

# Table des matières

Chapitre 1 .....	3
Revue de littérature .....	3
1.1 La coupe du bois .....	3
1.2 Le rabotage .....	3
1.2.1 Le rabotage orthogonal .....	4
1.2.1.1 La coupe 90°-0° .....	5
1.2.1.2 La coupe 90°-90° .....	7
1.2.1.3 La coupe 0°-90° .....	8
1.2.2 La coupe oblique .....	9
1.2.3 Le rabotage périphérique .....	11
1.2.3.1 La coupe périphérique droite .....	11
1.2.3.2 La coupe hélicoïdale .....	14
1.2.4 La coupe rotative .....	15
1.3 Le ponçage .....	15
1.3.1 Les abrasifs .....	17
1.3.2 Le procédé de ponçage .....	18
1.4 La qualité de surface du bois .....	20
1.4.1 Les défauts de surface .....	21
1.4.1.1 Le fil arraché .....	21
1.4.1.2 Le fil laineux ou fil pelucheux .....	21
1.4.1.3 Les marques de copeaux .....	23
1.4.1.4 L'érastement cellulaire .....	23
1.4.2 La rugosité de surface .....	24
1.4.2.1 Les appareils de mesure .....	24
1.4.2.2 Les filtres .....	26
1.4.2.3 Le profil de rugosité .....	26
1.4.2.4 Les paramètres de mesure .....	27
1.4.2.5 L'effet de l'usinage .....	28
1.4.3 La mouillabilité de surface .....	29
1.4.3.1 La mesure de la mouillabilité .....	30
1.4.3.2 L'effet de la rugosité sur la mouillabilité .....	31
1.5 L'adhésion à une surface .....	31
1.5.1 L'effet de la pénétration .....	32
1.5.2 L'effet de la rugosité .....	32
1.5.3 L'effet de l'usinage .....	33
1.6 L'inactivation des surfaces du bois .....	33
1.7 Le vernissage du bois .....	35
1.7.1 Les types de solvant .....	35
1.7.2 L'effet du vieillissement .....	36
1.7.2.1 L'effet de la rugosité et de l'usinage .....	37
1.7.3 Les méthodes d'évaluation .....	38
1.8 Le bouleau blanc .....	39
1.8.1 Les travaux antérieurs sur l'usinage .....	39

Chapitre 2.....	41
Effects of the cutting parameters on surface quality of paper birch wood machined across the grain with two planing techniques .....	41
2.1 Abstract.....	41
2.2 Introduction.....	41
2.3 Materials and methods .....	43
2.3.1 Testing material .....	43
2.3.2 Machining treatments .....	43
2.3.3 Surface topography measurements .....	44
2.3.4 Surface wettability tests .....	44
2.3.5 Microscopic evaluation.....	45
2.3.6 Coating procedure.....	45
2.3.7 Accelerated aging .....	45
2.3.8 Adhesion tests .....	46
2.3.9 Statistical analysis.....	46
2.4 Results and discussion .....	46
2.4.1 Surface topography .....	46
2.4.2 Surface wettability .....	51
2.4.3 Adhesion tests .....	55
2.5 Conclusions and recommendations .....	56
Chapitre 3.....	58
Evaluation of water-borne and solvent-borne coating performance for three surfacing methods on paper birch wood.....	58
3.1 Abstract.....	58
3.2 Introduction.....	58
3.3 Materials and methods .....	60
3.3.1 Testing material .....	60
3.3.2 Machining treatments .....	61
3.3.3 Surface topography evaluation .....	61
3.3.4 Surface wettability tests .....	62
3.3.5 Microscopic evaluation.....	62
3.3.6 Coating procedure.....	62
3.3.7 Accelerated aging .....	63
3.3.8 Adhesion tests .....	63
3.3.9 Statistical analysis.....	63
3.4 Results and discussion .....	63
3.4.1 Surface topography .....	63
3.4.2 Surface wettability .....	65
3.4.3 Adhesion tests .....	69
3.5 Conclusions and recommendations .....	71
Bibliographie .....	76

## Liste des tableaux

Tableau 1.1: Définitions des principaux paramètres de mesures de rugosité de surface.....	28
Tableau 1.2: Résumé des conditions optimales de rabotage pour le bouleau blanc. ....	40
Table 2.1: Roughness average ( $R_a$ ) of helical-knife planed paper birch wood surfaces measured along and across the grain for three cutting depths. ....	48
Table 2.2: Roughness average $R_a$ of face milled paper birch wood surfaces measured along and across the grain for three cutting depths and three feed speeds. ....	50
Table 2.3: Adhesion strength of helical planed and face milled paper birch wood coated surfaces as a function of feed speed and cutting depth.....	56
Table 3.1: Roughness averages ( $R_a$ ), maximum height of profile ( $R_z$ ), skewness coefficient ( $R_{sk}$ ) and kurtosis coefficient ( $R_{ku}$ ) measured along ( $\parallel$ ) and across ( $\perp$ ) the grain, obtained for three surfacing techniques applied to paper birch wood. ....	65
Table 3.2: Pull-off adhesion strength for a water-borne (WB) and a solvent-borne (SB) coating applied to paper birch wood machined by three surfacing methods.....	70

# Liste des figures

Figure 1.1: Géométrie de la coupe orthogonale et des composantes de la force de coupe résultante.....	5
Figure 1.2: Principaux types de coupe orthogonale.....	6
Figure 1.3: Copeau de type I, obtenu en direction 90°-0°, à un angle d'attaque de 25° et 1,14 mm de profondeur de coupe .....	6
Figure 1.4: Copeau de type II, obtenu en direction 90°-0°, à un angle d'attaque de 15° et 1,14 mm de profondeur de coupe .....	7
Figure 1.5: Copeau de type III, obtenu en direction 90°-0°, à un angle d'attaque de 5° et 1,14 mm de profondeur de coupe .....	8
Figure 1.6: Coupe du bois en utilisant une barre de pression et un couteau fixe. ....	10
Figure 1.7: Schéma montrant la position de l'arête tranchante du couteau en coupe orthogonale et en coupe oblique. ....	10
Figure 1.8: Schéma illustrant la coupe périphérique en opposition.....	13
Figure 1.9: Schéma montrant l'effet de la rectification des couteaux sur la géométrie de coupe.....	13
Figure 1.10: Porte-outil hélicoïdal où $\phi$ est l'angle d'hélice et $L$ est la distance axiale entre les rangées adjacentes de couteaux.....	15
Figure 1.11: Géométries de la coupe périphérique hélicoïdale et celle à couteaux droits....	16
Figure 1.12: Schéma d'une vue de dessus illustrant la coupe périphérique rotative. ....	17
Figure 1.13: Divers niveaux de fil arraché à la surface de l'érable à sucre.....	22
Figure 1.14: Divers niveaux de fil laineux ou fil pelucheux à la surface du sapin Engelmann. ....	22
Figure 1.15: Marques de copeaux à la surface du bouleau jaune. ....	24
Figure 1.16: Goutte d'un liquide en équilibre. ....	32
Figure 2.1: Schema illustrating how the Rotoplane 16T works. ....	45
Figure 2.2: Transverse ESEM micrograph of a paper birch surface machined by helical planing. ....	49
Figure 2.3: Average surface roughness along and across to the grain for the face milling treatment for a cutting depth of 2.0 mm. ....	51
Figure 2.4: Transverse ESEM micrograph of a paper birch surface machined by face milling at a feed speed of 1.6 m/min (A) and 36.8 m/min (B). ....	52
Figure 2.5: K-value as a function of the cutting depth for face milling at three different feed speeds.....	53
Figure 2.6: ESEM micrograph illustrating top views for (A) helical planing and (B) face milling.....	54
Figure 3.1: ESEM micrographs illustrating (A) top view and (B) transverse view for a sanded specimen. ....	66
Figure 3.2: ESEM micrographs illustrating (A) top view and (B) transverse view for a helical planed specimen. ....	67
Figure 3.3: ESEM micrographs illustrating (A) top views and (B) transverse view for a face milled specimen. ....	68
Figure 3.4: Contact angle evolution with wetting time for all treatments. ....	70

# Introduction

Le rabotage est parmi les procédés de transformation du bois les plus importants. Il sert à uniformiser les dimensions du bois d'œuvre suite au séchage. En seconde transformation, ce procédé permet de rendre les pièces à la section finale ainsi qu'à préparer les surfaces pour les opérations de finition du bois. Cependant, c'est généralement le ponçage qui précède l'étape de finition. Le ponçage étant une étape coûteuse, il serait intéressant d'utiliser des procédés alternatifs qui permettent de bien préparer la surface du bois. Le rabotage périphérique en coupe hélicoïdale montre un certain potentiel, particulièrement lorsque ce dernier est effectué perpendiculairement aux fibres. Il en serait de même de la coupe rotative en direction transversale.

La comparaison entre des surfaces poncées et celles rabotées révèle plusieurs différences entre les deux procédés. D'une part, le ponçage induit des dommages cellulaires à la surface du bois, ce qui nuit à l'application de produits de finition. Cet endommagement s'étend souvent sur toute la surface formant ainsi une couche de cellules écrasées et déchirées. Cette couche agit alors comme un imperméabilisant et nuit à la pénétration des produits de finition. Il en résulte que l'adhésion mécanique de ces produits sur le bois est réduite. De plus, l'endommagement cellulaire s'accompagne souvent de microfissures, lesquelles peuvent se propager durant l'utilisation ultérieure du produit fini et causer ainsi des fractures dans le bois ou dans le revêtement. L'adhésion à l'interface bois-revêtement s'en retrouve ainsi affaiblie. D'autre part, les surfaces rabotées en coupe périphérique présentent moins d'endommagement cellulaire sous la surface. Toutefois, pour ce faire il est important de choisir adéquatement le type de rabotage ainsi que d'optimiser ses conditions de coupe.

À cet effet, plusieurs paramètres tels, la rugosité de la surface, le degré d'endommagement cellulaire, les propriétés de mouillage et la résistance à l'arrachement du revêtement sont utilisés afin d'évaluer la qualité de la surface usinée. Le premier est souvent associé à l'aspect visuel et tactile et sert à vérifier la qualité du produit fini. Le second fourni de l'information quant à l'absorptivité ou la perméabilité d'une surface et à son potentiel d'adhésion. Le troisième renseigne sur la capacité d'une surface à absorber un liquide et détermine si le produit de finition pénétrera et s'étalera facilement sur la surface. Le dernier

permet de mesurer directement le degré d'adhésion de produits de finition sur la surface. Combiné à un traitement de vieillissement accéléré, cette mesure permet d'estimer le comportement à long terme d'un revêtement sur le bois.

Différents types de produits de finition sont disponibles sur le marché. De plus en plus, l'industrie se tourne vers les produits à base d'eau afin de limiter les émissions de composés organiques volatils. Ces revêtements sont généralement durcis avec une cuisson aux rayons ultra-violets, ce qui augmente leur adhésion et leur résistance à l'abrasion.

Au Canada, le comportement du bois de bouleau blanc au rabotage ou au ponçage est très peu connu puisque l'intégration de cette essence dans l'industrie de transformation est récente. L'objectif général de ce projet de recherche est donc d'évaluer le comportement du bois de bouleau blanc à différents procédés d'usinage.

Les objectifs spécifiques de ce projet sont, dans un premier temps, de déterminer l'effet de la vitesse d'avance et de l'épaisseur de coupe sur le comportement au vernissage selon deux procédés de rabotage, soit la coupe rotative et la coupe hélicoïdale. Dans un deuxième temps, la qualité de la surface des deux procédés de rabotage a été comparée au ponçage. Cette comparaison a été réalisée avec deux types de revêtements, soit l'un à base d'eau et un autre à base d'un solvant organique.

# Chapitre 1

## Revue de littérature

### 1.1 La coupe 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. Cette action entraîne la formation de copeaux de dimensions variables. L'orientation et la direction de la force de coupe sont contrôlées par le design de l'outil et par les différents paramètres ou conditions de coupe. Tous ces facteurs déterminent la façon dont les contraintes se développent à l'interface entre l'outil et le bois, de même que le mode de rupture qui y prend place. L'usinage est ainsi un procédé de déformations, de contraintes et de ruptures.

### 1.2 Le rabotage

Le rabotage est, après le sciage, l'un des plus importants procédés d'usinage du bois (Cantin 1967; Williams et Morris 1998). Deux principaux types de rabotage existent, soient le rabotage orthogonal et celui périphérique. Le rabotage orthogonal a lieu par le mouvement perpendiculaire de l'arête tranchante d'un outil par rapport à la direction du mouvement de la pièce de bois usinée. La surface résultante est un plan parallèle à la surface d'origine. Le rabotage périphérique se produit à l'aide des couteaux disposés sur la périphérie d'un outil rotatif. Chaque couteau touche à la surface de façon intermittente, délogeant un copeau de dimensions équivalentes. La surface est donc caractérisée par des traces de couteaux. La plupart des modes de coupe du bois peuvent s'identifier à l'un ou l'autre de ces deux types principaux.

