geometry including stylus profilometers, optical profilometers, ultrasonic optical light sectioning and image analysis using video cameras (Hendarto *et al.* 2006).

The surface geometry of wood can be considered as a superposition of various sub-geometries related to various bases (Sandak and Negri 2005). A profile data from a nominally flat surface contains form errors, waviness and roughness. Form errors are the long-wavelength deviations of the surface from the corresponding nominal surface, which usually results from an inaccurate alignment of the work-piece or uneven wear in machining equipment (Hendarto *et al* 2006). Surface roughness is described as texture effects due to the wood structure and the effects produced by cutting the wood with a knife edge. Surface waviness is defined as the intermediate wavelength components produced by the machining process, including any deviations from the ideal waviness profile. The quality of a given surface is influenced by the type and condition of the wood work-piece, type and condition of the cutter equipment used, machine configuration, method of machine operation and the engineering quality of the machine (Jackson *et al.* 2002).

Once the surface profile is obtained by any profilometer, filtering is applied to remove form errors and separate the waviness and roughness profiles. The cut-off length of the filter is the value that separates the wavelength that is within the range of the interest for a particular feature from those that are not (ISO 11562 1996). The evaluation of the surface quality is a numerical characterization with parameters contained in general standards. These parameters

allow comparisons between different surface textures. One of the most commonly used parameter is the arithmetical mean deviation of the assessed profile,  $R_a$ , defined in ISO 4287 (1998). According to Khazaeian (2006), this parameter, along with  $R_q$ , the root-mean-square deviation of the assessed profile (ISO 4287 1998), could give a good evaluation of the topography of wood surfaces. Similarly,  $W_z$ , the maximum height of the profile (ISO 4287 1998) can be calculated. Lemaster and Taylor (1999) noted that  $R_q$  and  $W_z$  are able to detect fuzzy grain and torn grain in wood surface, respectively. However, several authors state that there is not yet a definitive set of parameters for a complete assessment of wood surfaces (Funk *et al.* 1993, Krisch and Csiha 1999, Fujiwara *et al.* 2003, Sandak and Tanaka 2003, Sandak and Negri 2005, Gurău *et al.* 2005).

A wood surface of good quality is desirable even in the primary breakdown. In fact, the improvement of the surface from the first phase of wood processing contributes to minimize production costs, material losses by the over-sizing of wood pieces, losses due to lumber grading and expenses during secondary breakdown operations. In Quebec province, the chipper-canters are the most common primary breakdown machines being installed in the sawmills at the present time. This machine has been designed primarily to convert small diameter logs into cants with very low sawdust production. However, the cants produced have often a poor surface quality. Hence, the surface of the cants produced by this machine is certainly desirable.

The purpose of this study was to examine the effect of cutting width and cutting height on the surface quality of the cants produced by a chipper-canter processing black spruce logs. Three log diameter classes were processed using two equal cutting widths. These transformations were made under frozen (winter) and unfrozen (summer) wood conditions.

### 3.3. Materials and methods

A total of 144 stems of black spruce [*Picea mariana* (Mill) B.S.P.] were selected for this study. The stems were crosscut into 2.44 m logs and were freshly debarked with a draw knife. The crosscutting position of the stem was chosen to yield logs with three specific small end diameters. The mean diameter and log taper values for each season and cutting condition are presented in Table 3.1. As much as possible, the logs were without crook or visible decay and had a minimum of knots, straight grain and concentric growth rings.

Log processing was done with a Swecan chipper-canter with two side opposed end-milling cutterheads, which have the shape of shallow truncated cones (Figure 3.1). Each cutterhead is fitted with eight uniformly distributed knife holders, each of them with a bent knife and a knife clamp. The bent knife has two cutting edges which are joined at an angle; the longer edge severs a slice to make chips and the shorter edge smoothes the cant. Basically, the shorter edge of the knife cut nearly across the grain at the point of entry on the log and more obliquely to the grain as the knife exits the log.

The experiment consisted of processing three diameter classes of logs, each one using two different cutting widths (12.5 and 25 mm measured at the small end diameter). The six profiles produced are shown in Figure 3.2. In addition, the seasonal effect on log processes was evaluated by conducting the experiment during winter and during summer. Twelve logs were used for each cutting condition, which made a total of seventy two logs for each season.

#### 3.3.1. Sawmill experiments

The log temperature was measured using a digital thermometer to the nearest 0.1°C at two uniformly spaced points at a depth of 20 mm. During processing, the log was always fed with the small end first. The feed system of the chipper-canter includes a rugged steel frame with an

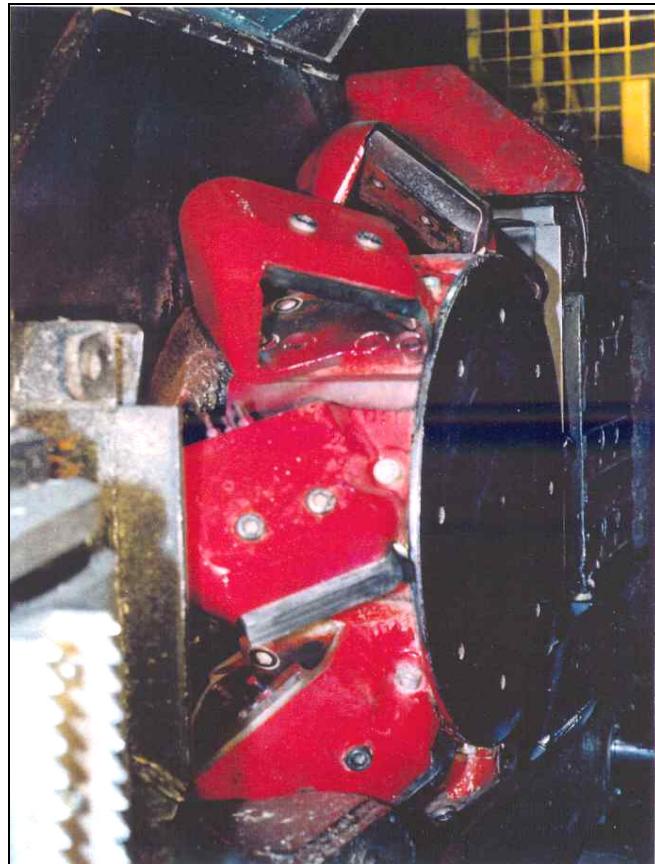
**Table 3.1.** Description of logs used in the experiments.

Cutting width	Diameter and taper	Nominal diameter					
		101.6 mm		152.4 mm		203.2 mm	
		Winter	Summer	Winter	Summer	Winter	Summer
12.5 mm	Small end (mm)	101.6	103.6	150.2	156.1	203.9	207
	Large end (mm)	124.5	120.7	169.5	175.1	228.8	237.1
	Taper (mm/m)	9.4	7	7.9	7.8	10.2	12.4
25 mm	Small end (mm)	101.7	104.5	149.9	154.6	203.2	206,9
	Large end (mm)	124.1	123.2	174.1	173.8	227	226.2
	Taper (mm/m)	9.2	7.7	9.9	7.9	9.8	7.9

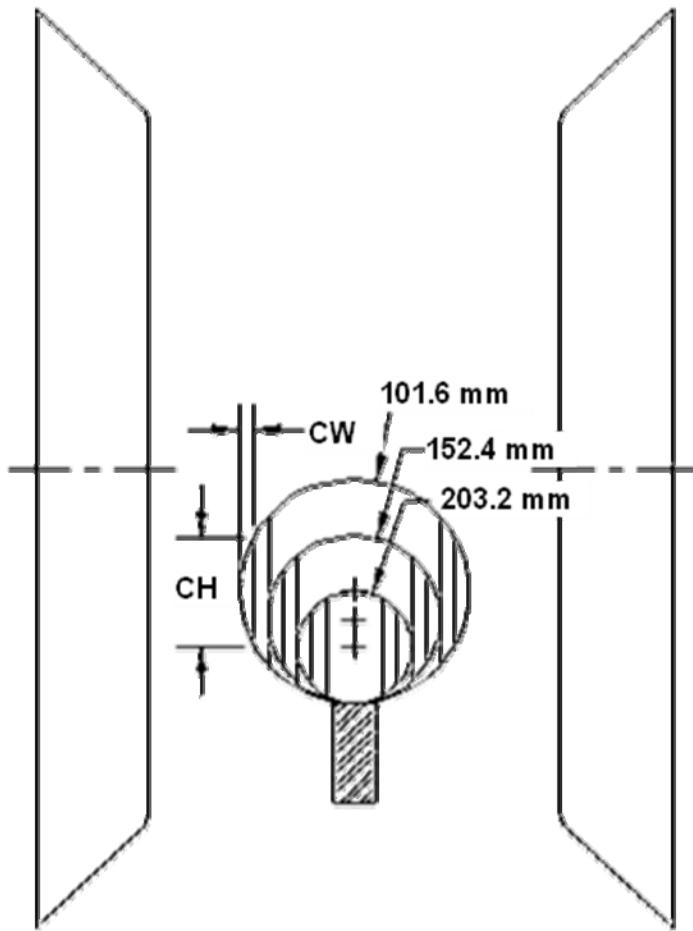
automatic self centering belt mechanism. The log was machined flat on only two sides in order to produce a cant whose cross section depended on the cutting width and diameter to be studied (Figure 3.2). The cant obtained was immediately weighed, painted on both ends and wrapped in polyethylene to maintain its initial moisture content (MC) until measurement. The knife angle of the shorter edge of the knife (finishing knife) was set constant at 28 degrees, with a rake angle of 60 degrees. Feed speed was 197 m/min and rotation speed was 783 rpm, which gave a calculated feed per knife (or chip length) of 31.5 mm. The knives were freshly sharpened before the experiment to minimize the effect of tool wear on the surface quality. The processing was done between -14°C and -4°C in the winter and between 20°C and 26°C in the summer.