### 1.2.1 Le rabotage orthogonal

Tel que mentionné précédemment, la coupe orthogonale est produite par l'action d'un outil de coupe qui crée une surface parallèle à l'originale. Le rabot de menuisier, la scie à ruban, la scie circulaire, le tour à bois et la trancheuse sont des exemples d'outils et de machines-outils travaillant selon ce mode de coupe.

Essentiellement, la géométrie de coupe associée avec le rabotage orthogonal permet d'identifier trois angles de coupe (figure 1.1). Premièrement, l'angle d'attaque ( $\alpha$ ) affecte la pénétration de l'arête tranchante dans le bois et intervient lors du dégagement du copeau suite à la coupe. Il affecte ainsi de manière directe les efforts impliqués durant la coupe. Deuxièmement, l'angle de dépouille ( $\gamma$ ) permet d'éviter le talonnancement du bois sur l'outil. S'il est trop faible, la face de dépouille va frotter sur le bois, provoquant l'échauffement et l'usure de l'outil. Par contre, s'il est trop grand l'arête tranchante devient plus fragile. Enfin, l'angle du couteau ( $\beta$ ) est le complémentaire des deux précédents et conditionne la résistance de l'outil à l'usure. Plus l'angle  $\beta$  est élevé, plus l'outil sera résistant à l'usure. Il est à noter que 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).

Par ailleurs, la force résultante qui agit sur le bois peut être décomposée en une force parallèle ( $F_P$ ) et une force normale ( $F_N$ ) (figure 1.1). Bien entendu, la grandeur 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). Étant donné que les forces de coupe sont responsables du type de copeau formé et de la qualité de la surface, elles ont été étudiées par plusieurs auteurs. À première vue, la force de coupe augmente avec l'usure des outils de coupe (Huang 1994a; Hernández et Rojas 2002; Hernández et de Moura 2002). À l'inverse, elle diminue avec l'augmentation de l'angle d'attaque (Woodson et Koch 1970; Stewart 1977; 1988; Komatsu 1993; Huang 1994b; Jin et Cai 1996).

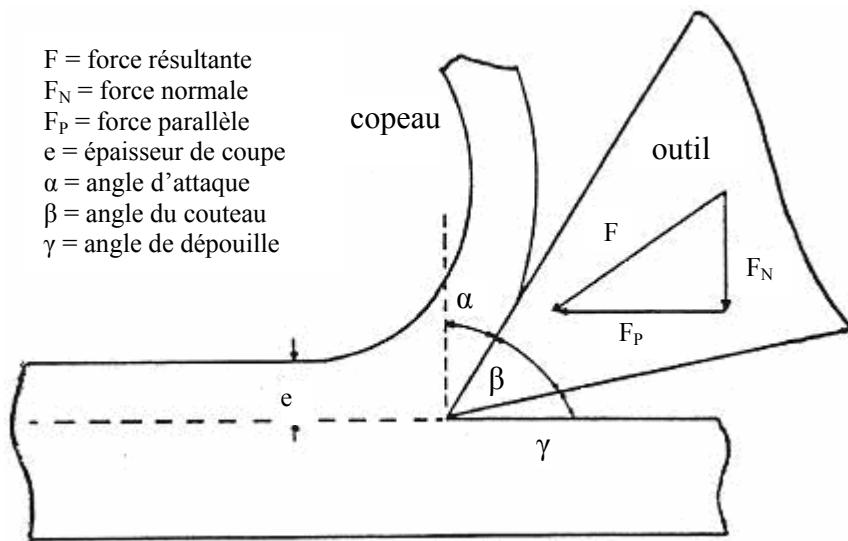


Figure 1.1: Géométrie de la coupe orthogonale et des composantes de la force de coupe résultante (adaptée de Woodson et Koch 1970).

McKenzie (1960) a proposé une notation comportant deux chiffres pour décrire la coupe orthogonale. Le premier correspond à l'angle entre l'arête tranchante de l'outil et le fil du bois. Le second est l'angle entre la direction de la coupe et le fil du bois. Il y a donc trois principaux types de coupe orthogonale : 90°-0°, 90°-90° et 0°-90° (figure 1.2).

### 1.2.1.1 La coupe 90°-0°

La coupe orthogonale en direction 90°-0° se présente dans des procédés tels que le tranchage longitudinal et le rabotage manuel. Il s'agit du type de coupe associé à tout travail effectué suivant la direction du fil du bois. Ce genre de coupe engendre trois principaux types de copeaux dénommés type I, type II et type III par Franz (1958).

Le copeau de type I est caractérisé par la propagation de la fissure à l'avant de l'outil de coupe. Le copeau est donc maintenu comme une poutre encastrée en porte-à-faux jusqu'à ce que la contrainte de flexion excède la contrainte de rupture du bois (figure 1.3). L'emploi d'un angle d'attaque élevé, supérieur à environ 25°, de même qu'une épaisseur de copeau assez grande favorisent la formation des copeaux de type I.

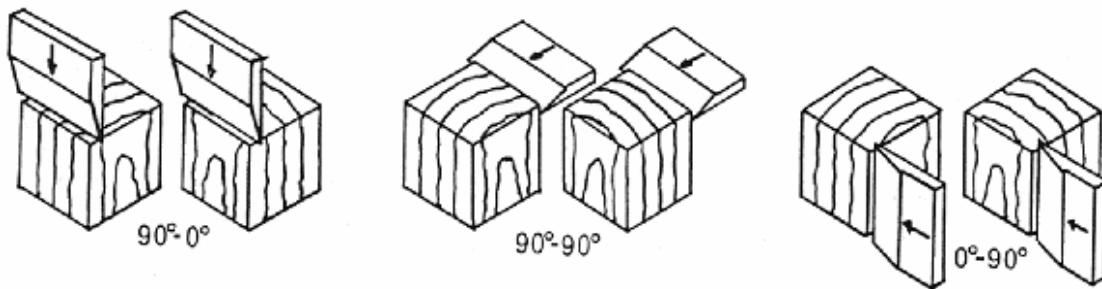


Figure 1.2: Principaux types de coupe orthogonale (adapté de Hoadley 2000).

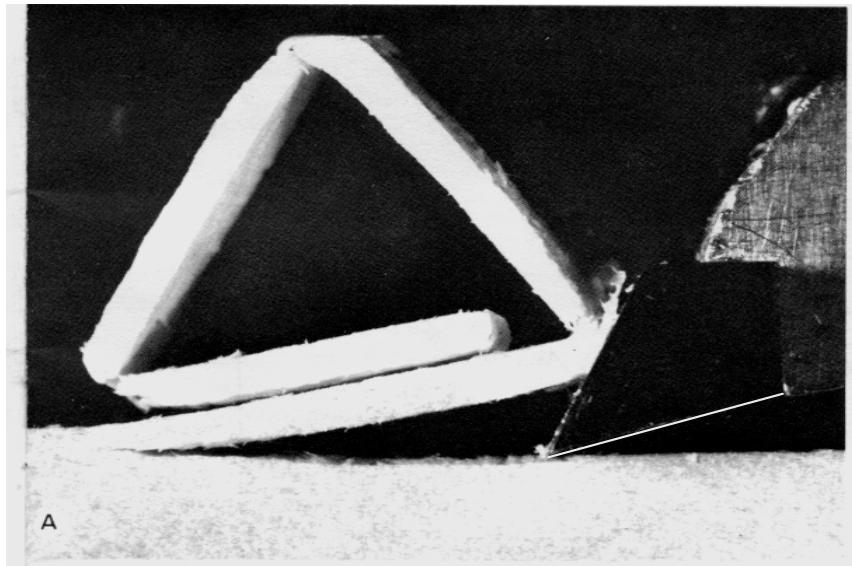


Figure 1.3: Copeau de type I, obtenu en direction 90°-0°, à un angle d'attaque de 25° et 1,14 mm de profondeur de coupe (tiré de Woodson et Koch 1970).

Le copeau de type II est formé lorsque la rupture du bois se produit le long d'une ligne qui s'étend à partir de l'arête tranchante de l'outil et provoque des contraintes de cisaillement diagonales (figure 1.4). Le copeau est ainsi formé en continu, ce qui limite l'apparition de défauts sur la surface. Les conditions qui permettent la formation de ce type de copeau sont l'emploi d'un angle d'attaque situé entre 10° et 25° et de faibles épaisseurs de coupe. Stewart (1977) a déterminé que l'angle d'attaque optimal correspond à celui qui minimise la composante normale de la force de coupe.

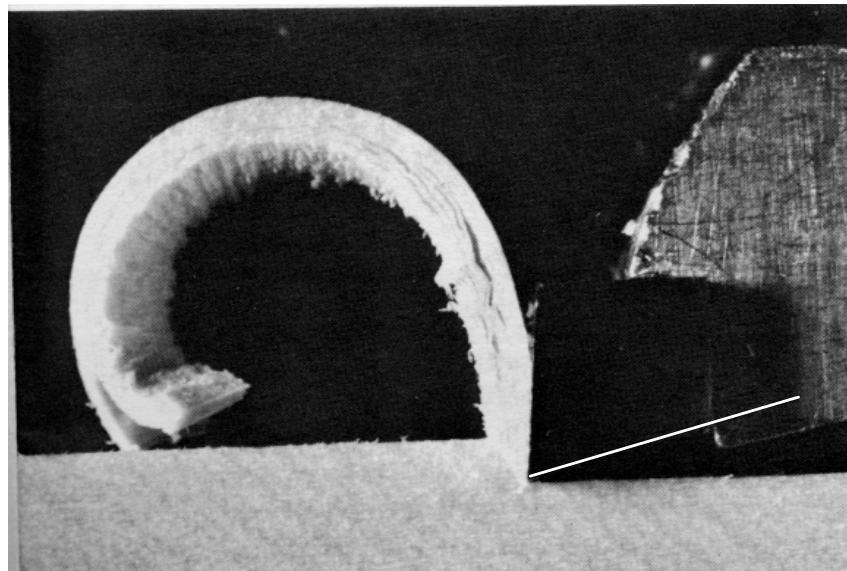


Figure 1.4: Copeau de type II, obtenu en direction  $90^\circ$ - $0^\circ$ , à un angle d'attaque de  $15^\circ$  et 1,14 mm de profondeur de coupe (tiré de Woodson et Koch).

Enfin, le copeau de type III est formé lorsque les forces induites par l'outil produisent des ruptures par compression et cisaillement longitudinal devant son arête tranchante. Le copeau est sans forme précise et il se brise en petits morceaux (figure 1.5). Les conditions qui favorisent la formation de ce type de copeau sont l'utilisation d'angles d'attaque faibles ou négatifs ainsi que l'emploi d'outils de coupe émoussés.

### 1.2.1.2 La coupe $90^\circ$ - $90^\circ$

Dans ce mode de coupe, l'arête tranchante de l'outil, de même que la direction de coupe sont orientées perpendiculairement au fil du bois. Les copeaux sont alors formés par le cisaillement transverse et par la flexion des fibres produite par le passage de l'outil de coupe. Ce mode de coupe est donc celui qui est le plus exigeant du point de vue énergétique parmi les trois modes décrits ici. Les scies à ruban et circulaire refendueuses travaillent principalement en mode  $90^\circ$ - $90^\circ$ . Pour obtenir une surface de qualité, sans trop endommager les cellules longitudinales, il est nécessaire d'utiliser un angle d'attaque élevé, un angle du couteau faible et un affûtage de qualité (Axelsson 1994). Si ce n'est pas le cas, des fissures pourraient se propager suivant le fil du bois vers l'intérieur de la pièce travaillée (Hoadley 2000).

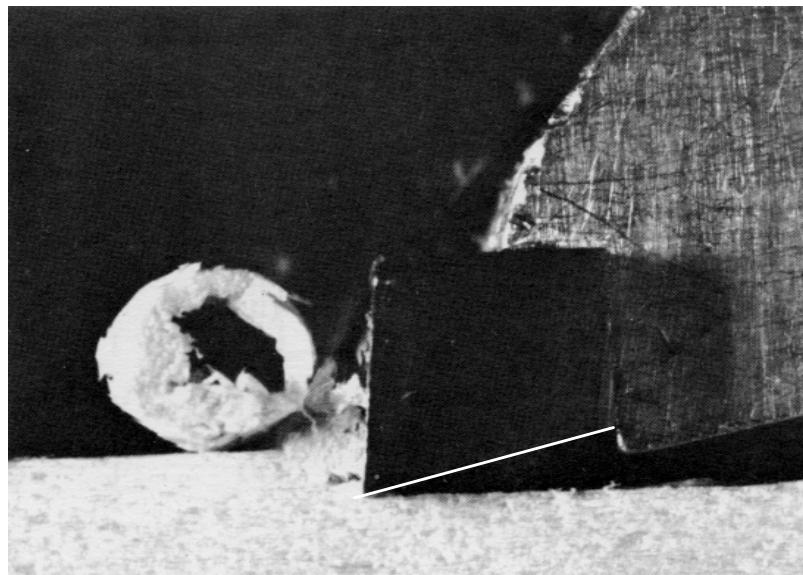


Figure 1.5: Copeau de type III, obtenu en direction  $90^\circ-0^\circ$ , à un angle d'attaque de  $5^\circ$  et 1,14 mm de profondeur de coupe (tiré de Woodson et Koch 1970).

### 1.2.1.3 La coupe $0^\circ-90^\circ$

Ce type de coupe permet d'usiner le bois avec un minimum d'effort. Effectivement, étant donné que la résistance mécanique du bois est plus faible transversalement que longitudinalement, l'énergie nécessaire à la coupe est minimisée (Stewart 1975a; Stewart et Parks 1980).

Deux types de copeaux sont généralement observés pour la coupe  $0^\circ-90^\circ$ , soient le copeau de type A et le copeau de type B (Stewart 1979). Le premier est similaire au copeau de type I de la coupe  $0^\circ-90^\circ$  et il est caractérisé par la propagation de fissures à l'avant de l'outil de coupe. Le type B s'apparente au copeau de type III où il y a compression des fibres à l'avant de l'outil. Afin d'obtenir une surface de qualité, Stewart (1979) propose l'utilisation d'un angle d'attaque élevé combiné à une faible épaisseur de coupe. Néanmoins, des gerces peuvent être créées sur la surface en contact avec la face d'attaque du couteau, comme c'est parfois le cas lors du déroulage. Celles-ci sont provoquées par une contrainte de flexion trop élevée que subit le copeau lors de la coupe. Cette contrainte peut cependant être minimisée grâce à l'emploi d'une barre de pression (figure 1.6). En effet, la barre de pression sert à équilibrer les contraintes dans la zone de coupe, à minimiser la propagation

de fissures à l'avant du couteau et à réduire la formation de fendillements (Stewart 1986). La barre de pression permet aussi d'éliminer les défauts de surface engendrés par l'usinage, tel le fil arraché (Stewart 1986; 1989). Par ce fait, cet outil est utilisé dans plusieurs procédés d'usinage afin d'obtenir des surfaces et des copeaux de bonne qualité.

### **1.2.2 La coupe oblique**

La coupe oblique se distingue de la coupe orthogonale par une inclinaison donnée à l'arête tranchante de l'outil de coupe (figure 1.7). L'introduction d'un angle d'inclinaison ( $i$ ) provoque des changements importants dans la géométrie de la coupe. Une augmentation de l'angle  $i$  entraîne ainsi un accroissement de l'angle d'attaque ( $\alpha$ ), mais une réduction des angles de dépouille ( $\gamma$ ) et de l'outil ( $\beta$ ) (Ozaki et Kimura 1989; Jin et Cai 1996; 1997). Il en résulte que le pouvoir coupant de l'outil est amplifié par le fait que le rayon de courbure de l'arête tranchante diminue lorsque l'angle  $i$  augmente (Jin et Cai 1997).

McKenzie et Franz (1964) ont étudié l'effet de la variation de l'angle  $i$  et de l'angle  $\alpha$  sur la surface rabotée. Les auteurs ont noté que l'utilisation d'un angle  $i$  limitait la propagation de contraintes à l'avant de l'outil de coupe. Ainsi, la profondeur des défauts de surface diminue au fur et à mesure que les angles  $i$  et  $\alpha$  augmentent (McKenzie et Franz 1964; Stewart 1969; Ozaki et Kimura 1989). Cependant, de Moura et Hernández (2007) ont observé que la rugosité de la surface augmente avec l'angle  $i$ , mais qu'elle diminue à mesure que l'angle  $\alpha$  augmente.

Enfin, la force de coupe en jeu lors du rabotage en coupe oblique combiné avec une barre de pression a été mesurée par de Moura et Hernández (2007). Celle-ci augmente avec l'épaisseur de coupe et la diminution des angles  $i$  et  $\alpha$ .

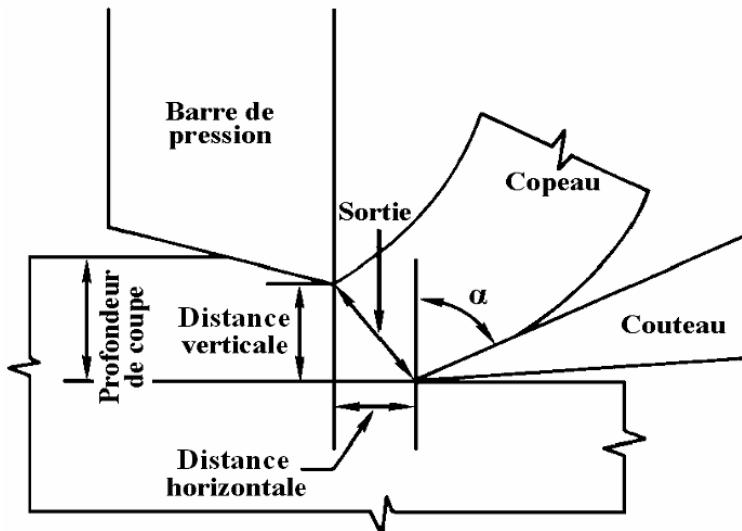


Figure 1.6: Coupe du bois en utilisant une barre de pression et un couteau fixe (selon Stewart 1986).

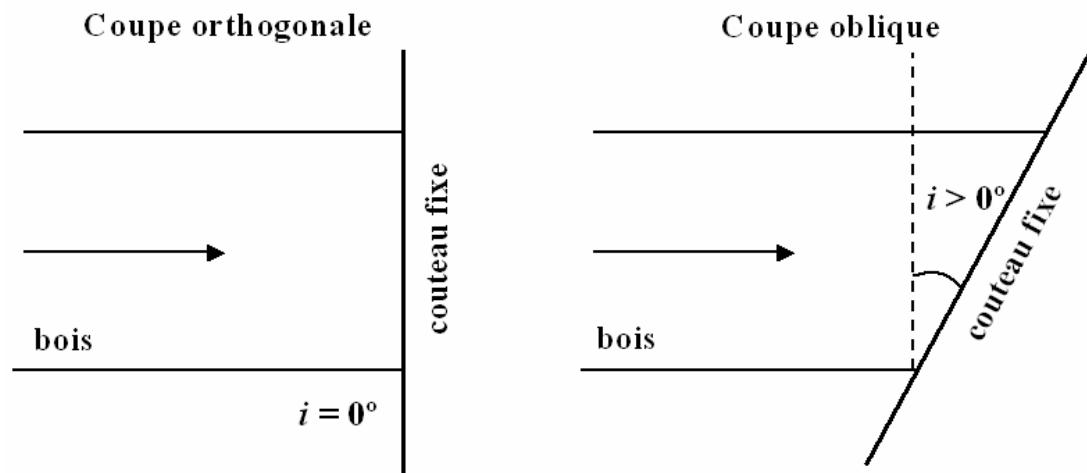


Figure 1.7: Schéma montrant la position de l'arête tranchante du couteau en coupe orthogonale et en coupe oblique.

### 1.2.3 Le rabotage périphérique

Comme il l'a été mentionné plus tôt, la coupe périphérique nécessite un porte-outil d'un certain diamètre où des outils de coupe sont posés dans sa périphérie. Le bois est enlevé d'une pièce de bois sous forme de copeaux individuels au moyen de l'action intermittente des outils. La surface ainsi produite est caractérisée par des marques de couteaux pouvant être visibles à l'œil nu selon que la vitesse d'avance est élevée ou non (Koch 1955).

Le rabotage périphérique peut prendre différentes formes. Premièrement, il peut se faire avec des outils de coupe droits où l'arête tranchante est perpendiculaire à la vitesse d'avance. Deuxièmement, le rabotage peut s'effectuer avec des outils de coupe hélicoïdaux caractérisés par un angle d'hélice ( $\phi$ ). Ces deux modes de rabotage périphérique seront donc abordés dans cette section.

#### 1.2.3.1 La coupe périphérique droite

Le rabotage conventionnel est un procédé de coupe périphérique qui peut être réalisé de deux façons: d'une part, la coupe en avalant et d'autre part la coupe en opposition. La première signifie que l'avance de la pièce de bois et la trajectoire de l'outil de coupe se font dans le même sens. En revanche, la seconde signifie que l'avance de la pièce de bois est opposée à la trajectoire de l'outil de coupe (figure 1.8). Mitchell et Lemaster (2002) ont observé que la qualité de la surface rabotée en direction 90°-0° était meilleure lorsqu'une coupe en avalant était utilisée. Cette affirmation est en opposition avec Koch (1964) qui mentionne que les deux types de coupe procurent une qualité de surface similaire, mais que la coupe en avalant génère une force de coupe plus élevée. Par contre, pour des surfaces rabotées en direction 0°-90°, la coupe en opposition était plus appropriée (Mitchell et Lemaster 2002).

De surcroît, l'alimentation 0°-90° produit une qualité de surface supérieure à celle obtenue par une alimentation 90°-0° (Stewart 1970; 1975a; Stewart et Parks 1980). Les contraintes de rupture requises dans la zone de coupe sont plus faibles en direction 0°-90° car le bois est moins résistant en direction transversale (Stewart 1970; Stewart et Parks 1980). Les traces de couteaux sont également moins visibles et les défauts de surface ne se propagent pas à l'avant de l'outil de coupe. De plus, la qualité de la surface produite en direction 0°-

90° augmente avec l'angle d'attaque et la masse volumique du bois, mais elle est plus sensible à l'usure des outils de coupe (Stewart 1975a).

Plusieurs chercheurs se sont penchés sur l'alimentation 90°-0° étant donné qu'elle est la plus répandue dans l'industrie. La vitesse d'avance est l'un des paramètres les plus importants pour l'obtention d'une bonne qualité de la surface. En effet, cette qualité augmente à mesure que la longueur d'onde d'usinage diminue (Koch 1972). Ceci peut être fait en diminuant la vitesse d'avance, en augmentant le nombre de couteaux rectifiés sur le porte-outil ou la vitesse de rotation de ce dernier (Koch 1972). La diminution de la vitesse d'avance provoque une réduction de la composante normale de la force de coupe (Koch 1972; Carrano et al. 2004).

La profondeur de passe a également un effet sur la qualité de la coupe périphérique: un accroissement de la profondeur de coupe s'accompagne d'une diminution de la qualité de la surface (Davis 1942; Carrano et al. 2004). Cela semble être causé par l'augmentation de la force normale de coupe avec l'épaisseur de coupe (Palmquist 2003; Carrano et al. 2004).

Hernández et Naderi (2001), Hernández et Rojas (2002) et Hernández et de Moura (2002) ont étudié l'effet de la rectification des couteaux sur la qualité du bois raboté. La rectification est une opération de meulage qui est réalisée sur les pointes de couteaux afin que tous aient le même cylindre de coupe et participent ainsi de manière uniforme au travail d'usinage. Un meplat est alors formé sur la face de dépouille des couteaux suite à ce meulage (figure 1.9). Les auteurs ont observé que la qualité de surface varie en fonction de la largeur du meplat des couteaux. L'effet de la rectification est par contre dépendant des espèces de bois ainsi que du niveau d'usure des couteaux utilisés.

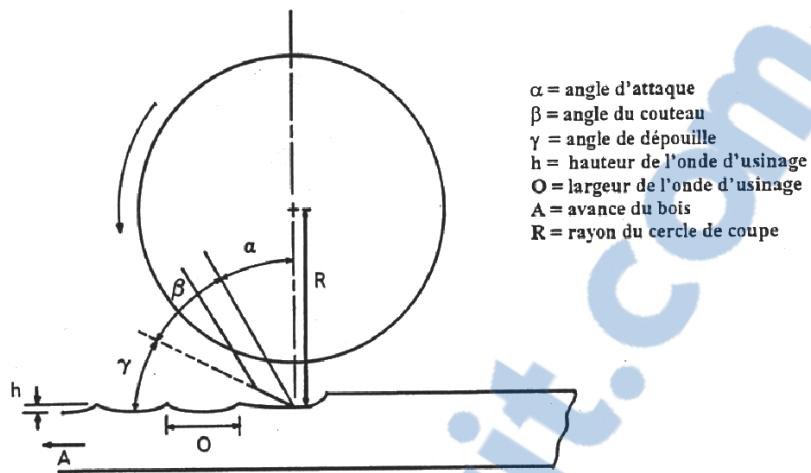


Figure 1.8: Schéma illustrant la coupe périphérique en opposition (adapté de Wengert 1988).