### 3.3.2. Laboratory experiments

The cants were used to prepare boards for wood surface quality tests and specimens for physical property tests. Two boards 840 mm long were cut from each side of the cant (one from the small end and one from the large end of the log). The boards from the two ends allowed the evaluation of the effect of the log taper on the wood surface quality. In addition, a line dividing the board into two parts (upper and lower parts) was drawn following the grain. This line



**Figure 3.1.** View of the end-milling cutterhead (left side) of the swecan chipper-canter showing some knife holders.



**Figure 3.2.** Diagram showing the relative position of the small log end for each diameter class (in mm) on the chipper-canter; CW = cutting width; CH = cutting height. Note that since the lower bedplate is fixed, the relative position through which the knife edge enters the wood will change with log diameter and taper.

corresponded to the longitudinal axis of the log and helped to analyze the effect of the finishing knife edge orientation with respect to the wood grain on the surface quality.

The round-edge or wavy part of the cant was used to assess the mean specific gravity as well as the MC of both sapwood and heartwood at the time of transformation. A sample of sapwood and another of heartwood were obtained from three uniformly spaced points on each log to yield a total of 864 samples. All samples were 25 mm wide and 150 mm long. The thickness of samples from heartwood was maintained constant at 25 mm. The thickness of sapwood samples varied depending on the sapwood thickness of the individual logs. The specific gravity is reported as the oven-dry weight to green volume ratio.

### **3.3.3. Surface topography evaluation**

Roughness and waviness of the cants were measured using a MTI Microtrack system 7000 provided with two MT-250 sensor laser heads. The data was collected with a LabView software using an acquisition frequency of 50 Hz and a scanning speed of 15 mm/s. Roughness and waviness of the cant were assessed according to two directions: along and across the grain.

For the along the grain evaluation, two profiles in the upper part and two others in the lower part of the board were assessed following the grain direction. These profiles were 252 mm long and corresponded to the second complete revolution of the cutterhead (boards coming from the small end of the log) or the next to last revolution of the cutterhead (boards coming from the large end of the log). Twelve surface quality parameters ISO 4287 (1998) were determined using a task software developed with LabView software (Table 3.2). A cut-off length of 2.5 mm and the robust gaussian filter ISO 16610-31 (2002) were applied for calculations.

**Table 3.2.** Quality surface assessment parameters used in the surface quality evaluation

Parameter name	Profile	
	Roughness	Waviness
Arithmetic mean deviation of the assessed profile	$R_a$ *	$W_a$ *
Root-Mean-Square deviation of the assessed profile	$R_q$ *	$W_q$ *
Maximum profile peak height within a sampling length	$R_p$	$W_p$
Maximum profile valley depth within a sampling length	$R_v$	$W_v$
Maximum height of the profile within a sampling length	$R_z$	$W_z$
<u>Total height of the profile on the evaluation length</u>	$R_t$ *	$W_t$ *

\* Parameters used for the across the grain evaluation.

For the assessment across the grain, eight profiles (one per knife) corresponding to one rotation of the cutterhead and following the cutting direction were taken per board. This assessment covered the same surface (same rotation) used for the evaluation along the grain. Six surface quality parameters ( $R_a$ ,  $R_q$ ,  $R_t$ ,  $W_a$ ,  $W_q$  and  $W_t$ ) were determined with a task software developed using a LabView software. These parameters were chosen given that the profile evaluation length does not have any influence on their calculation (the profile length varied among the machining conditions). A cut off length of 2.5 mm combined with a robust gaussian filter ISO 16610-31 (2002) were also used for calculations.

The maximum depth of the torn grain present in each board was measured with a Micromeasure confocal microscope. This measurement was made within the same region (corresponding to the same cutterhead rotation) used for the waviness and roughness evaluation. The data was collected with a Surface Map 2.4.13 software using an acquisition frequency of 300 Hz and a scanning speed of 12.5 mm/s. In general, torn grain was produced near the knots in the boards. Thus, four diameters of the knots were measured (vertical, horizontal, the biggest and the smallest diameter). These measurements were used to evaluate the effect of the grain deviation associated with the knots on torn grain incidence.

### 3.3.4. Statistical analyses

A statistical analysis was performed by means of a SAS package version 9.2 (SAS Institute 2007). The raw data was first transformed using the Box and Cox method. In general, two types of transformation were employed depending on the parameter studied. Given the number of surface parameters studied, a principal component analysis (PCA) was then applied to data in order to regroup them in common factors and facilitate their analysis.

A split-plot analysis of variance was used to evaluate the variation in the surface quality of the processed cants (mixed procedure of SAS Institute). The season, cutting height, and cutting width were the sources of variation as principal plots and the log end was the source of variation as sub-plot. For the assessment along the grain and for torn grain, the position (upper and lower part of the cant) was added as a source of variation as sub-plot. The normality of the data was verified using Shapiro-Wilk, Kolmogorov-Smirnov and Cramer-von Mises tests (SAS Institute 2007).

Correlation analysis among surface topography, torn grain and wood physical properties were performed with a mixed procedure of SAS package. When required, means were compared with the least squares means statement from SAS GLM procedure at 95 percent confidence level (SAS Institute 2007).

## 3.4. Results and discussion

The mean specific gravity was 0.430 for sapwood and 0.438 for heartwood; the difference was not statistically significant at the 0.05 probability level. However, the difference between MC of sapwood (127 percent) and heartwood (40 percent) was statistically significant at the 0.05 probability level. The mean thickness of sapwood was 15 mm.

Data analysis shows that the surface quality was affected by all studied factors (season, cutting height, cutting width, and within cant variation). In general, surface quality was better when cutting unfrozen logs at lower cutting width and cutting height. Surface was also smoother at the small end of the log and at the upper part of the cant.

### **3.4.1. Principal component analysis (PCA)**

The purpose of a factor analysis is to determine the number of common factors and their factor loading (Tabachnick and Fidell 2007). The factor loading, which is obtained for each component within the factors generated by the PCA, is a type of correlation coefficient, where a higher value is associated with greater significance. A factor loading value of 0.60 was selected as the lowest level to consider a given factor as significant. The number of factors was defined according to the principal components initial factor method, with an eigenvalue higher than 1 (Table 3.3). In addition, a varimax rotation was needed for the along to the grain measurements.

The PCA of the profiles measured along the grain showed that 91.5% of the variance of the scaled data was explained by two factors (Table 3.3). The first one represents the surface roughness having high factor loadings for  $R_a$  (0.89),  $R_q$  (0.92),  $R_p$  (0.89),  $R_v$  (0.92),  $R_z$  (0.92) and  $R_t$  (0.81) and explained 80.1% of the total variance. The second factor accounted for 11.4% of the total variance and represents the surface waviness. It had high factor loadings for  $W_a$  (0.93),  $W_q$  (0.93),  $W_p$  (0.74),  $W_v$  (0.73),  $W_z$  (0.74) and  $W_t$  (0.86).

The PCA of the profiles measured across the grain revealed a different structure underlying the variables. The six surface parameters were grouped in one principal factor which explained 85% of the total variance. This factor represents the roughness and waviness of

**Table 3.3.** Factor analysis scores for all surface quality parameters following principal components initial factor method (factor loadings >0.6 are shown in bold).

Variable	Along the grain analysis		Across the grain analysis
	Factor 1	Factor 2	Factor 1
R <sub>a</sub>	<b>0.89</b> <sup>2a</sup>	0.33	<b>0.90</b> <sup>1</sup>
R <sub>q</sub>	<b>0.92</b> <sup>2a</sup>	0.37	<b>0.90</b> <sub>1</sub>
R <sub>p</sub>	<b>0.89</b> <sup>2a</sup>	0.39	-
R <sub>v</sub>	<b>0.92</b> <sup>2a</sup>	0.36	-
R <sub>z</sub>	<b>0.92</b> <sup>2a</sup>	0.37	-
R <sub>t</sub>	<b>0.80</b> <sup>2a</sup>	0.36	<b>-0.92</b> <sup>2a</sup>
W <sub>a</sub>	0.26	<b>0.93</b> <sup>2b</sup>	<b>0.93</b> <sup>1</sup>
W <sub>q</sub>	0.27	<b>0.93</b> <sup>2b</sup>	<b>0.94</b> <sup>1</sup>
W <sub>p</sub>	0.59	<b>0.74</b> <sup>2b</sup>	-
W <sub>v</sub>	0.59	<b>0.73</b> <sup>2b</sup>	-
W <sub>z</sub>	0.59	<b>0.74</b> <sup>2b</sup>	-
W <sub>t</sub>	0.41	<b>0.86</b> <sup>2b</sup>	<b>0.94</b> <sup>1</sup>
Eigenvalue	9.6	1.4	5.1
% of variance	80.1	11.4	85
Cumulative %	80.1	91.5	85

<sup>1</sup>logarithmic transformation; <sup>2</sup> exponential transformation: <sup>a</sup>-0.5, <sup>b</sup>-1.5.

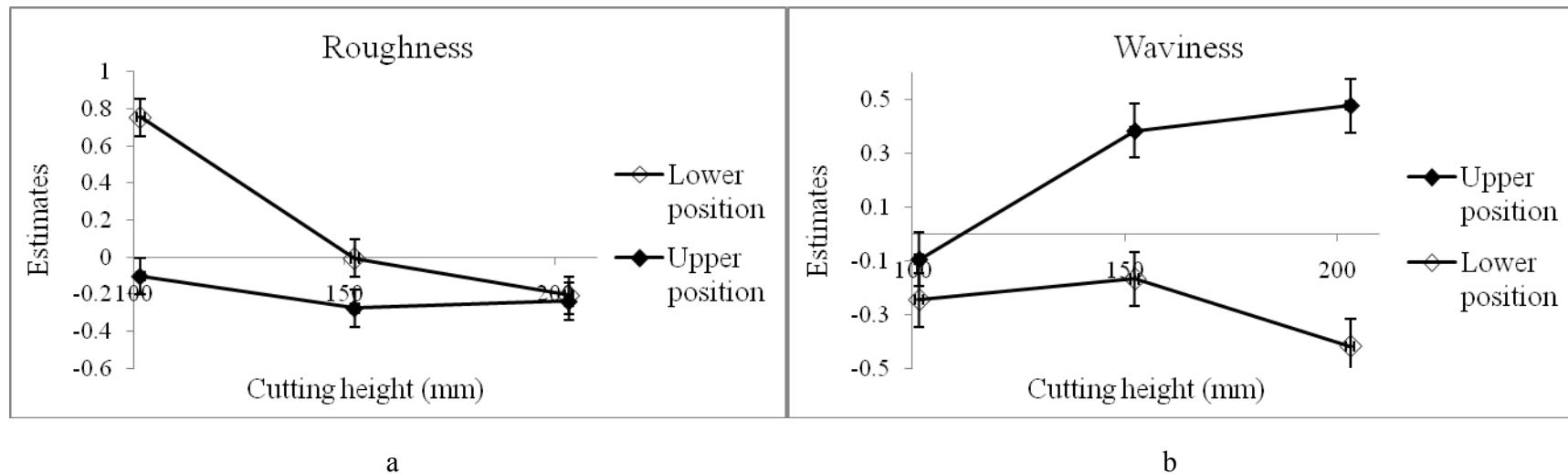
the wood surface adequately. Thus, the factor loadings were 0.90 for R<sub>a</sub> and R<sub>q</sub>, -0.92 for R<sub>t</sub>, 0.93 for W<sub>a</sub>, and 0.94 for W<sub>q</sub> and W<sub>t</sub>. The different results for the analyses along and across the grain were probably due to fact that for the second analysis, the number of surface quality parameters was reduced, as it was mentioned previously.

### 3.4.2. Along the grain assessment

The variance of the assessment along the grain was explained by two factors as mentioned in the PCA. The first factor represents the roughness and the second the waviness of the wood surface. Both factors were affected by a statistically significant interaction between cutting height and position (Table 3.4). However, the effects of the cutting height on the surface factors were opposite. As the cutting height increased, surface roughness increased (Figure 3.3a) but waviness decreased (Figure 3.3b). Furthermore, for roughness, this effect was more evident on the lower part of the cant, and on the contrary, for waviness, it was more evident at the upper part of the cant. The feeding system of the chipper-canter appeared to be more stable for the bigger logs. As the small end diameter of the log decreases from 203.2 to 101.6 mm, the knife cutting period decreases during one revolution. This could have generated higher vibration if smaller logs are not conveniently feed. The lower weight of the smaller logs could also have a negative incidence. Consequently, waviness could be greater for smaller logs. Roughness also presented greater values at the upper position of the cant, this difference being evident just for the smaller logs (101.6 mm). As expected, the bigger logs (152.4 and 203 mm of diameter) showed a greater surface waviness at the lower part of the cant. Previous work on orthogonal cutting shows that surfaces produced across the grain ( $0^\circ$ - $90^\circ$ ) are of good quality (Stewart 1969). In the case of the chipper-canter, the finishing knife cuts the log nearly across the grain at the point of entry and more obliquely to the grain as the knife exits from the log. As the angle between cutting edge and the grain becomes more oblique, the surface quality will decrease. For example, for a 203.2 mm log diameter and 25 mm cutting width, the angle of the finishing knife increased from about  $10^\circ$  (orientation  $10^\circ$ - $80^\circ$ ) at the entrance to  $39^\circ$  (orientation  $39^\circ$ - $51^\circ$ ) at the exit (Figure 3.4). This explains why the surface is smoother at the upper part of the cant compared to its lower part (observed for logs of 152.4 and 203.2 mm in diameter). From a practical point of view, this means that the diameter of the cutterhead (or diameter of the cutting circle) will affect directly the surface quality of the cant. This surface will be more uniform when processed with a large diameter cutterhead than with a small cutterhead. For a given log, orientation of the knives will vary less in larger cutterheads than in smaller cutterheads.

**Table 3.4.** Results of the variance analysis for the along and across the grain measurements and for torn grain depth measurements (simple effects and interaction statistically significant at the 0.01 probability level that were analyzed are showed in bold).

Source of variation	Along the grain		Across the grain	Torn grain depth
	Factor 1	Factor 2	Factor 1	
	Value-F	Value-F	Value-F	Value-F
Season	60.19*	<b>49.38*</b>	11.93*	1.46
Cutting height (CH)	16.58*	3.09	5.69*	1.94
season x CH	<b>6.49*</b>	3.26	0.16	1.25
Cutting width (CW)	4.24	1.79	<b>82.26*</b>	<b>13.24*</b>
season x CW	0.46	0.19	1.47	0.15
CH x CW	4.47	0.72	0.27	0.71
season x CH x CW	1.41	0.81	1.19	0.40
end	1.41	<b>35.36*</b>	75.08*	0.00
season x end	<b>12.76*</b>	1.50	30.4*	1.25
CH x end	1.37	0.61	3.08	0.53
season x CH x end	0.22	0.71	<b>4.80*</b>	0.03
CW x end	1.39	5.37	0.08	0.26
season x CW x end	0.08	0.35	6.22	0.85
CH x CW x end	1.75	0.98	0.14	0.44
season x CH x CW x end	1.95	0.17	0.79	0.56
position	31.45*	65.26*	-	4.66
season x position	0.05	4.47	-	2.29
CH x position	<b>12.85*</b>	<b>10.67*</b>	-	1.10
season x CH x position	2.23	2.76	-	1.09
CW x position	1.32	4.70	-	0.01
season x CW x position	0.00	1.33	-	1.23
CH x CW x position	1.52	1.43	-	0.50
season x CH x CW x position	1.44	0.05	-	0.49
end x position	2.15	0.00	-	0.11
season x end x position	0.89	0.11	-	0.35
CH x end x position	2.44	2.51	-	0.29
Season x CH x end x position	0.58	0.23	-	0.67
CW x end x position	0.16	0.67	-	0.06
Season x CW x end x position	1.35	0.27	-	0.43
CH x CW x end x position	0.30	0.48	-	1.30
Season x CH x CW x end x position	1.04	1.01	-	1.96

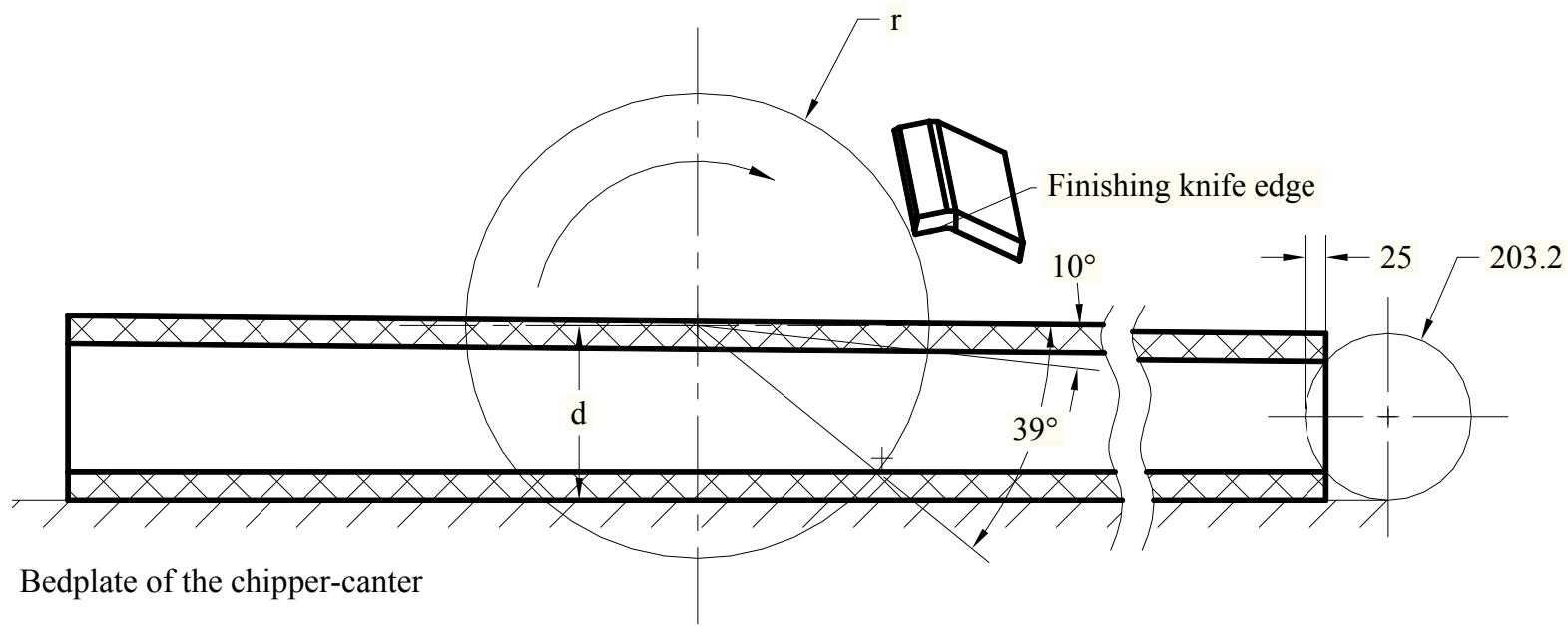


**Figure 3.3.** Effect of cutting height and position in the cant on roughness (a) and waviness (b) along the grain. Filled and open symbols correspond to the upper and lower position in the cant, respectively. The figure was made with the estimates of surface parameters, which have been transformed ( $R_a^{-1.5}$  and  $W_a^{-0.5}$ ). Consequently, an inverse interpretation is required.