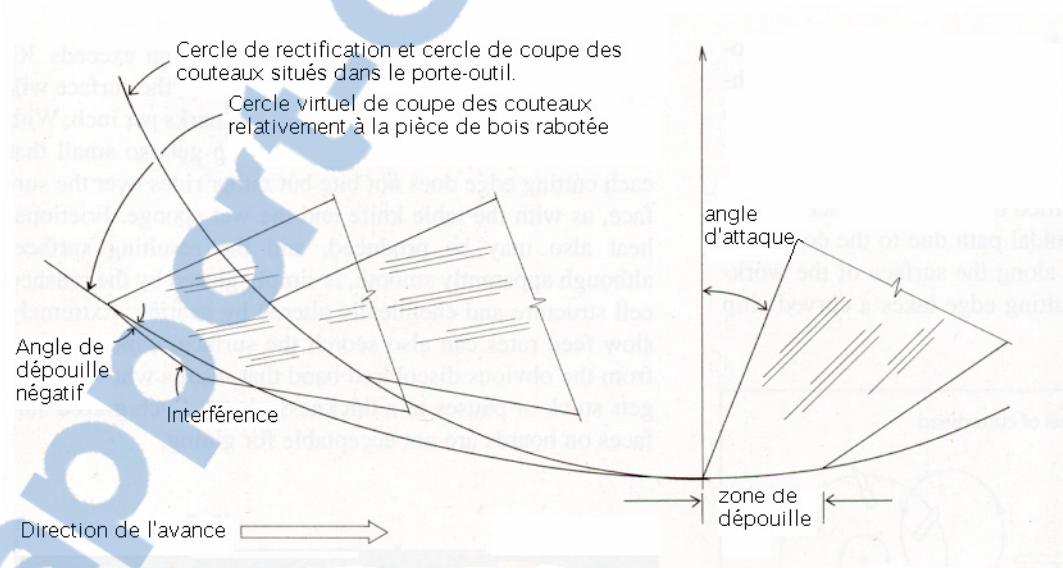


Figure 1.9: Schéma montrant l'effet de la rectification des couteaux sur la géométrie de coupe (adapté de Hoadley 2000).

### 1.2.3.2 La coupe hélicoïdale

La différence entre la coupe périphérique avec des couteaux droits et celle avec des couteaux hélicoïdaux se situe au niveau de la position des outils de coupe sur le porte-outil. En coupe hélicoïdale, les couteaux forment un angle par rapport à l'axe de rotation du porte-outil, soit l'angle d'hélice ( $\phi$ ) (Stewart 1971b; Stewart et Lehmann 1974) (figure 1.10). Les couteaux, fixés de cette façon, forment alors une arête de coupe oblique et continue (Stewart 1971b; Stewart 1975b; Stewart et Hart 1976). La coupe avec couteaux hélicoïdaux se fait donc graduellement ce qui minimise l'impact lors de l'usinage, réduit le niveau de bruit généré et améliore la qualité de la surface (Stewart et Lehmann 1974; Stewart 1975b; Stewart et Hart 1976; Stewart 1978; Stewart 1981; Jones 1994). Pour ce faire, il est cependant important de maintenir la distance axiale entre deux rangées de couteaux ( $L$ ) à une valeur telle qu'un contact constant soit maintenu entre le porte-outil et la surface de la pièce usinée (Stewart et Hart 1976; Stewart 1978) (figure 1.11). Plus spécifiquement, il est nécessaire que la distance ( $L$ ) soit inférieure à la largeur de la pièce usinée ( $W$ ) (Stewart 1975b; Stewart et Hart 1976; Stewart 1978).

Selon Stewart et Lehmann (1974), la qualité de la surface obtenue à l'aide des porte-outils hélicoïdaux est similaire à celle observée par les porte-outils conventionnels lors d'un rabotage en direction 0°-90°. Toutefois, il a été possible d'améliorer la qualité de la surface usinée et de réduire l'occurrence de fil arraché en utilisant une alimentation 45°-45° (Koch 1976). Ce type d'alimentation a plus tard conduit à la coupe 0°-90°, laquelle fournit la meilleure qualité de surface (Stewart 1975b; Koch 1976) et ne crée pas d'endommagement cellulaire (de Moura et Hernández 2006a). Ce type d'alimentation a toutefois l'inconvénient d'être restreint à l'usinage de planches courtes.

En somme, la coupe hélicoïdale présente plusieurs avantages. Elle réduit les défauts de surfaces comme le fil arraché, le fil soulevé et les marques de copeaux tout en permettant d'économiser de l'énergie lors de la coupe (Jones 1994). En contrepartie, la coupe hélicoïdale possède aussi des désavantages. Les porte-outils et les couteaux sont plus coûteux, l'affûtage est complexe et coûteux et le temps d'installation des couteaux est plus long (Jones 1994).

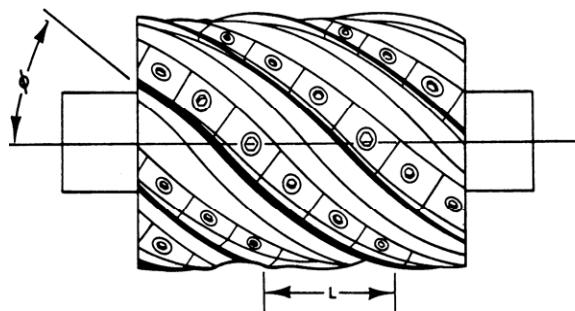


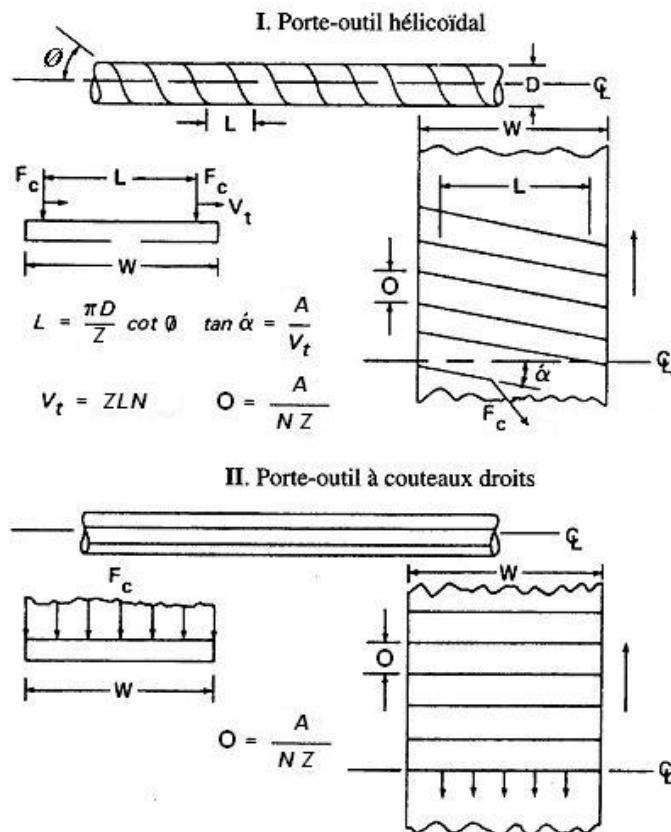
Figure 1.10: Porte-outil hélicoïdal où  $\phi$  est l'angle d'hélice et  $L$  est la distance axiale entre les rangées adjacentes de couteaux (tirée de Stewart 1975b).

#### 1.2.4 La coupe rotative

Peu de travaux sont disponibles sur l'utilisation de ce mode de coupe pour le rabotage du bois. Stewart (1983) a démontré que les forces de coupe augmentent avec l'épaisseur de coupe et la diminution de l'angle d'attaque. De façon générale, la meilleure qualité de surface coïncide avec une faible force de coupe. Stewart (1984) a observé que le rabotage rotatif produit des surfaces possédant un léger arrachement dans la zone où l'outil de coupe sort de la pièce de bois. Toutefois, ces défauts de surface sont plus discrets que ceux produits par un rabotage périphérique conventionnel. Stewart (1985) a aussi remarqué que la formation de ce défaut cesse lorsque l'angle de sortie est supérieur à  $20^\circ$  (figure 1.12). Cela est justifié par le fait que la contrainte de cisaillement diminue lorsque l'angle d'attaque radial diminue.

### 1.3 Le ponçage

Le ponçage est un procédé d'usinage dont les outils de coupe sont des grains abrasifs présents sur le papier sablé. Le ponçage est ainsi une séquence de dommages mécaniques successifs produits par les grains abrasifs. La géométrie de ces derniers génère une composante normale de la force de coupe assez élevée. De ce fait, ce procédé peut se comparer à un rabotage utilisant un angle d'attaque faible ou même négatif (Stewart 1980; Heurtematte et al. 1985; Stewart 1989; Juan 1992). Les forces de ponçage peuvent même dépasser celles observées lors du rabotage périphérique (Stewart 1980; Stewart et Crist 1982; Hall et Heard 1982; Stewart 1989).



$\theta$  = angle d'hélice

$V_t$  = vitesse transversale de l'arête tranchante

$D$  = diamètre du cylindre de coupe

$\alpha$  =倾き des marques de couteau

$Z$  = nombre de rangées de couteaux

$O$  = marque de couteau ou onde d'usinage

$A$  = vitesse d'alimentation ou d'avance

$L$  = distance entre rangées adjacentes de couteaux

$W$  = largeur de coupe

$N$  = vitesse de rotation du porte-outil

$F_c$  = force de coupe concentrée

Figure 1.11: Géométries de la coupe périphérique hélicoïdale et celle à couteaux droits  
(adapté de Stewart 1975b).

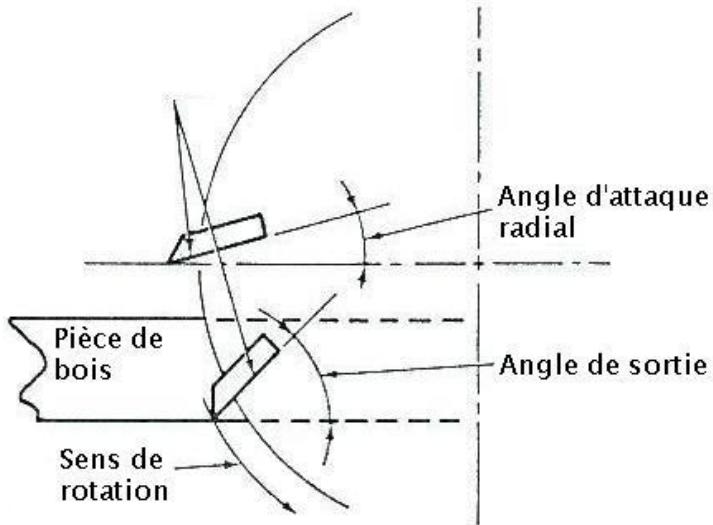


Figure 1.12: Schéma d'une vue de dessus illustrant la coupe périphérique rotative (adapté de Stewart 1985).

### 1.3.1 Les abrasifs

Les papiers sablés sont classés selon la densité du poudrage. La première, nommée structure ouverte signifie que la surface n'est que partiellement recouverte par les grains abrasifs. Au contraire, la deuxième, nommée structure fermée, signifie que toute la surface est couverte par les grains abrasifs (Koch 1964; Hall et Heard 1982; Beaty 1983; Juan 1992; Tichy 1997). Le type ouvert ralenti l'usinage mais augmente la tolérance du papier à l'encrassement de même qu'à sa flexibilité. Ce type de papier est donc généralement utilisé dans les premières étapes du ponçage et exige l'utilisation d'un plus grand nombre d'étapes de ponçage (Koch 1964; Hall et Heard 1982; Beaty 1983; Juan 1992; Tichy 1997). De son côté, le type fermé coupe plus rapidement, mais s'encrasse plus facilement. Ce type de papier produit des rainures plus fines et donc une surface plus lisse (Hall et Heard 1982; Beaty 1983; Tichy 1997).

Le grain abrasif employé dans la fabrication de papiers sablés doit être dur, tranchant, résistant à l'usure et à l'augmentation de température (Beaty 1983; Juan 1992). L'usage des abrasifs naturels est actuellement restreint au ponçage manuel tandis que celui mécanique est effectué à l'aide des abrasifs artificiels (Heurtematte et al. 1985). Les abrasifs artificiels les plus utilisés sont l'oxyde d'aluminium et le carbure de silicium.