Furthermore, logs should be fed in the machine in such a way that knives can cut more across the grain than obliquely to the grain (see Figure 3.4, upper cutting situation). Hence, the opposite effect observed for the 101.6 mm logs could be explained by the fact that the feeding system was less efficient for the smaller logs.

In addition, the effect of the interaction between season and cutting height on roughness was statistically significant (Table 3.4). As the cutting height increased the surface roughness increased. This effect was more evident under summer conditions. Furthermore, greater roughness values were found when processing frozen logs (Table 3.5). For 203.2 mm diameter logs, this difference was however not apparent. It is expected that the cutting forces will increase as more material is transformed. That happens when cutting height increases. As a result, vibration during cutting increases leading to higher roughness. The differences in surface quality between seasons can be explained by the fact that the wood mechanical properties are affected by the temperature and moisture content (Gerhards 1982). Since temperature in winter decreased below 0°C, the wood strength increased, presenting more brittle fracture behavior which results in a decrease of the surface quality. A similar effect of log temperature on size distribution of chips produced by the chipper-canter has been previously reported (Hernández and Quirion 1993).

Finally, the effects of season and log end were significant on waviness while the interaction between season and log end showed significant effect on roughness (Table 3.4). In general, roughness and waviness presented greater values in winter than in summer. This behavior is shown in Table 3.5 for  $R_a$  and  $W_a$ , two of the twelve parameters included in the PCA. Moreover, waviness increased as the cutting advanced towards the large end of the log (the logs were always fed with the small end first). This probably happens given that the cutting height and cutting width are bigger at the large end than at the small end due to the log taper. Waviness will increase as a result of the increase of the cutting forces. However, the logs processed in winter were slightly rougher at their small end. This could be explained by the role played by the ice located in higher proportion in the sapwood than in the heartwood of



**Figure 3.4.** Diagram showing the variation in the orientation of the finishing knife edge during their path on the log (203.2 mm of log diameter and 25 mm of cutting width). The angle of the finishing knife edge increases from about  $10^\circ$  (orientation  $10^\circ$ - $80^\circ$ ) at the point of entrance to  $39^\circ$  (orientation  $39^\circ$ - $51^\circ$ ) at the point of exit of the log.  $r$ = radius of the cutting circle of the cutterhead (283.4 mm);  $d$ = distance from the bedplate of the machine to center of the cutting circle of the cutterhead

black spruce during winter. The proportion of sapwood in the cutting zones was higher in the small end of the log than in its large end. The effect of the temperature could be slightly greater for the smaller cutting width (12.5 mm) since the mean thickness of the sapwood was 15 mm.

### 3.4.3. Across the grain assessment

As mentioned in the PCA, the variance for the across the grain analysis was explained by one principal factor. This factor represents adequately the roughness and waviness observed over the cant surfaces. A statistically significant triple interaction among season, cutting height and log end existed. As roughness along the grain, roughness and waviness across the grain increased as the cutting height increased. This behavior is shown in Table 3.6 for  $R_a$  and  $W_a$ , two of the six parameters included in the PCA. Further, as the cutting advanced towards the large end of the log, the surface roughness and waviness increased (Table 3.6). This effect was more evident in summer than in winter. Roughness and waviness presented greater values when cutting in winter, being this effect more clear at the small end of the log. Finally, roughness and waviness showed a significant effect of the cutting width. As the cutting width increased from 12.5 mm to 25 mm, roughness and waviness of the wood surface increased. It is expected that the cutting forces will increase as more material is processed. This happens when cutting height and/or cutting width increased and the temperature of the logs decreased. Vibration during cutting will increase resulting in higher roughness and waviness.

Tables 3.5 and 3.6 show mean values of  $R_a$  and  $W_a$  for along and across the grain directions, respectively. The  $R_a$  along the grain was 16.3  $\mu$  in summer and 20.2  $\mu$  in winter.  $R_a$  across the grain showed higher values: 35.3  $\mu$  in summer and 41.1  $\mu$  in winter. In contrast, waviness showed greater values along the grain than across the grain (150.1  $\mu$  compared to 112.6  $\mu$  in summer and 196.9  $\mu$  compared to 113.9  $\mu$  in winter). In other words, roughness was 2 times greater across the grain than along the grain, while waviness was either 1.3 times greater (in summer) or 1.7 times greater (in winter) along the grain than across the grain. This opposite

behavior could be explained by the fact that waviness along the grain was affected by the variation in the projection of the eight knives mounted on the cutterhead. Moreover, the profiles along the grain could be more affected by the area of the torn grain, which was longer along the grain than across the grain. Thus, it is deduced that quality control of the knife projections on the cutterhead plays an important role on the quality of surface produced by the chipper-canter.

### **3.4.4. Torn grain evaluation**

A higher incidence of torn grain was observed at the lower part of the cant. Eighty percent of the boards presented the deepest torn grain at the lower part while twenty percent at the upper part of the cant. As it was mentioned previously, the finishing knife edge orientation with respect to the grain became more obliquely as the knife exits from the log. This condition could increase the incidence of torn grain at the lower part of the cant. Again, processing logs with larger cutterheads and being fed immediately below the center of the cutting circle is recommended.

The mean of the maximum depth of torn grain for all the cutting conditions are presented in Table 3.7. The maximum depth of torn grain ranged from 0.8 mm to 2.6 mm depending on the cutting conditions. Given the magnitude of the torn grain, this parameter needs to be controlled efficiently in order to improve surface quality. The maximum depth of the torn grain showed a statistically simple effect of the cutting width (Table 3.4). The other sources of variation were not significant. The maximum depth of torn grain increased as the cutting width increased from 12.5 to 25 mm at the small end of the log. The depth of torn grain was 1.4 times greater at 25 mm than at 12.5 mm cutting width. An increase of the cutting width will increase the cutting forces during the cut. As a result, the depth of the torn grain was greater at the higher cutting width evaluated.

**Table 3.5.** Averages of  $R_a$  (arithmetic mean deviation of the roughness profile) and  $W_a$  (arithmetic mean deviation of the waviness profile) for the analysis along the grain.

Parameter	Season	Cutting width (CW) Diameter (mm)	12.5 mm				25 mm				Overall average	
			Small end		Large end		Small end		Large end			
			Upper	Lower	Upper	Lower	Upper	Lower	Upper	Lower		
$R_a$ ( $\mu$ )	Summer	101.6	19	15	14	14	14	14	16	15	15.1	
		152.4	15	15	16	17	21	16	18	17	16.8	
		203.2	16	16	16	17	18	19	15	19	17	
	Winter	101.6	20	22	19	17	22	17	21	17	19.5	
		152.4	17	19	17	19	22	22	24	20	20.2	
		203.2	26	18	20	19	22	22	18	21	20.9	
$W_a$ ( $\mu$ )	Summer	Upper Position		Lower Position								
		CW		CW								
		Average		12.5 mm		17.7		25 mm		18.8		
		101.6	172	150	168	172	143	146	171	156	159.8	
		152.4	119	139	140	159	146	171	142	161	147.1	
	Winter	203.2	133	141	127	180	116	169	109	173	143.4	
		101.6	195	219	225	191	190	199	205	172	199.4	
		152.4	159	181	192	204	174	208	179	205	188	
		203.2	202	180	179	219	175	245	188	239	203.3	
		Upper Position		164.6		Lower Position		182.4				
		CW		CW								
		Average		12.5 mm		172.7		25 mm		174.3		

**Table 3.6.** Averages of  $R_a$  (arithmetic mean deviation of the roughness profile) and  $W_a$  (arithmetic mean deviation of the waviness profile) for the analysis across the grain.

Parameter	Season	Cutting width Diameter (mm)	12.5 mm		25 mm		Average	Overall average
			Small end	Large end	Small end	Large end		
$R_a$ ( $\mu$ )	Summer	101.6	29	31	36	38	33.4	
		152.4	26	37	34	42	34.9	35.3
		203.2	32	39	37	43	37.6	
	Winter	101.6	37	40	39	45	40.3	
		152.4	32	36	42	48	39.8	41.1
		203.2	37	37	48	51	43.2	
Average			34.5		41.9			
$W_a$ ( $\mu$ )	Summer	101.6	64	95	126	154	109.9	
		152.4	60	108	103	167	109.2	112.6
		203.2	75	121	122	156	118.7	
	Winter	101.6	86	97	127	138	111.8	
		152.4	87	85	115	132	104.9	113.9
		203.2	130	104	132	135	125.1	
Average			92.7		133.8			

**Table 3.7.** Averages of torn grain depth.

Torn grain depth (mm)	Cutting width (CW)	12.5 mm				25 mm				Overall average	
		Season	Diameter (mm)	Small end		Large end		Small end			
				Upper	Lower	Upper	Lower	Upper	Lower		
Summer	101.6	1.1	1.2	1.1	1.4	1.3	1.5	1.7	1.5	1.4	
	152.4	1.0	1.0	1.3	1.3	2.3	1.5	2.4	1.5	1.5	
	203.2	1.6	0.9	2.4	1.2	2.3	1.3	1.5	1.6	1.6	
	101.6	1.6	1.6	1.2	1.6	1.8	1.9	1.4	1.7	1.6	
	Winter	152.4	0.8	1.6	1.3	1.7	2.6	1.8	1.9	1.7	
	203.2	1.9	1.4	1.3	2.1	2.5	2.3	2.4	2.0	2.0	
Average		Upper Position		1.7		Lower Position		1.6			
		CW 12.5 mm		1.4		CW 25 mm		1.9			

### 3.4.5. Correlation Analysis

A correlation analysis was made between the maximum depth of torn grain and waviness and roughness parameters along and across the grain. The factors of the PCA of both assessments were used in the calculation given that the individual parameters have a strong correlation between them, as shown in Table 3.3. The PCA revealed two principal factors for the along the grain assessment. These factors showed a statistically significant positive correlation with the maximum depth of torn grain. The corresponding regression model explained 41.1 percent of the variation in torn grain ( $\text{Depth of torn grain} = 0.27 + 0.19 \text{ factor 1} + 0.22 \text{ factor 2}$ ). Similarly, a correlation analysis was performed between the maximum depth of torn grain and the principal factor of the across the grain assessment. A significant correlation was also found; as the principal factor (roughness and waviness across the grain) increases, the torn grain will be deeper. The corresponding regression model explained 55.3 percent of the variation in torn grain ( $\text{Depth of torn grain} = 0.31 + 0.25 \text{ factor}$ ). Therefore, roughness and waviness across the grain explained better the variation in the maximum depth of torn grain.

A second correlation analysis was performed between the torn grain occurring near to the knots and five variables: the knot diameters (vertical, horizontal, the biggest and the smallest) and the distance of torn grain from the log axis. This distance was positive if the torn grain was located at the upper part of the cant and negative if this defect was at the lower part of the cant. The analysis revealed a significant correlation between the maximum depth of torn grain and two variables: the horizontal diameter of the knot and the distance of torn grain from the log axis ( $\text{Depth of torn grain} = 0.7 - 0.0068 \text{ distance of torn grain from log axis} + 0.038 \text{ knot horizontal diameter}$ ). Torn grain increased as the horizontal diameter of the knot increased and as the knife was advancing in its path. This confirms the fact that there was more incidence of torn grain at the lower part of the cant. However, this model explained just 20.4 percent of the variation in torn grain. The rest of variables did not present any significant correlation with the maximum depth of torn grain.

Finally, a correlation analysis was performed between the maximum depth of torn grain and two physical properties of wood: specific gravity and moisture content. Only the first one presented a statistically significant correlation with the maximum depth of torn grain. As the specific gravity decreased, the maximum depth of torn grain increased. However, variation in specific gravity only explained 12.3 percent of the variation in torn grain. In conclusion, highest positive correlations were found between roughness and waviness across the grain, and torn grain. Any optimization of the cutting conditions for improving roughness and waviness will be also reducing the torn grain occurrence.

### **3.5. Conclusions and recommendations**

This study has shown that cutting height, cutting width and temperature of logs affect the surface quality of black spruce cants produced by a chipper-canter. Cutting height affects roughness and waviness measured over both directions of wood (along and across the grain). Cutting width affects roughness and waviness across the grain and depth of torn grain. As the cutting height increases, roughness increases but waviness decreases. Furthermore, as cutting width increases from 12.5 to 25 mm at the small log end, surface quality decreases (rougher and wavier surfaces and deeper torn grain). Moreover, roughness and waviness were smaller when processing unfrozen logs than frozen logs. This work also shows that roughness and waviness increase at the large log end due to the constant increase of cutting width and cutting height. Finally, the surface quality of the cants was in general lower at the lower part of the cut due to the change of the finishing knife orientation with respect to the wood grain. The correlation analyses showed that the waviness and roughness across to the grain positively explained the variation of the maximum depth of torn grain with a  $r^2$  of 55.3 percent. Any reduction of torn grain will have also a positive impact on the roughness and waviness of the cant surfaces. Finally, we could find advantageous to feed the logs in the machine just below the center of the cutting circle, as well as by using cutterheads of large diameter.

### 3.6. Literature cited

- Fujiwara Y, Fujii Y, Okumura S (2003) Effect of removal of deep valleys on the evaluation of machined surfaces of wood. *Forest Prod J* 53(2):58-62.
- Funck JW, Forrer JB, Butler DA, Brunner CC, and Maristany AG (1993) Measuring surface roughness on wood: a comparison of laser scatter and stylus tracing approaches. In Proc SPIE, Boston, MA, 1821:173-184.
- Gerhards CC (1982) Effect of moisture content and temperature on the mechanical properties of wood: an analysis of immediate effects. *Wood Fiber* 14(1):4-36.
- Gurău L, Mansfield-Williams H, Irle M (2005) Processing roughness of sanded wood surfaces. *Holz Roh Werkst* 63(1):43-52.
- Hernández RE, Quirion B (1993) Effect of a chipper-canter knife clamp on the quality of chips produced from black spruce. *Forest Prod J* 43(9):8-14.
- Hendarto B, Shayan E, Ozarska B, Carr R (2006) Analysis of roughness of a sanded wood surface. *Int J Adv Manuf Technol* 28(7/8):775-780.
- ISO 11562 (1996) Geometrical product specifications (GPS) – Surface texture: profile method. Metrological characteristics of phase correct filters. British Standards Institute, London.
- ISO 4287 (1998) Geometrical product specifications (GPS) – Surface texture: profile method – terms, definitions and surface texture parameters. British Standards Institute, London.
- ISO/DTS 16610-31 (2002) Geometrical product specifications (GPS) – Filtration. Part 31: Robust profile filters. Gaussian regression filters. In draft. International Standards Organization.
- Jackson M, Parkin R, Brown N (2002) Waves on wood. In Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture 216:475-497.
- Khazaiean A (2006) Caractérisation 3D de l'état de surface du bois: stratégie de mesure – influence des paramètres liés à l'essence et à l'usinage. Ph.D. Thesis, (in French) École Nationale du Génie Rural, des Eaux et des Forêts, France. 241pp.
- Krisch J, Csiha C (1999) Analyzing wood surface roughness using an S3P perthometer and computer based data processing. Proc XIII Sesja Naukowa "Badania dla Meblarstwa", Poland.
- Lemaster RL, Taylor JB (1999) High speed assessment of wood and wood-based composites. In: Proceedings of the 14th International Wood Machining Seminar. Paris, Epinal, and Cluny, France. pp. 479-488.

Sandak J, Tanaka C (2003) Evaluation of surface smoothness by laser displacement sensor 1: Effect of wood species. *J Wood Sci* 49(4):305-311.

Sandak J, Negri M (2005) Wood surface roughness – what is it? In: Proceedings of the 17th International Wood Machining Seminar. Rosenheim, Germany. pp. 242-250.

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

Stewart H (1969) Effect of cutting direction with respect to grain angle on the quality of machined surface, tool force components, and cutting friction coefficient. *Forest Prod J* 19(3):43-46.

Tabachnick, BG, Fidell LS (2007) Using Multivariate Statistics. 5<sup>th</sup> ed. Pearson, Allyn and Bacon, Boston. 980 pp.

## Conclusions générales

Cette recherche a permis d'étudier l'effet de la hauteur de coupe, de la largeur de coupe, et de la température de billes sur la qualité de surface des équarris d'épinette noire (*Picea mariana* (Mill) B.S.P.) produits par une équarrisseuse-fragmenteuse. Le modèle de machine-outil étudié fut celui fabriqué par les équipementiers Sawquip et Comact.

Des billes de 2,44 m de longueur et de trois classes de diamètre (101,6 mm, 152,4 mm et 203,3 mm, mesurés au petit bout) furent équarries à deux largeurs de coupe par classe. Les largeurs de coupe, également mesurées au petit bout, furent de 12,5 mm et 25 mm. Six conditions de coupe ont ainsi été étudiées avec douze billes chacune. Les vitesses de rotation et d'avance de l'équarrisseuse-fragmenteuse furent de 783 tours à la minute et 197 mètres par minute, ce qui a permis d'obtenir une vitesse par couteau calculée (longueur nominale de copeau) de 31,5 mm. L'effet de la température du bois lors de la transformation a été évalué en réalisant l'expérience à l'hiver et à l'été. La température des billes varia entre -14°C et -4°C à l'hiver et entre 20°C et 26°C à l'été (conditions de billes gelées et non gelées). La qualité de surface fut analysée en fonction des paramètres standards de rugosité et d'ondulation et de la profondeur du fil arraché. Les profils de rugosité et d'ondulation ont été pris selon les directions longitudinale et transversale du bois.

Les résultats montrent un effet significatif de la hauteur, et de la largeur de coupe de même que de la température des billes sur la qualité de surface des équarris d'épinette noire produits par l'équarrisseuse-fragmenteuse. La hauteur de coupe affecta la rugosité et l'ondulation longitudinale et transversale du bois. En effet, une augmentation de ce paramètre augmenta la rugosité prise dans les deux directions et l'ondulation transversale du bois. Par contre, l'ondulation longitudinale a diminué avec l'augmentation de la hauteur de coupe.

La largeur de coupe a eu également un effet significatif sur la rugosité et l'ondulation transversale et sur la profondeur du fil arraché. L'augmentation de la largeur de 12,5 à 25

mm au petit bout produisit des surfaces plus ondulées et rugueuses ainsi que du fil arraché plus profond. L'effet de la saison fut aussi très significatif: la rugosité et l'ondulation furent plus élevées à l'hiver qu'à l'été.