Les grains d'oxyde d'aluminium ont des arêtes plus vives, plus dures, plus durables, plus coupantes que le grenat et sont également plus dispendieux. L'oxyde d'aluminium peut être utilisé à hautes pressions de ponçage et à hautes vitesses et il est particulièrement indiqué pour le ponçage de bois durs (Lister 1948; Koch 1964; Hall et Heard 1982; Beaty 1983; Heurtematte et al. 1985). D'ailleurs, certains auteurs considèrent l'oxyde d'aluminium comme étant le meilleur abrasif pour le ponçage du bois (Deniston 1949; Hall et Heard 1982).

Les grains de carbure de silicium sont durs mais cassants. Le carbure de silicium est alors l'abrasif le plus coupant dans le domaine du bois (Koch 1964; Hall et Heard 1982; Beaty 1983; Heurtematte et al. 1985). C'est pourquoi ce grain est normalement utilisé pour la fabrication de papiers sablés grossiers (Hall et Heard 1982). Le carbure de silicium ne supporte pas des pressions élevées, mais excelle pour le ponçage léger (Koch 1964; Beaty 1983; Taylor et al. 1999). Il est également indiqué pour le ponçage fin de revêtements tels que les laques et les vernis (Beaty 1983; Heurtematte et al. 1985).

Comparativement à l'oxyde d'aluminium, le carbure de silicium génère des surfaces plus lisses et de meilleure qualité (Taylor et al. 1999; Saloni et al. 2005; de Moura et Hernández 2006b). Par contre, l'oxyde d'aluminium produit des surfaces de meilleure mouillabilité ce qui serait plus approprié pour l'application de vernis (de Moura et Hernández 2006b). De plus, l'oxyde d'aluminium semble travailler avec des forces de friction plus faibles que celles du carbure de silicium ce qui réduit la consommation énergétique (Saloni et al. 2005).

### **1.3.2 Le procédé de ponçage**

Plusieurs recherches ont été effectuées sur l'optimisation du procédé de ponçage du bois. Ces travaux ont étudié, parmi d'autres facteurs, la grosseur des grains abrasifs (Carrano et al. 2002; Sinn et al. 2004; de Moura et Hernández 2006b; Ratnasingam et Scholz 2006), l'orientation du ponçage par rapport au fil du bois (Taylor et al. 1999; Carrano et al. 2002), l'espèce travaillée (Saloni et al. 2005; Sinn et al. 2004) et la vitesse du ponçage (Carrano et al. 2002; de Moura et Hernández 2006b).

En général, un programme de ponçage débute avec des papiers sablés grossiers suivis par des étapes plus fines (Beaty 1983; Williams et Morris 1998). Les papiers grossiers sont destinés au ponçage plus rapide et profond, tandis que ceux plus fins servent aux travaux de finition (Hall et Heard 1982; Lihra et Ganev 1999). Chaque étape du ponçage a pour objectif de minimiser les irrégularités laissées par l'étape précédente; autrement, elles seront visibles une fois le vernis appliqué (Hall et Heard 1982; Tichy 1997; Williams et Morris 1998; Lihra et Ganev 1999). En effet, plus la taille de l'abrasif est petite, meilleure est la qualité de la surface (Carrano et al. 2002; de Moura et Hernández 2006b; Ratnasingam and Scholz 2006). Sinn et al. (2004) ont même établi une corrélation linéaire positive entre la taille des grains et la rugosité de la surface.

Carrano et al. (2002) de même que Taylor et al. (1999) ont observé que le ponçage effectué parallèlement aux fibres permet d'obtenir des surfaces plus lisses que celles poncées perpendiculairement aux fibres.

Par ailleurs, la masse volumique de l'espèce de bois poncée affecte le taux d'enlèvement de la matière (Saloni et al. 2005; Sinn et al. 2004). Les bois durs, qui possèdent une masse volumique élevée, opposent une plus grande résistance au ponçage ce qui génère des surfaces de faible rugosité.

De plus, la vitesse de rotation de la courroie d'une ponceuse à rouleau a un effet significatif sur la qualité de la surface (Carrano et al. 2002; Saloni et al. 2005). Carrano et al. (2005) ont observé qu'une augmentation de la vitesse de rotation de la courroie s'accompagne d'une diminution de la qualité de la surface. Toutefois, Saloni et al. (2005) ont observé l'effet contraire. La vitesse d'avance a aussi un effet significatif sur la qualité de la surface poncée (Carrano et al. 2002; de Moura et Hernández 2006b). En effet, des vitesses d'avance élevées engendrent des surfaces plus rugueuses. Cela est dû au fait que le nombre de traces d'abrasif diminue (Carrano et al. 2002), ce qui génère ainsi une plus grande fibrillation à la surface (de Moura et Hernández 2006b).

## 1.4 La qualité de surface du bois

La qualité de surface du bois peut être jugée à partir d'une analyse visuelle des défauts provoqués par l'usinage. Ainsi, plusieurs auteurs se sont servis de la proportion de pièces de bois exemptes de défauts d'usinage dans le but d'estimer la qualité des surfaces obtenues par plusieurs procédés sous diverses conditions (Franz 1958; Koch 1964; Cantin 1967; Stewart 1971a; Stewart 1979; Stewart 1980; Feist 1983; Stewart 1986; ASTM D 1666 1987; Juan 1992; Jones 1994; Williams et Morris 1998; Lihra et Ganev 1999; Hoadley 2000; Hernández et al. 2001).

Stumbo (1963) recommande que la rugosité soit considérée lors de l'évaluation de la qualité d'une surface de bois. La rugosité est souvent le paramètre principal d'évaluation de la qualité de surface dans les travaux sur le ponçage du bois (Lemaster et Beall 1996; Taylor et al. 1999 ; de Moura et Hernández 2005, 2006b, 2006c). Plusieurs auteurs ont également utilisé la rugosité pour estimer la qualité de surfaces rabotées (Stewart 1986 ; Triboulot et al. 1995 ; Hernández et de Moura 2002 ; de Moura et Hernández 2005, 2006a, 2006c, 2007).

Le niveau de l'endommagement cellulaire produit par l'usinage est également un facteur couramment relié à la qualité de sa surface (Jokerst et Stewart 1976; Stewart et Crist 1982; Murmanis et al. 1983; Caster et al. 1985; Murmanis et al. 1986; Stewart 1989; Hernández 1994; Stehr et Johansson 2000; Hernández et Naderi 2001; Hernández et Rojas 2002; Hernández et de Moura 2002; de Moura et Hernández 2005, 2006a, 2006b, 2006c, 2007). L'effet du niveau d'endommagement cellulaire sur l'adhésion de revêtements n'est toutefois pas bien documenté dans la littérature.

D'autre part, plusieurs auteurs suggèrent l'analyse de la mouillabilité pour contrôler la qualité de surface destinée à être collée ou vernie (Garrett 1964; Lewis et Forrestal 1969; Collett 1972; Elbez et Bentz 1991). La qualité de préparation de la surface du bois pour le vernissage est souvent évaluée par biais de la résistance à l'arrachement du film de vernis ou de l'observation des défauts survenant à la surface du vernis suite à un vieillissement naturel ou accéléré (Arnold et al. 1992; Williams et Feist 1994; Richter et al. 1995; Suleman et Rashid 1999).

## 1.4.1 Les défauts de surface

### 1.4.1.1 Le fil arraché

Le fil arraché est en général associé à l'usinage contre le fil. Il se produit lorsque le fendillement des copeaux suit le fil au devant de l'outil de coupe et en dessous du plan de coupe. Ce faisant, des particules du bois sont rompues et enlevées en dessous du plan de coupe (Franz 1958; Stewart 1980) (Figure 1.13). Le fil arraché survient couramment près des nœuds, où sa profondeur est plus prononcée à cause de la déviation du fil (Franz 1958; Hernández et al. 2001).

Des angles d'attaque élevés, de grandes épaisseurs de coupe et l'usinage de bois trop sec ou humide augmentent l'incidence du fil arraché (Koch 1964; Stewart 1971a; Stewart 1980; Stewart 1986; Hernández et al. 2001).

### 1.4.1.2 Le fil laineux ou fil pelucheux

Le fil pelucheux survient lorsque des fibres ou des groupes de fibres sont partiellement coupées lors de l'usinage (Franz 1958; Stewart 1980) (Figure 1.14). Ce type de défaut devient plus visible suite à un gonflement des cellules écrasées par l'action de l'humidité (Panshin et de Zeeuw 1980).

Le fil pelucheux est plus couramment observé chez les feuillus, principalement en présence du bois de tension (Franz 1958; Stewart 1980; Hoadley 2000). Dans ce cas, la fonction de ce défaut est reliée à la présence d'une couche gélatineuse, qui se décolle facilement du reste de la paroi cellulaire lors de l'usinage. 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). Le fil pelucheux lors du ponçage (Stewart 1980; Juan 1992; Williams et Morris 1998). D'autre part, Hernández et al. (2001) ont noté que l'incidence du fil laineux diminue à mesure que celle du fil arraché augmente lors du rabotage périphérique 90°-0°.

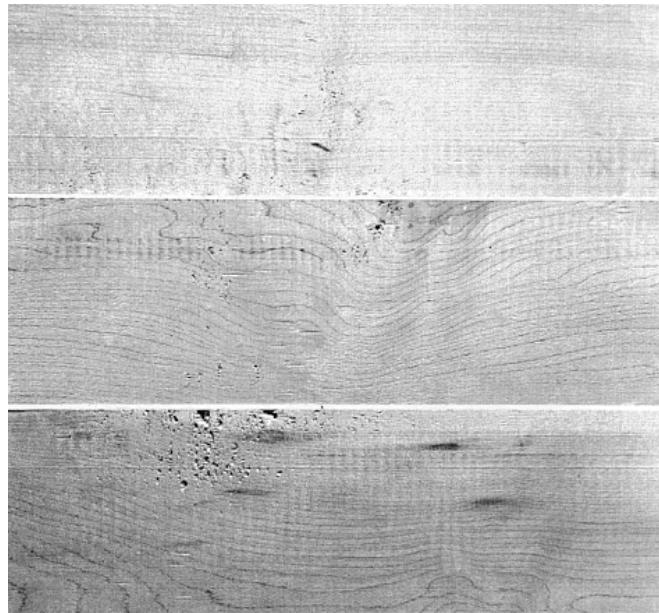


Figure 1.13: Divers niveaux de fil arraché à la surface de l'érable à sucre (tirée de ASTM D-1666 1987).

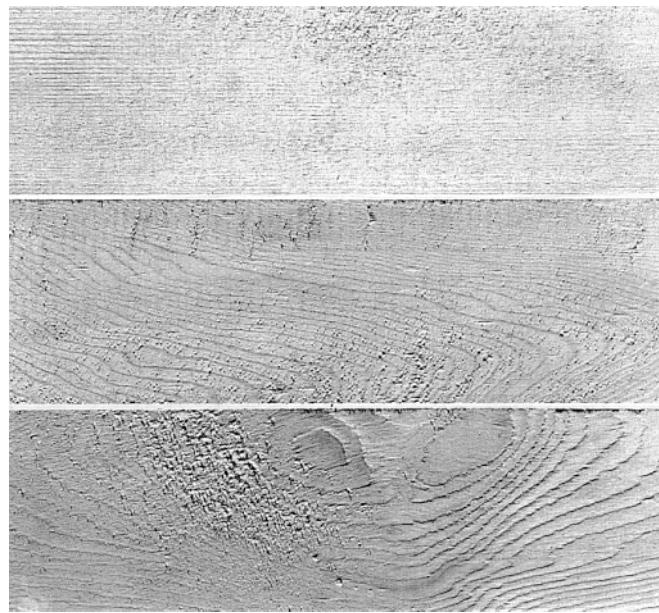


Figure 1.14: Divers niveaux de fil laineux ou fil pelucheux à la surface du sapin Engelmann (tiré de ASTM D-1666 1987).

#### 1.4.1.3 Les marques de copeaux

Les marques de copeaux sont des enfoncements produits par des copeaux enlevés, qui repris par les couteaux, repassent à travers la région de coupe en comprimant la surface déjà coupée (Figure 1.15). Les fibres sous les marques ainsi produites gonflent lorsqu'elles absorbent de l'humidité reprenant ainsi leur forme originale. Ce type de défaut est souvent causé par un système d'aspiration déficient ou par l'électrostatique (Koch 1964; Stewart 1980; Hoadley 2000). Les bois ayant des résines ou des gommes sont aussi plus enclins à le produire.

#### 1.4.1.4 L'écrasement cellulaire

L'écrasement cellulaire résulte de l'application de forces normales élevées sur la surface du bois (Jokerst et Stewart 1976; Stewart et Crist 1982; Stewart 1986; Stewart 1989; Hernández et Naderi 2001; Hernández et Rojas 2002; Hernández et de Moura 2002). La magnitude de ces forces devient importante lorsqu'elle dépasse la contrainte de rupture en compression des tissus ligneux (River et Miniutti 1975). Les forces normales sont plus élevées lors du ponçage, ce qui entraîne un écrasement plus prononcé dans les surfaces poncées que dans celles rabotées par coupe périphérique (Jokerst et Stewart 1976; Stewart et Crist 1982; Caster et al. 1985).

Lors du rabotage par coupe périphérique, l'écrasement peut se présenter sous forme d'une couche uniformément distribuée sous la surface pour les cas de bois à pores diffus ou à structure homogène (Hernández et Naderi 2001; Hernández et Rojas 2002). Cet écrasement peut se limiter à des régions de cellules plus tendres comme c'est le cas des bois de conifères et de bois de feuillus à porosité diffuse (Hernández et Naderi 2001; Hernández et de Moura 2002; Carrano et al. 2004). Le dommage des surfaces rabotées se manifeste souvent sous forme d'un écrasement des vaisseaux et d'une déviation des rayons ligneux (River et Miniutti 1975; de Moura et Hernández 2006c; Carrano et al. 2004).

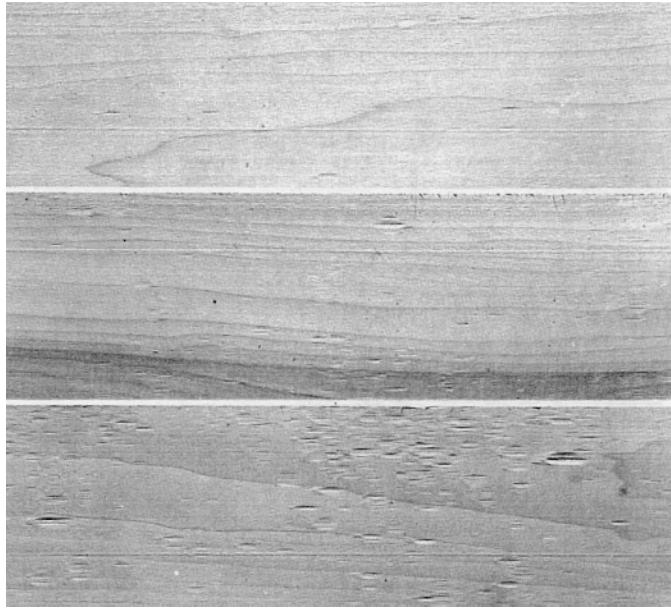


Figure 1.15: Marques de copeaux à la surface du bouleau jaune (tirée de ASTM D-1666 1987).

### 1.4.2 La rugosité de surface

La topographie d'une surface indique le niveau de rugosité et d'ondulation, ainsi que la forme et la distribution des aspérités de celle-ci. Le profil primaire d'une surface est composé de données de rugosité et d'ondulation. Le profil de rugosité contient les variations topographiques à faible longueur d'onde, tandis que celui d'ondulation comporte les irrégularités dont la longueur d'onde est plus importante. La délimitation entre les profils de rugosité et d'ondulation va dépendre des conditions de mesure et de filtrage employées lors de l'évaluation topographique (Mummery 1992).

#### 1.4.2.1 Les appareils de mesure

La topographie des surfaces de bois est principalement mesurée à l'aide de rugosimètres à palpeur. Toutefois, Triboulot (1984) fait appel à la prudence quant à l'utilisation de ces appareils pour quantifier la qualité de surface du bois. En effet, lorsque le diamètre de la pointe est trop élevé, le palpeur ne suivra pas tout le profil de la surface et les creux du profil pourraient ne pas être détectés (Usenius 1975). S'il est trop petit, le palpeur pourra entrer dans les cavités cellulaires (les vaisseaux par exemple) et donner un profil dû à la

structure du bois. La pression appliquée par la pointe sur la surface est également un paramètre important (Usenius 1975). L'effet de cette pression va varier en fonction du diamètre de la pointe ainsi que de l'espèce de bois étudiée (bois tendre ou dur). Si elle est trop grande, elle peut même provoquer des rayures et donc, donner une mauvaise estimation de la rugosité. Mothe (1987) a effectué plusieurs passages successifs avec un rugosimètre à palpeur sur une même surface de bois. L'auteur a constaté que cet appareil avait 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, dont la masse volumique est élevée, l'erreur est moins importante. Toutefois, le rugosimètre à palpeur devrait permettre de faire une distinction comparative entre différents procédés d'usinage. Les résultats coïncident souvent avec ceux obtenus par une analyse visio-tactile (Mothe 1987; Kiliç et al. 2006). Gurau et al. (2005a) ont observé que les mesures de rugosité effectuées avec un rugosimètre au palpeur étaient plus répétitives que celles déterminées par la triangulation laser.

Par contre, la triangulation laser possède une vitesse d'analyse élevée et permet de détecter des défauts profonds (Lundberg et Porankiewicz 1995). Cette méthode pourrait alors facilement être insérée dans une ligne de production (Lundberg et Porankiewicz 1995; Gurau et al. 2005a). La triangulation laser permet aussi de détecter des sommets sur la surface que le rugosimètre au palpeur pourrait écraser (Gurau et al 2005a). Le principal désavantage de ce type d'appareil réside dans le fait que les mesures de rugosité peuvent être affectées par la couleur du bois (Sandak et Tanaka 2003).

Les appareils optiques permettent de palier à ce problème. En effet, ces appareils fonctionnent de façon similaire au rugosimètre au palpeur en établissant le profil de rugosité en fonction de la variation de la hauteur de la surface et non de l'intensité lumineuse (Lemaster et Taylor 1999). N'étant pas affecté par la couleur du bois, ces auteurs pensent que ces appareils sont de bons candidats pour mesurer la rugosité de la surface en continu. Toutefois, Lundberg et Porankiewicz (1995) ont observé que leur vitesse d'analyse est lente et qu'ils ont tendance à sous-estimer la rugosité de la surface.

Finalement, Hu et Afzal (2005) ont utilisé un scanner afin de mesurer la rugosité de surfaces de bois. Le traitement des données sur l'image permettait d'établir une valeur représentative de rugosité.

#### **1.4.2.2 Les filtres**

La surface de référence, déterminée par la méthode de filtration, étant la base de l'analyse quantitative de la rugosité et le calcul des paramètres, il devient évident que le choix du type de filtre est important (Brinkmann 2000). Plusieurs types de filtres existent. Cependant, ceux-ci ont été développés pour l'analyse de surface des métaux, c'est-à-dire des surfaces plus lisses et uniformes que celles du bois. Ainsi, rendre le filtre Gaussien (ISO 11562 1996) plus robuste, permettrait d'analyser des surfaces complexes ou non sans engendrer de distorsions de la réalité (Brinkmann 2000). Gurau et al. (2005b; 2005c) ont comparé les filtres des normes ISO 11562 (1996), ISO 13565-1 (1996) et ISO 16610-31 (2002). D'une part, les normes ISO 11562 (1996) et ISO 13565-1 (1996) engendrent la création de fausses amplitudes. La norme ISO 16610-31 (2002), basée sur les travaux de Brinkmann (2000), produit d'autre part un profil primaire plus réaliste. Fujiwara (2004) a aussi observé que le profil proposé par Brinkmann (2000) permet de générer un profil primaire réel pour les surfaces de bois.

Aussi, il est important de sélectionner une longueur de base adéquate. Cette dernière permet de séparer le profil d'ondulation de celui de rugosité. Fujiwara (2004) et Gurau et al. (2006) ont déterminé que dans le cas des surfaces de bois, une longueur de base de 2,5 mm est la plus appropriée pour ne pas créer de fausses amplitudes.

#### **1.4.2.3 Le profil de rugosité**

Nepveu et Tran Ngoc (1984) ont observé que la qualité de la surface est fonction du procédé d'usinage et des propriétés intrinsèques du bois. Les auteurs suggèrent donc de séparer les deux profils de rugosités afin d'être en mesure d'apprécier l'effet réel des procédés d'usinage. Triboulot (1984), Ohtani et al. (2004) et Gurau et al. (2005b; 2005c) suggèrent aussi de séparer les deux profils afin de pouvoir mesurer quantitativement l'effet des paramètres de coupe sur le produit fini. Plus précisément, lorsque la rugosité du

procédé est inférieure à la rugosité de l'anatomie, le processus de filtrage déforme la réalité si les deux profils ne sont pas séparés (Ohtani et al. 2004; Gurau et al. 2005b; 2005c). Toutefois, Gurau et al. (2006) sont conscients que la rugosité totale est un indicateur important pour les étapes subséquentes de transformation telles que l'application de produits de finition.

#### **1.4.2.4 Les paramètres de mesure**

La rugosité moyenne ( $R_a$ ) est probablement le paramètre le plus utilisé lors des études sur la topographie de surface. Ce paramètre correspond à la moyenne arithmétique des déviations du profil par rapport à une ligne moyenne (Tableau 1.1). Pour augmenter la sensibilité aux valeurs extrêmes du profil, i.e. sommets et creux, l'écart moyen quadratique ( $R_q$ ) peut également être calculé. Ce paramètre est la racine carrée de la moyenne des carrés des déviations par rapport à la ligne moyenne (Tableau 1.1). La hauteur moyenne du profil ( $R_z$ ) peut aussi être déterminée. Il s'agit de la moyenne arithmétique des valeurs individuelles  $R_{zi}$  sur l'ensemble des longueurs de base considérées (Tableau 1.1). Mothe (1987) suggère l'utilisation des paramètres  $R_a$  et  $R_z$  qui tiennent compte de l'ensemble du profil et permettent de faire la comparaison entre différents traitements. Kiliç et al. (2006) signalent que les paramètres  $R_a$  et  $R_z$  seraient les plus appropriés pour décrire la qualité de surface du bois. Lemaster et Taylor (1999) utilise eux aussi le paramètre  $R_a$  conjointement avec le coefficient d'asymétrie  $R_{sk}$  (Tableau 1.1).

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. 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 (ISO 4287 1998; Mummery 1992). 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 au sommet du relief de rugosité, tandis qu'une valeur positive révèle la prédominance de matériau à la base du profil. 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

Tableau 1.1: Définitions des principaux paramètres de mesures de rugosité de surface (tiré de ISO 4287 1998).

Paramètre de mesure	Définition
$R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n  y_i $	Écart moyen arithmétique du profil
$R_q = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2}$	Écart moyen quadratique du profil
$R_z =  \max z_s  +  \max z_c $	Hauteur maximale du profil
$R_{sk} = \frac{1}{R_q^3 n} \sum_{i=0}^n y_i^3$	Coefficient d'asymétrie
$R_{ku} = \frac{1}{R_q^4 n} \sum_{i=0}^n y_i^4$	Coefficient d'aplatissement

supérieure à 3 indique la présence d'aspérités grandes, larges et moins nombreuses (Mummery 1992).

#### 1.4.2.5 L'effet de l'usinage

Plusieurs facteurs peuvent influencer la rugosité de la surface, soient la géométrie des outils de coupe, leur usure, la vitesse d'avance et l'orientation des fibres (Triboulot 1984; Lemaster et Taylor 1999). Selon Cyra et al. (1996), l'émission acoustique augmente avec la vitesse d'avance et avec l'angle du fil pour atteindre un maximum lorsque l'usinage se fait contre le fil. La rugosité suit le même comportement (Cyra et al. 1996; Lavery et al. 1995; Carrano et al. 2002; Carrano et al. 2004; de Moura et Hernández 2006a; 2006b; 2006c; 2007). Puisque l'émission acoustique est fortement corrélée avec l'orientation des fibres et

la vitesse d'avance, il serait possible de contrôler la rugosité de la surface. Iskra et Tanaka (2005) ont observé le même comportement. Toutefois, ces derniers ont noté qu'une augmentation de la largeur de coupe engendre une augmentation de l'intensité sonore, mais sans que la rugosité de la surface ne change pour autant.

Le procédé d'usinage utilisé a un impact important sur la rugosité de la surface du bois. Par exemple, plusieurs auteurs ont comparé le comportement de surfaces poncées et rabotées. Contrairement à Kiliç et al. (2006), de Moura et Hernández (2005; 2006c) ont observé que les surfaces poncées sont plus rugueuses que celles ayant été rabotées. Burdulu et al. (2005) n'ont cependant observé aucune différence significative entre la rugosité de surface des échantillons rabotés et poncés. Cette apparente discordance pourrait être expliquée par les conditions spécifiques de chacune des études.