Les résultats ont aussi montré une augmentation significative de la rugosité et de l'ondulation au fur et à mesure que la coupe avance vers le gros bout (les billes furent toujours alimentées le petit bout en premier). La rugosité et l'ondulation furent supérieures au gros bout, ce qui serait provoqué par l'augmentation de la hauteur et de la largeur de coupe dû au défilement des billes. La rugosité et l'ondulation furent aussi supérieures dans la partie basse de l'équarri que dans la partie haute. L'orientation de l'arête tranchante du couteau par rapport au fil du bois devient de plus en plus oblique au fur et à mesure que celui-ci avance dans sa coupe. Ce changement d'orientation de la section de couteau faisant la finition semble être défavorable à la production d'une meilleure qualité de surface. Également, le fil arraché (le plus profond dans toute la surface de la planche) fut présent en plus grande proportion dans la partie basse de l'équarri (80%) que dans la partie haute (20%).

Par ailleurs, le fil arraché devrait être le paramètre à contrôler plus efficacement afin d'améliorer la qualité de surface des équarris d'épinette noire produits par l'équarrisseuse-fragmenteuse. En effet, ce paramètre présenta des valeurs de profondeur supérieures à celles de la rugosité et de l'ondulation (il a varié entre 0,8 mm et 2,6 mm, selon les conditions de coupe). Une corrélation hautement positive fut trouvée entre les paramètres de rugosité, d'ondulation et du fil arraché. Ainsi, l'optimisation des conditions de coupe pour diminuer ce défaut de surface permettra aussi d'améliorer la rugosité et l'ondulation de la surface.

Les implications immédiates de cette recherche sont reliées à une meilleure compréhension du procédé de transformation des billes à l'aide d'une équarrisseuse-fragmenteuse, en particulier en ce qui a trait au travail de la partie du couteau faisant la finition de l'équarri. L'influence des conditions de coupe étudiées est maintenant mieux cernée.

Une application qui se dégage de ce travail est aussi que la qualité de surface du bois pourrait être améliorée avec l'utilisation des têtes porte-couteaux des diamètres supérieurs ainsi qu'en prenant soin d'alimenter les billes juste au-dessous de l'axe de rotation de la tête porte-couteaux.

## Bibliographie

- Brinkmann, S., H. Bodschiwinna et H.-W. Lemke. 2000. *Development of a robust Gaussian regression filter for three-dimensional surface analysis*. 10th International Colloquium on Surfaces, tenu à Chemnitz, Germany, du 31 janvier au 1<sup>er</sup> février 2000, 11 pp.
- Bustos, C., R.E. Hernández et Y. Fortin. 2009. *Effect of kiln drying on the hardness and machining properties of tamarack wood for flooring*. Forest Products Journal, 59(1/2): 71-76.
- de Moura, L.F. et R.E. Hernández. 2005. *Evaluation of varnish coating performance for two surfacing methods on sugar maple wood*. Wood and Fiber Science, 37(2):355-366.
- de Moura, L.F. et R.E. Hernández. 2006a. *Characteristics of sugar maple wood surfaces produced by helical planing*. Wood and Fiber Science, 38(1):166-178.
- de Moura, L.F. et R.E. Hernández. 2006b. *Effects of abrasive mineral, grit size and feed speed on the quality of sanded surfaces of sugar maple wood*. Wood Science and Technology, 40(6):517-530.
- de Moura, L.F. et R.E. Hernández. 2006c. *Evaluation of varnish coating performance for three surfacing methods on sugar maple wood*. Forest Products Journal, 56(11/12):130-136.
- de Moura, L.F. et R.E. Hernández. 2007. *Characteristics of sugar maple wood surfaces machined with the fixed-oblique-knife pressure-bar cutting system*. Wood Science and Technology, 41(1):17-29.
- Franz, N.C. 1958. *An analysis of the wood-cutting process*. The University of Michigan Press, Michigan. 152 pp.
- Fujiwara Y., Y. Fujii , et S. Okumura. 2003. *Effect of removal of deep valleys on the evaluation of machined surfaces of wood*. Forest Products Journal, 53(2): 358-62.
- Fujiwara Y., Y. Fujii , Y. Sawada et S. Okumura. 2004. *Assessment of wood surface roughness: a comparison between tactile roughness and three-dimensional parameters derived using robust gaussian regression filter*. Journal of Wood Science, 50(1): 35-40.
- Fujiwara Y., Y. Fujii et S. Okumura. 2005. *Relationship between roughness parameters based on material ratio curve and tactile roughness for sanded surfaces of two hardwoods*. Journal of Wood Science, 51(3):274-277.
- Funck J.W., J.B. Forrer, D.A. Butler, Ch.C Brunner et A.G. Maristany. 1992. *Measuring surface roughness on wood: a comparison of laser scatter and stylus tracing approaches*. SPIE, 1821:173-184.

- Gurău, L., H. Mansfield-Williams et M. Irle. 2005a. *Processing roughness of sanded wood surfaces*. Holz als Roh und Werkstoff, 63(1): 43-52.
- Gurău, L., H. Mansfield-Williams et M. Irle. 2005b. *Comparative study of laser triangulation and stylus measurements of roughness on wood surfaces*. ProLigno, 1:21-31.
- Gurău, L., H. Mansfield-Williams et M. Irle. 2005c. *The influence of wood anatomy on evaluating the roughness of sanded solid wood*. Journal of the institute of Wood Science, 17(2): 65-74.
- Gurău L., H. Mansfield-Williams et M. Irle. 2006. *Filtering the roughness of a sanded wood surface*. Holz als Roh und Werkstoff, 64(5):363-371.
- Hendarto, B., E. Shayan, B. Ozarska et R. Carr. 2006. *Analysis of roughness of a sanded Wood surface*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 28(7/8): 775-780.
- 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., C. Bustos, Y. Fortín et J. Beaulieu. 2001. *Wood machining properties of white spruce from plantation forests*. Forest Products Journal, 51(6): 82-88.
- 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 red oak wood*. Wood and Fiber Science. 34(2): 540-552.
- Hernández, R.E. et J. Cool. 2008a. *Evaluation of three surfacing methods on paper birch wood in relation to water and solvent-borne coating performance*. Wood and Fiber Science. 40(3): 459-469.

Hernández, R.E. et J. Cool. 2008b. *Effects of cutting parameters on surface quality of paper birch wood machined across the grain with two planning techniques*. Holz als Roh und Werkstoff, 66(2): 147-154.

Hernández, R. E. 2009a. *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 du foret, Université Laval.

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

Honkanen, J. 2005. *Measuring heterogeneous and anisotropic surfaces with profiling techniques*. COST E35 Workshop Rosenheim, Germany. Boku – University of Natural Resources and Applied Life Sciences, Vienna.

International Organization for Standardization. 1996. ISO 11562. *Geometrical product specifications (GPS) – Surface Texture: profiles method – Metrological characteristics of phase correct filters*. British Standards Institute, London.

International Organization for Standardization. 1998. ISO 13565-1. *Geometrical product specifications (GPS) – Surface Texture: Profile method; Surfaces having stratified functional properties. Part 1: Filtering and general measurement conditions*. British Standards Institute, London.

International Organization for Standardization. 1998. ISO 13565-2. *Geometrical product specifications (GPS) – Surface Texture: Profile method; Surfaces having stratified functional properties. Part 2: Height characterization using the linear material ratio curve*. British Standards Institute, London.

International Organization for Standardization. 1998. ISO 4287. *Geometrical product specifications (GPS) – Surface Texture: profiles method – Terms – Definitions and surface texture parameters*. British Standards Institute, London.

International Organization for Standardization. 2002. ISO 13565-3. *Geometrical product specifications (GPS) – Surface Texture: Profile method; Surfaces having stratified functional properties. Part 3: Height characterization using the linear material ratio curve*. British Standards Institute, London.

International Organization for Standardization. 2002. ISO 16610-31. *Geometrical product specification (GPS) – Filtration Part 31: Robust profile filters. Gaussian regression filters*. In draft. International Standards Organization.

Iskra, P. et R.E. Hernández. 2009. *The influence of cutting parameters on the surface quality of routed paper birch and surface roughness prediction modeling*. Wood and Fiber Science, 41(1): 28-37.

Jackson M., R Parkin et N. Brown. 2002. *Waves on wood*. Proceedings of the Institute of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 216:475-497.

Jackson M., D. Jang et R. Parkin. 2007. *Analysis of wood surface waviness with a two-image photometric stereo method*. Proceedings of the Institute of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering, 221(8):1091-1099.

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.

Keitaanniemi, O. et N. Virkola. 1975. *Chipping trials with karhula chipper-canter*. Paperi ja Puu, 11:751-768.

Khazaiean, A. 2006. *Caractérisation 3D de l'état de surface du bois: stratégie de mesure – influence des paramètres liés à l'essence et à l'usinage*. Thèse de Ph.D. École Nationale du Génie Rural, des Eaux et des Forêts, France, 241pp.

Kilic, M., S. Hiziroglu et E. Burdulu. 2006. *Effect of machining on surface roughness of wood*. Building and Environment, 41(8):1074-1078.

Koch, P. 1964. *Wood machining processes*. Ronald Press, New York, 530 pp.

Koch, P. 1985. *Utilization of hardwoods growing on southern pine sites*. Volume II. Processing Agriculture handbook N°605, USDA, Forest Service, Washington, DC.

Krisch J. et C. Csiha. 1999. *Analyzing wood surface roughness using an S3P perthometer and computer based data processing*. Proc. XIII Sesja Naukowa “Badania dla Meblarstwa”, Pologne.

LeBoeuf, G. 1987. *Variations de la vitesse des têtes des équarrisseuses: conséquences sur la qualité des copeaux*. Rapport de recherche N° 2573, Centre de recherche de Domtar, Senneville, Québec. 84 pp.

Laganière, B. 2004. *Effects of canter head rotation speed, log feed speed and vertical position of logs on lumber surface and chip quality (phase II)*. Rapport de recherche, Project N° 2663, Forintek Canada Corp. 29pp.

Lemaster, R.L., M.K. Jouaneh et S-M. Yoo. 1985. *Determining product quality with optical scanners*. Actes du 8<sup>th</sup> International Wood Machining Seminar, tenu à Californie, États-Unis, du 7 au 9 octobre 1985, pages 311-324.

Lemaster R.L. et F.C. Beall. 1996. *The use of an optical profilometer to measure surface roughness in medium density fiberboard*. Forest Products Journal, 46(11/12): 73-78.

Lemaster, R.L. et J.B. Taylor. 1999. *High speed assessment of wood and wood-based composites*. Actes du 14th International Wood Machining Seminar, tenu à Paris, Epinal et Cluny, France, du 12 au 19 septembre 1999, pages 479-488.

Lundberg, I.Å.S. et B. Porankiewicz. 1995. *Studies of non-contact methods for roughness measurements on wood surfaces*. Holz als Roh und Werstoff, 53(5):309-314.

Malkoçoğlu A. 2007. *Machining properties and surface roughness of various wood species planed in different conditions*. Building and environment, 42(7): 2562-2567.

McKenzie, W.M. 1960. *Fundamental aspects of the wood cutting process*. Forest Products Journal, 10(9): 447-456.

Mothe, F. 1987. *Essais d'utilisation d'un rugosimètre à palpeur pour qualifier des surfaces de bois*. Annales des sciences forestières, 44(4):473-488.

Mummery, L. 1992. *Surface texture analysis. The Handbook*. Hommelwerke GmbH, West Germany, 106 pp.

Ohtani, T., C. Tanaka et H. Usuki. 2004. *Comparison of the heterogeneity of asperities in wood and aluminium sanding surfaces*. Precision Engineering, 28(1):59-64.

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*. McGraw-Hill, New York, 722 pp.

Sandak J. et C. Tanaka. 2003. *Evaluation of surface smoothness by laser displacement sensor I: Effect of wood species*. Journal of Wood Science, 49(4): 305-311.

Sandak J. et C. Tanaka. 2005. *Evaluation of surface smoothness using a light-sectioning shadow scanner*. Journal of Wood Science, 51(3): 270-273.

Sandak J. et M. Negri. 2005. *Wood surface roughness – what is it?* Actes du 17th International Wood Machining Seminar, tenu à Rosenheim, Germany, du 26 au 28 septembre 2005, pages 242-250.

SAS Institut. 2007. *SAS/ User's Guide, release 9.2 ed.* SAS Institute Inc, Caray, Caroline du Nord.

Sinn, G., J. Sandak et T. Ramananantoandro. 2009. *Properties of wood surfaces—characterization and measurement. A review*. Holzforschung, 63(2):196-203.

- Stewart, H.A. 1971. *Chip formation when orthogonally cutting wood against the grain.* Wood Science, 3(4):193-203.
- Stewart, H.A. 1977. *Optimum rake angle related to select strength properties of wood.* Forest Products Journal, 27(1):51-53.
- Stewart, H.A. 1979. *Analysis of orthogonal woodcutting across the grain.* Wood Science, 12(1):38-45.
- Stewart, H.A. 1980. *Some surfacing defects and problems related to wood moisture content.* Wood and Fiber, 12(3):175-182.
- Stewart, H.A. 1986. *Fixed knife-pressure bar system for surfacing dry wood.* Forest Products Journal, 36(6):52-56.
- Stumbo, D.A. 1963. *Surface texture measurement methods.* Forest Products Journal, 13(7): 299-304.
- Tabachnick, B.G. et Fidell L.S. 2007. *Using Multivariate Statistics.* 5<sup>ème</sup> edition. Pearson, Allyn et Bacon, Boston. 980 pp.
- Taylor, J.B., A.L. Carrano et R.L. Lemaster. 1999. *Quantification of process parameters in a wood sanding operation.* Forest Products Journal, 49(5):51-46.
- Triboulot, P. 1984. *Réflexions sur les surfaces et mesures des états de surface du bois.* Annales des sciences forestières. 41(3) : 335-354.
- Triboulot, P., C. Sales, A. Zerizer et P. Martin. 1995. *Correlation of fracture toughness of bonded joints with quality (roughness) of knife planed MDF surface.* Holzforschung, 49(5):465-470.
- Woodson, G.E. et P. Koch. 1970. *Tool forces and chips formation in orthogonal cutting of loblolly pine.* Forest Service Research Paper CO-52. US. Department of Agriculture.
- Yang, D., M. Jackson et R. Parkin. 2005. *Measuring cutter marks on wood surfaces with machine vision techniques.* Actes du 17<sup>th</sup> International Wood Machining Seminar, tenu à Rosenheim, Germany, du 26 au 28 septembre 2005, pp. 258-271.
- Zani, M. 2003. *La mesure de rugosité? Quelques normes...et plusieurs dizaines de paramètres.* Mesures mécaniques. 758: 59-63
- Zhao, X. 1995. *Inspecting wood surface roughness using computer vision.* SPIE, 2345: 71-76.

## Annexe A

Les tableaux A.1 à A.8 présentent les moyennes des paramètres de rugosité et d'ondulation par condition de coupe lors l'évaluation de la topographie de la surface du bois. Les six premiers tableaux correspondent à l'évaluation longitudinale et les deux suivants à l'évaluation transversale.

**Tableau A.1.** Moyennes de  $R_a$  (écart moyen arithmétique du profil de rugosité) et  $R_q$  (écart quadratique du profil de rugosité) de l'évaluation longitudinale.

Paramètre	Largeur de coupe (LC)		12,5 mm				25 mm				Moyenne générale	
	Saison	Diamètre (mm)	Petit bout		Gros bout		Petit bout		Gros bout			
			*en haut	*en bas	en haut	en bas	en haut	en bas	en haut	en bas		
$R_a$ ( $\mu$ )	Été	101,6	19	15	14	14	14	14	16	15	15,1	
		152,4	15	15	16	17	21	16	18	17	16,8	
		203,2	16	16	16	17	18	19	15	19	17,0	
	Hiver	101,6	20	22	19	17	22	17	21	17	19,5	
		152,4	17	19	17	19	22	22	24	20	20,2	
		203,2	26	18	20	19	22	22	18	21	20,9	
$R_q$ ( $\mu$ )	Été	en haut		18,7		en bas		17,8				
		Moyenne	LC 12,5 mm		17,7		LC 25 mm		18,8			
		101,6	29	20	22	20	20	19	25	19	21,8	
		152,4	20	20	24	23	27	23	27	24	23,4	
		203,2	21	23	21	25	23	26	22	28	23,7	
	Hiver	101,6	29	30	30	23	32	24	29	22	27,4	
		152,4	26	27	26	26	32	31	33	29	28,6	
		203,2	36	27	27	27	30	32	24	31	29,5	
		Moyenne	en haut		26,5		en bas		25,0			
		LC 12,5 mm	25,1		LC 25 mm		26,3					

\* Position en haut et en bas de la bille.

**Tableau A.2.** Moyennes de  $R_p$  (hauteur maximale de saille du profil de rugosité) et  $R_v$  (profondeur maximale du profil de rugosité) de l'évaluation longitudinale.

Paramètre	Largeur de coupe (LC)		12,5 mm				25 mm				Moyenne générale	
	Saison	Diamètre (mm)	Petit bout		Gros bout		Petit bout		Gros bout			
			en haut	en bas	en haut	en bas	en haut	en bas	en haut	en bas		
$R_p$ ( $\mu$ )	Été	101,6	34	29	31	28	28	26	33	27	29,6	
		152,4	28	29	32	32	36	33	36	34	32,5	
		203,2	29	32	30	36	32	36	30	38	32,9	
	Hiver	101,6	40	40	41	32	43	33	40	31	37,6	
		152,4	37	38	37	36	42	41	42	40	39,1	
		203,2	49	37	38	39	40	45	34	43	40,6	
$R_v$ ( $\mu$ )	Été	Moyenne	en haut		36,0		en bas		34,8			
		LC 12,5 mm	34,8		LC 25 mm		35,9					
		101,6	35	29	30	28	27	27	32	27	29,4	
	Hiver	152,4	29	28	32	32	38	32	34	33	32,2	
		203,2	31	32	30	34	34	36	31	37	33,2	
		101,6	39	41	39	32	42	33	40	31	37,2	
	Hiver	152,4	35	37	35	36	42	41	40	38	38,1	
		203,2	47	37	38	38	40	41	34	41	39,6	
		Moyenne	en haut		35,6		34,3					
		LC 12,5 mm	34,4		LC 25 mm		35,5					

**Tableau A.3.** Moyennes de  $R_z$  (hauteur maximale du profil de rugosité) et  $R_t$  (hauteur totale du profil de rugosité sur la longueur d'évaluation) de l'évaluation longitudinale.

Paramètre	Largeur de coupe		Moyenne								Moyenne générale	
	(LC)		12,5 mm				25 mm					
	Saison	Diamètre (mm)	Petit bout		Gros bout		Petit bout		Gros bout			
$R_z$ ( $\mu$ )	Été	101,6	69	58	61	57	55	53	65	54	59,0	
		152,4	57	57	64	64	74	65	70	67	64,7	
		203,2	60	64	60	70	66	72	61	76	66,1	
	Hiver	101,6	79	81	81	64	85	66	80	62	74,8	
		152,4	72	75	72	72	84	82	81	77	77,1	
		203,2	96	74	76	77	80	86	68	84	80,2	
$R_t$ ( $\mu$ )	Été	Moyenne	en haut		71,6		en bas		69,1			
		LC 12,5 mm	69,2		LC 25 mm		71,4					
		101,6	948	612	512	528	487	515	823	498	615	
	Hiver	152,4	534	436	658	631	929	602	754	617	645	
		203,2	559	652	463	577	653	786	460	731	610	
		101,6	908	1205	1000	690	928	697	776	524	841	
		Moyenne	en haut		750		en bas		723			
		LC 12,5 mm	730		LC 25 mm		743					
		152,4	642	755	735	854	841	1005	934	818	823	
		203,2	1148	859	798	817	963	945	541	998	884	

**Tableau A.4.** Moyennes de  $W_a$  (écart moyen arithmétique du profil d'ondulation) et  $W_q$  (écart quadratique du profil d'ondulation) de l'évaluation longitudinale.