#### **1.4.3 La mouillabilité de surface**

Le mouillage est l'un des phénomènes reliés à l'adhésion qui soit le plus étudié. Il conditionne la pénétration et la dispersion d'un liquide en contact avec une surface solide (Collett 1972; Kazayawoko et al. 1997; Nussbaum 1999; Shi et Gardner 2001). Selon Lewis et Forrestal (1969), le mécanisme d'adhésion débute par le mouillage et est suivi par le durcissement de l'adhésif.

Une bonne mouillabilité permet d'établir un maximum de liaisons à l'interface entre le revêtement et le bois. Cela garantit une adhésion optimale (Parker et Taylor 1966; Collett 1972; Couvrat 1990; Elbez et Bentz 1991). Wulf et al. (1997) affirment qu'une bonne mouillabilité du substrat est nécessaire pour obtenir un revêtement de haute qualité et ce, indépendamment du type de produit appliqué. Dans le cas où un produit de finition devient solide sans avoir complètement mouillé la surface, un réseau de bulles d'air se forme entre le film et le substrat formant une zone de faiblesse (Huntsberger 1963; Garrett 1964; Gray 1964; Dight 1966; Lewis et Forrestal 1969; Wulf et al. 1997). Ainsi, lorsqu'une tension est appliquée sur le film, la rupture se propage d'une bulle à l'autre (Dight 1966; Lewis et Forrestal 1969; Stehr et Johansson 2000).

L'étude isolée de la mouillabilité ne peut pas fournir de corrélations directes avec la performance d'un adhésif car d'autres exigences sont nécessaires pour une bonne adhésion (Lewis et Forrestal 1969). La mouillabilité s'avère toutefois un critère important pour l'évaluation des propriétés d'adhésion du bois (Zhang et al. 1997; Šernek et al. 2004). Plusieurs auteurs ont ainsi rapporté des corrélations positives entre l'adhésion et la mouillabilité de surfaces de bois (Collett 1972; Elbez et Bentz 1991; Šernek et al. 2004; de Moura et Hernández 2005; 2006c).

#### **1.4.3.1 La mesure de la mouillabilité**

La mouillabilité peut être exprimée au moyen de l'angle de contact formé entre la surface horizontale du substrat et la surface d'une goutte d'un liquide donné (Figure 1.16). Ainsi, un angle de contact faible indique une bonne mouillabilité de la surface (Garrett 1964; Parker et Taylor 1966; Collett 1972; Kalnins et Feist 1993). En revanche, des angles élevés sont propres aux bois hydrophobes (Boehme et Hora 1996). Kazayawoko et al. (1997) ont utilisé la méthode ADSA-CD *Axisymmetric Drop Shape Analysis – Contact Diameter* afin de déterminer l'angle de contact. Cette méthode est très fiable et permet de déterminer des valeurs moyennes d'angle de contact lorsque la forme de la goutte correspond à une ellipse. C'est souvent le cas du bois étant donné sa nature anisotrope.

Selon Boehme et Hora (1996), l'évaluation d'un angle de contact isolé, par exemple l'angle de contact initial, ne fournit aucune conclusion sur la pénétration d'un liquide. Toutefois, l'angle de contact peut servir à indiquer la tendance d'un fluide à pénétrer une surface poreuse (Parker et Taylor 1966; Liptáková et Kúdela 1994; Boehme et Hora 1996; Maldas et Kamdem 1999; Shi et Gardner 2001; de Meijer et al. 2001). Plus précisément, la diminution de l'angle de contact en fonction du temps de mouillage indique la rapidité avec laquelle le bois absorbe un liquide (Maldas et Kamdem 1999; Shi et Gardner 2001; Šernek et al. 2004). Selon ce principe, Shi et Gardner (2001) proposent la « valeur  $K$  » pour quantifier l'aptitude du liquide à s'étaler et à pénétrer sur la structure poreuse du bois. Ce paramètre est calculé d'après l'expression suivante:

$$\theta = \frac{\theta_i \cdot \theta_e}{\theta_i + (\theta_e - \theta_i) \cdot \exp \left[ K \cdot \left( \frac{\theta_e}{\theta_e - \theta_i} \right) \cdot t \right]} \quad (1)$$

où  $\theta_i$  est l'angle de contact initial et  $\theta_e$  représente l'angle à une condition d'équilibre de la goutte. Des valeurs K élevées indiquent donc une pénétration et une dispersion du liquide plus rapides sur la surface du bois (Shi et Gardner 2001). Šernek et al. (2004) ont plutôt travaillé avec le taux  $\frac{d\theta}{dt}$  pour caractériser ce même phénomène.

#### 1.4.3.2 L'effet de la rugosité sur la mouillabilité

La rugosité joue un rôle important sur les propriétés de mouillage d'un bois (Wenzel 1936; Triboulot 1984; Maldas et Kamdem 1999). L'augmentation de la rugosité semble accélérer la dispersion du liquide sur la surface (Wenzel 1936; Parker et Taylor 1966; Lewis et Forrestal 1969). Étant donné que la surface est largement influencée par le procédé d'usinage, Wei et al. (2006) ont étudié l'effet du ponçage et du rabotage sur la mouillabilité. Contrairement aux surfaces rabotées, les auteurs ont observé que les surfaces poncées ont induit une absorption plus constante du liquide. Toutefois, même si l'angle de contact initial des surfaces rabotées fut plus élevé, le taux de mouillage fut plus élevé. L'endommagement cellulaire et l'obstruction des cellules du bois poncées seraient responsables de cet effet.

## 1.5 L'adhésion à une surface

ASTM D 907 (1997) définit l'adhésion comme étant la condition selon laquelle deux surfaces sont maintenues ensemble par des forces agissant à l'interface. Ces dernières peuvent être dues à l'établissement de liens chimiques covalents au travers de l'interface ou à une adhésion mécanique. Ainsi, la performance ou la durabilité d'un revêtement de finition est couramment reliée à l'adhésion de son film (Dight 1966).

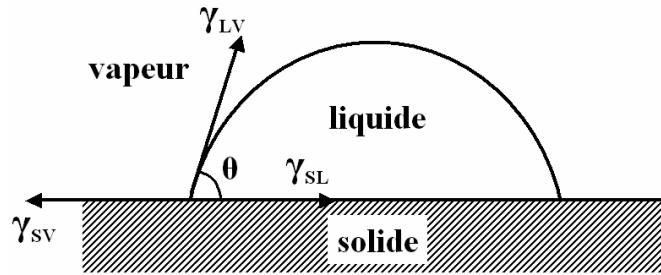


Figure 1.16: Goutte d'un liquide en équilibre (adaptée de Rozumek et Elbez 1985).

D'après la théorie, l'adhésion mécanique résulte de la pénétration et du durcissement de l'adhésif dans les aspérités d'une surface. Effectivement, selon Boehme et Hora (1996), la qualité de l'adhésion dépend de la liaison mécanique entre l'adhésif et les particules du bois. La rugosité et la porosité sont donc des facteurs favorables à l'adhésion (Couvrat 1990). Par contre, pour certains auteurs l'action mécanique contribue à l'adhésion, mais son effet est secondaire (Lewis et Forrestal 1969).

### 1.5.1 L'effet de la pénétration

Une bonne pénétration du revêtement, caractérisée par une surface effective de contact plus élevée entre le revêtement et les parois cellulaires, confère un meilleur ancrage mécanique et donc une meilleure adhésion (Parker et Taylor 1966; Lewis et Forrestal 1969; Liptáková et Kúdela 1994; de Meijer et al. 1998; Burdulu et al. 2006). La pénétration des revêtements dans le bois sera donc reliée à l'état des surfaces. Elle sera ainsi favorisée si les cellules à la surface sont ouvertes (Middleton 1996). L'écrasement cellulaire, souvent associé au ponçage, limite la pénétration des revêtements dans la surface (de Meijer et al. 1998).

### 1.5.2 L'effet de la rugosité

La rugosité du substrat affecte la surface disponible pour l'adhésion (Wenzel 1936; Parker et Taylor 1966; Hernández et de Moura 2002; de Moura et Hernández 2005; de Moura et Hernández 2006c). Quelques auteurs mentionnent que le fait d'augmenter la rugosité de surface va avoir comme effet d'améliorer l'adhésion (Parker et Taylor 1966; Collett 1972; Triboulot 1995; Hernández et de Moura 2002). Toutefois, une rugosité excessive peut nuire

à l'adhésion car le revêtement ne parvient pas à couvrir toute la surface (Couvrat 1990). De son côté, Collett (1972) affirme que la rugosité et la contamination du bois sont les principaux facteurs qui limitent les interactions d'adhésion.

### 1.5.3 L'effet de l'usinage

Le procédé d'usinage utilisé a un impact sur l'adhésion des surfaces. Pour le collage, Burdulu et al. (2006) ont conclu que les surfaces poncées génèrent une résistance à l'adhésion plus élevée que les surfaces rabotées. Pour le vernissage, de Moura et Hernández (2005) ont observé que les surfaces poncées produisent une adhésion plus élevée que les surfaces rabotées en coupe périphérique 90°-0°. Ces dernières présentent une pénétration plus profonde, mais une fibrillation moindre. Par contre, la coupe oblique et celle hélicoïdale en direction 0°-90° peuvent générer des surfaces ayant une adhésion similaire à celle obtenue par ponçage (de Moura et Hernández 2006c).

## 1.6 L'inactivation des surfaces du bois

Les surfaces du bois vieillissent suite à l'exposition aux agents naturels du milieu ambiant. Ce vieillissement s'accompagne d'une diminution de l'aptitude des surfaces du bois à être collées ou vernies. Ce phénomène a été décrit largement dans la littérature et est désigné comme celui de l'inactivation des surfaces.

L'inactivation d'une surface de bois provoque une diminution de sa mouillabilité (Vick 1999). Ce phénomène peut être amplifié suite à l'exposition du bois à hautes températures ainsi qu'en augmentant le temps d'exposition (Christiansen 1990). Selon Christiansen (1990), l'inactivation de la surface de certains conifères provenant de zones tempérées débute à une température de 160°C. Toutefois, cette inactivation est un phénomène de surface et peut être éliminée par l'usinage de la couche de cellules inactives (Vick 1999). L'inactivation de la surface peut être expliquée grâce à trois mécanismes physiques, soit la migration des extraits du bois à la surface, la réorientation des cellules du bois et la fermeture irréversible de micropores dans les parois cellulaires (Christiansen 1990; Vick 1999). De plus, des contaminants chimiques peuvent causer l'oxydation de la surface et ainsi altérer la mouillabilité du bois (Vick 1999).

Vick (1999) rapporte que les extraits du bois sont les principaux responsables de l'inactivation de la surface. Cependant, Nussbaum (1999) ne semble pas avoir observé de lien entre les extraits du bois et le phénomène d'inactivation. Selon Christiansen (1990), les acides gras sont responsables de l'inactivation de la surface. En effet, lors du séchage, les acides gras les moins volatils se déposent sur la surface du bois tandis que les acides gras plus volatils sont considérés comme des composés organiques volatils (COV). Les températures élevées impliquées lors du séchage augmentent la mobilité des molécules d'acides gras, ce qui leur permet de s'étaler sur la surface de bois et ainsi créer une forte adhésion avec la cellulose. Les molécules d'acide gras subiraient ensuite une réorientation polaire ce qui rend la surface hydrophobe. Convertir les acides gras en sels pourrait permettre de retarder le procédé d'inactivation.

D'autre part, la réorientation de cellules, fréquemment observée pour des produits synthétiques, pourraient aussi être associée aux surfaces de bois. Les molécules se réorientent ainsi pour présenter une surface hydrophobe caractérisée par une faible énergie de surface. Ce mécanisme physique pourrait être associé au vieillissement naturel associé au fait que la mouillabilité de la surface diminue avec le temps d'entreposage.

Enfin, l'inactivation du bois pourrait être expliquée par le comportement de la cellulose dont les propriétés de sorption et de diffusion changent irrévocablement après séchage. Les zones amorphes de la cellulose se cristallisent à haute température. Cette nouvelle structure, dont les pores sont plus fermés, possède une mouillabilité plus faible (Christiansen 1990).

Back (1991) décrit même que l'inactivation des surfaces de bois est un phénomène naturel d'auto-contamination selon lequel les extraits migrent vers la surface du bois. Ce type d'inactivation de surface dépend du temps d'entreposage et il n'est pas fonction de la température. Selon Aydin et Colakoglu (2005), l'inactivation de la surface augmente avec le temps et pourrait être mesurée à l'aide des changements de couleur que subit le bois.

Sernek et al. (2004) ont observé que l'inactivation des surfaces de bois, mesurée par l'angle de contact, était directement reliée à l'adhésion. En effet, l'inactivation caractérisée par des angles de contact élevés diminue l'adhésion.