Paramètre	Largeur de coupe (LC)		12,5 mm				25 mm				Moyenne générale	
	Saison	Diamètre (mm)	Petit bout		Gros bout		Petit bout		Gros bout			
			en haut	en bas	en haut	en bas	en haut	en bas	en haut	en bas		
$W_a$ ( $\mu$ )	Été	101,6	172	150	168	172	143	146	171	156	159,8	
		152,4	119	139	140	159	146	171	142	161	147,1	
		203,2	133	141	127	180	116	169	109	173	143,4	
	Hiver	101,6	195	219	225	191	190	199	205	172	199,4	
		152,4	159	181	192	204	174	208	179	205	188,0	
		203,2	202	180	179	219	175	245	188	239	203,3	
$W_q$ ( $\mu$ )	Été	Moyenne	en haut		164,6		en bas		182,4			
			LC 12,5 mm		172,7		LC 25 mm		174,3			
		101,6	172	152	168	173	145	149	171	157	160,8	
		152,4	121	140	141	161	150	173	143	163	148,9	
		203,2	136	143	129	181	119	171	110	175	145,4	
	Hiver	Moyenne	en haut		166,4		en bas		184,5			
			LC 12,5 mm		174,4		LC 25 mm		176,5			
		101,6	197	222	226	193	191	202	208	175	201,7	
		152,4	160	182	193	207	177	211	184	207	190,3	
		203,2	204	181	182	222	178	247	191	241	205,9	

**Tableau A.5.** Moyennes de  $W_p$  (hauteur maximale de sangle du profil d'ondulation) et  $W_v$  (profondeur maximale du profil d'ondulation) de l'évaluation longitudinale.

Paramètre	Largeur de coupe									Moyenne générale		
	(LC)		12,5 mm				25 mm					
	Saison	Diamètre (mm)	Petit bout		Gros bout		Petit bout		Gros bout			
$W_p$ ( $\mu$ )	Été	101,6	23	20	24	23	22	21	28	23	23,1	
		152,4	19	21	24	27	24	27	27	28	24,6	
		203,2	20	25	22	30	22	30	21	33	25,2	
	Hiver	101,6	27	29	32	28	32	27	36	29	29,8	
		152,4	22	27	27	30	30	33	34	36	30,0	
		203,2	30	29	29	35	30	37	31	42	32,9	
$W_v$ ( $\mu$ )	Été	Moyenne	en haut		26,5		en bas		28,7		24,1	
		LC 12,5 mm			26,0		LC 25 mm	29,3 <th data-kind="ghost"></th> <th data-kind="ghost"></th> <th data-kind="ghost"></th>				
		101,6	23	20	24	22	22	21	27	23	22,6	
	Winter	152,4	19	21	24	27	24	27	26	28	24,5	
		203,2	20	24	22	30	21	30	21	33	25,1	
		101,6	27	29	33	27	32	27	36	29	30,0	
Moyenne	LC 12,5 mm	152,4	22	26	27	30	31	33	34	36	30,0	
		203,2	30	28	30	34	31	37	30	40	32,5	
		Moyenne	en haut		26,5		en bas		28,5		30,9	
	LC 12,5 mm	101,6			25,8		LC 25 mm	29,1				

**Tableau A.6.** Moyennes de  $W_z$  (hauteur maximale du profil d'ondulation) et  $W_t$  (hauteur totale du profil d'ondulation sur la longueur d'évaluation) de l'évaluation longitudinale.

Paramètre	Largeur de coupe									Moyenne générale		
	(LC)		12,5 mm				25 mm					
	Saison	Diamètre (mm)	Petit bout		Gros bout		Petit bout		Gros bout			
$W_z(\mu)$	Été	101,6	46	40	49	45	44	41	54	46	45,6	
		152,4	37	42	48	55	48	54	53	56	49,1	
		203,2	40	49	44	60	43	60	42	65	50,4	
	Winter	101,6	54	58	65	55	64	54	72	59	59,9	
		152,4	45	53	55	60	61	66	69	72	60,0	
		203,2	60	57	59	69	61	74	61	82	65,4	
$W_t(\mu)$	Été	Moyenne	en haut		53,0		en bas		57,2		926	
		LC 12,5 mm			51,8		LC 25 mm			58,4		
		101,6	1067	954	918	971	845	903	1065	958	960	
	Hiver	152,4	671	815	852	1011	933	1064	910	1038	912	1218
		203,2	874	838	735	1078	876	1102	641	1106	906	
		101,6	1103	1354	1309	1178	1222	1252	1396	1136	1244	
Moyenne	LC 12,5 mm	152,4	895	1168	1090	1195	1051	1281	1186	1249	1139	1218
		203,2	1313	1156	1032	1528	1171	1457	1016	1503	1272	
		en haut	1007		en bas	1137		LC 25 mm	1098			

**Tableau A.7.** Moyennes de  $R_a$  (écart moyen arithmétique du profil de rugosité),  $R_q$  (écart quadratique du profil de rugosité) et  $R_t$  (hauteur totale du profil de rugosité sur la longueur d'évaluation) de l'évaluation transversale.

Paramètre	Largeur de coupe	12,5 mm				Moyenne	Moyenne générale
		Diamètre (mm)	Petit bout	Gros bout	Petit bout		
	Saison						
$R_a$ ( $\mu$ )	Été	101,6	29	31	36	38	33,4
		152,4	26	37	34	42	34,9
		203,2	32	39	37	43	37,6
	Hiver	101,6	37	40	39	45	40,3
		152,4	32	36	42	48	39,8
		203,2	37	37	48	51	43,2
		Moyenne	34,5		41,9		
$R_q$ ( $\mu$ )	Été	101,6	36	39	57	49	45,2
		152,4	34	46	42	51	43,1
		203,2	38	48	46	52	46,0
	Hiver	101,6	48	50	49	55	50,7
		152,4	46	47	52	59	51,0
		203,2	52	48	57	60	54,3
		Moyenne	44,2		52,6		
$R_t$ ( $\mu$ )	Summer	101,6	542	532	738	874	671
		152,4	423	729	633	877	666
		203,2	586	910	895	1123	879
	Winter	101,6	662	695	678	796	708
		152,4	629	662	745	844	720
		203,2	789	699	954	1021	866
		Moyenne	655		848		

**Tableau A.8.** Moyennes de  $W_a$  (écart moyen arithmétique du profil d'ondulation),  $W_q$  (écart quadratique du profil d'ondulation) et  $W_t$  (hauteur totale du profil d'ondulation sur la longueur d'évaluation) de l'évaluation transversale.

Paramètre	Largeur de coupe	12,5 mm		25 mm		Moyenne	Moyenne générale
		Saison	Diamètre (mm)	Petit bout	Gros bout		
$W_a$ ( $\mu$ )	Été	101,6	64	95	126	154	109,9
		152,4	60	108	103	167	109,2
		203,2	75	121	122	156	118,7
	Hiver	101,6	86	97	127	138	111,8
		152,4	87	85	115	132	104,9
		203,2	130	104	132	135	125,1
Moyenne		92,7		133,8			
$W_q$ ( $\mu$ )	Été	101,6	70	101	135	160	116,6
		152,4	65	115	109	177	116,5
		203,2	83	130	129	166	127,1
	Hiver	101,6	91	105	134	148	119,6
		152,4	89	91	123	143	111,6
		203,2	134	111	142	146	133,0
Moyenne		98,8		142,7			
$W_t$ ( $\mu$ )	Summer	101,6	427	637	894	1026	746
		152,4	425	748	736	1090	750
		203,2	586	976	877	1215	914
	Winter	101,6	550	644	766	895	714
		152,4	552	588	823	908	718
		203,2	812	740	1004	1037	898
Moyenne		641		939			

## Annexe B

**Tableau B.1.** Moyennes de la profondeur maximale du fil arraché selon les conditions de coupe.

Paramètre	Largeur de coupe (LC)		12,5 mm				25 mm				Moyenne générale	
	Saison	Diamètre (mm)	Petit bout		Gros bout		Petit bout		Gros bout			
			*en haut	*en bas	en haut	en bas	en haut	en bas	en haut	en bas		
Profondeur fil arraché (mm)	Été	101,6	1,1	1,2	1,1	1,4	1,3	1,5	1,7	1,5	1,4	
		152,4	1,0	1,0	1,3	1,3	2,3	1,5	2,4	1,5	1,5	
		203,2	1,6	0,9	2,4	1,2	2,3	1,3	1,5	1,6	1,6	
	Hiver	101,6	1,6	1,6	1,2	1,6	1,8	1,9	1,4	1,7	1,6	
		152,4	0,8	1,6	1,3	1,7	2,6	1,8	1,9	1,7	1,7	
		203,2	1,9	1,4	1,3	2,1	2,5	2,3	2,4	2,0	2,0	
	Moyenne	en haut		1,7		en bas		1,6				
		LC 12,5 mm		1,4		LC 25 mm		1,9				

\*Position en haut et en bas de la bille.