L'oxydation de la surface de bois fraîchement usinée prend place lorsqu'elle est exposée à l'oxygène contenu dans l'atmosphère. Pour le bois de hêtre et d'épinette de Norvège, une diminution du caractère polaire de la surface a été observée par spectroscopie à rayons-X (Gindl et al. 2004). L'augmentation simultanée de la proportion de carbone avec la diminution de celle en oxygène rend la surface du bois plus hydrophobe. Il est toutefois difficile de séparer ce phénomène de celui de la migration des extraits à la surface, lesquels peuvent aussi réduire l'hygroscopicité du bois.

## 1.7 Le vernissage du bois

La finition représente l'une des plus importantes étapes pour ajouter de la valeur aux produits en bois. Étant le critère le plus évident de la qualité du produit, la finition exerce un impact majeur sur les décisions d'achat du consommateur (Tichy 1997). La fonction principale des revêtements de finition est de protéger la surface du bois, de maintenir une certaine apparence et de la rendre facile à nettoyer. Dans ce contexte, les vernis sont généralement employés lorsqu'on désire augmenter la durabilité d'une surface de bois, tout en préservant son apparence naturelle (Estrada 1958; Feist 1983; Richter et al. 1995; Suleman et Rashid 1999).

Le film de vernis idéal devrait avoir une souplesse suffisante pour suivre les variations dimensionnelles du bois induites par les changements climatiques, tout en conservant sa dureté pour protéger la surface du substrat (Dight 1966; Back et Sandström 1982). Cependant, quelques revêtements perdent leur souplesse avec le temps, deviennent cassants et craquent au fur et à mesure que le substrat se déforme (Dight 1966). De plus, bien que les revêtements de finition soient capables de limiter l'interaction entre le bois et l'humidité, ils permettent quand même une certaine pénétration par de la vapeur d'eau (Rice et Phillips 2001).

### 1.7.1 Les types de solvant

Les composés organiques volatils (COV) et les oxydes d'azote sont les principaux composés chimiques responsables de la détérioration de la couche d'ozone et de la formation d'ozone photochimique (Ojala et al. 2006, de Meijer 2001). Par exemple, dans

l'état du Massachusetts les manufacturiers de parements de cèdre émettent 187 tonnes de VOC par année lors de l'application de revêtements (Soltys 2000). Utilisés à l'intérieur, les revêtements à base de solvants organiques peuvent être dangereux pour la santé humaine et affecter la productivité en milieu de travail (Zhang et Niu 2003). C'est pourquoi en 1999 l'Union Européenne a adopté une directive afin de diminuer les émissions de COV de 67% pour 2007. Les revêtements à base d'eau permettent de réduire la pollution et plus particulièrement les émissions de COV d'environ 60% (Tichy 1997). Tichy (1997) a observé que les revêtements à base d'eau possèdent un contenu en solide plus élevé que leur homologue à base de solvant et génèrent ainsi un film de meilleure qualité.

Rijckaert et al. (2001a; 2001b) ont comparé la pénétrabilité de revêtements à base d'eau et à base de solvant. Les produits à base d'eau pénètrent plus profondément dans le bois initial tandis que ceux à base de solvant pénètrent davantage dans le bois final. Les deux types de revêtements présenteraient ainsi des mécanismes d'écoulement différents (Rijckaert et al. 2001a). D'une part, si l'écoulement est limité par la viscosité, une pénétration plus profonde surviendra si les diamètres des capillaires sont plus grands. D'autre part, si l'écoulement est contrôlé par les forces capillaires, des diamètres plus faibles vont accroître la pénétration. Des tests d'adhésion ont révélé que les revêtements à base d'eau présentaient une résistance supérieure à ceux à base de solvant même si leur pénétration moyenne dans le bois est plus faible (Rijckaert et al. 2001b).

### **1.7.2 L'effet du vieillissement**

Différents facteurs affectent le vieillissement des vernis dont l'humidité, la lumière et la température (Feist 1983). Premièrement, l'humidité, qui est la principale cause du vieillissement pour les vernis destinés à un usage intérieur, induit des contraintes internes dans le bois lors du gonflement et du retrait. Deuxièmement, la lumière engendre des changements de couleur en affectant principalement la lignine à la surface. Finalement, la température a un effet catalyseur sur les réactions photochimiques et la biodégradation lorsqu'elle est élevée. Le vieillissement cause donc la formation de microfissures qui peuvent se propager et diminuer la résistance du bois. Puisque le vieillissement est un phénomène de surface, la dureté et la résistance à l'abrasion sont diminuées.

Des traitements de vieillissement accéléré sont souvent effectués afin de pouvoir anticiper le comportement des produits à long terme. Le type de vieillissement utilisé dépend de l'application future du produit. Pour des produits destinés à l'usage extérieur, les auteurs utilisent généralement des équipements comme le *Weatherometer* à lampe au xénon (Feist 1988; Richter et al. 1995). Cette méthode évalue les effets des radiations UV et de l'humidité sur le produit fini (Arnold et al. 1991). Toutefois, pour des produits destinés à l'usage intérieur, les chercheurs peuvent utiliser une chambre environnementale qui permet de tester les effets de l'humidité et de la température. La norme ASTM D 3459 (1998) est un bon exemple.

#### **1.7.2.1 L'effet de la rugosité et de l'usinage**

Les surfaces très rugueuses peuvent présenter des éléments anatomiques qui ne sont pas fermement attachés à la surface (Feist et al. 1985). Ceux-ci risquent de se détacher suite à des cycles de gonflement et de retrait créant ainsi des zones de faiblesses à la surface. Une surface rugueuse est donc davantage perméable.

Hernández (1994) a observé que des surfaces d'ébène à sucre ayant subi un rabotage orthogonal avec barre de pression présentent une meilleure résistance à l'adhésion après un cycle de vieillissement que les surfaces ayant subi un rabotage périphérique conventionnel. L'auteur suppose que le rabotage périphérique induit davantage de microfissures et que celles-ci affectent l'adhésion lors du vieillissement. Aussi, le fait que les cellules soient moins abîmées, celles-ci vont subir un plus faible gonflement (Naderi et Hernández 1999). En effet, Stehr et Östlund (2000) ont observé que les méthodes d'usinage induisent des microfissures, lesquelles peuvent ensuite se propager et devenir problématiques lors de l'adhésion du revêtement et du vieillissement. Dans leurs travaux, les surfaces poncées n'ont présenté aucune microfissure, comparativement aux surfaces rabotées.

de Moura et Hernández (2006c) ont étudié le comportement au vernissage de trois procédés d'usinage avant et après vieillissement. Le ponçage et le rabotage hélicoïdal transversal ont procuré une meilleure adhésion avant vieillissement que le rabotage oblique avec barre de pression. Toutefois, après vieillissement, les échantillons poncés et rabotés en coupe hélicoïdale ont subi une perte d'adhésion plus importante que ceux rabotés en coupe

oblique avec une barre de pression. L'endommagement cellulaire et la rugosité élevée furent responsables de la perte de résistance des surfaces poncées et rabotées en coupe hélicoïdale respectivement.

### **1.7.3 Les méthodes d'évaluation**

La norme ASTM D 3359 (1997), également appelée test de pelage, permet de classer l'adhésion de films selon leur résistance au pelage. Il s'agit d'une méthode qualitative qui a l'avantage d'être très simple à utiliser surtout quant à la préparation des échantillons (Lewis et Forrestal 1969). Cette facilité explique la grande utilisation de ce test dans l'industrie, malgré qu'il soit hautement subjectif. Les méthodes du ruban peuvent ainsi être influencées par l'angle et la vitesse de pelage, la largeur du ruban et la rigidité du film essayé (Lewis et Forrestal 1969). Par contre, de Meijer et Militz (1998) ont mis au point une méthode dans laquelle l'éprouvette, humidifiée à 30% (H), est soumise à un essai semblable au test de pelage à une vitesse de tirage de 30 mm/min. Le ruban est équipé d'un tensiomètre, ce qui permet de mesurer directement l'adhésion en fonction de la distance de tirage. Cette méthode a même permis aux auteurs de distinguer des différences entre l'adhésion du bois final de celle du bois initial. Selon Podgorski et al. (2004), cette méthode d'évaluation qualitative jumelée à une quantitative, telle que celle décrite par la norme ASTM D 4541 (1995), permettrait d'obtenir davantage d'information sur l'adhésion de revêtements de finition.

La méthode ASTM D 4541 (1995) utilise une pièce circulaire d'aluminium similaire à un pion de jeux d'échecs, laquelle est fixée à la surface du film par un adhésif. Après durcissement de l'adhésif, le périmètre de la base du pion est incisé, dans le but d'isoler la surface à être testée. Un cylindre connecté à une pompe à vide est alors placé sur le pion. Le vide est appliqué dans le cylindre jusqu'au décollement du pion. La valeur maximale de la contrainte normale au moment de la rupture est enregistrée. La norme ASTM D 4541 (1995) a l'avantage d'induire une haute proportion de ruptures d'adhésion, en plus de produire un effort de pelage selon un angle constant de 90°.

La microscopie électronique à balayage peut apporter des informations importantes sur la condition du film de vernis. Par le biais de cette technique, on peut évaluer l'épaisseur du

film, la profondeur de ses craquelures, ainsi que la profondeur et les voies de pénétration des produits de finition dans le bois (Middleton 1993; de Meijer et al. 1998).

La microscopie de fluorescence peut être également utilisée pour l'étude de la pénétration de produits de finition dans le bois. de Meijer et al. (2001) ont ainsi ajouté des groupes anthracènes aux scellants étudiés pour rendre possible la détection de leur pénétration dans le bois.

## 1.8 Le bouleau blanc

Le bouleau blanc (*Betula papyrifera* Marsh.) est aussi connu sous le nom de bouleau à papier. Il pousse partout au Canada et comporte plusieurs variétés dont le bouleau occidental. Le bois est d'un blanc crèmeux et le duramen est souvent brunâtre. Son écorce est blanche crème et s'exfolie facilement en longues et larges bandes horizontales. Bien qu'il soit 25% plus tendre que l'érable à sucre, il possède une texture semblable à cette espèce. Le bois de bouleau blanc sèche bien mais subit un retrait considérable (Mullins et McKnight 1981). De façon générale, l'aptitude de cette espèce à l'usinage est semblable à celle du bouleau jaune et, il est assez facile à coller (Mullins et McKnight 1981). Ses propriétés physiques se rapprochent de celles de l'érable rouge en ce qui concerne la masse volumique, la dureté et la résistance à la flexion (Jessome 1977). Enfin, le bouleau blanc peut être utilisé pour maintes applications : ébénisterie, placages, boiseries, tournages, pipes, cercueils et bâtonnets de crème glacée, sans oublier l'industrie des pâtes et papiers ainsi que celle du bois d'œuvre. Même les Amérindiens s'en servaient pour recouvrir d'écorce leur maison principale ainsi que pour confectionner des ustensiles et des canots ; d'où le nom de bouleau de canot qui lui est parfois attribué.

### 1.8.1 Les travaux antérieurs sur l'usinage

Les caractéristiques d'usinage des bois canadiens ont été évaluées selon la norme ASTM D 1666 (1994) par Cantin (1967), par Williams et Morris (1998) de même que par Lihra et Ganev (1999). Cantin (1967) a étudié 16 espèces de l'Est du Canada tandis que Williams et Morris (1998) ont évalué 15 espèces provenant de la Colombie-Britannique. Lihra et Ganev

(1999) ont travaillé avec 14 espèces de l'est du Canada, deux espèces européennes et une asiatique. Le bouleau blanc était inclus dans toutes ces études.

Le rabotage périphérique à couteaux droits a été évalué dans ces trois études. Les auteurs ont déterminé qu'un angle d'attaque de 20° combiné à une vitesse d'avance de 16 ou 20 traces de couteaux par 25,4 mm de longueur de bois permet d'obtenir une bonne qualité de surface (tableau 1.2). Par contre, Lihra et Ganev (1999) ont observé du fil arraché et du fil pelucheux sur les surfaces rabotées. Le nombre d'échantillons sans défauts varie d'une étude à l'autre. Le côté subjectif de la norme ASTM D 1666 (1994) peut expliquer cette divergence. Aussi, les caractéristiques d'usinage varient entre les espèces et à l'intérieur d'une même espèce.

Williams et Morris (1999) et Lihra et Ganev (1998) ont aussi étudié le comportement du bois au ponçage avec un papier sablé de grain 120. Williams et Morris (1998) ont observé que le bois de bouleau blanc présente une bonne qualité de surface: près de 98 pourcent des échantillons étaient sans défauts. Cependant, Lihra et Ganev (1999) ont obtenu des surfaces très pelucheuses avec seulement 10 pourcent des échantillons sans défauts. Un ponçage plus fin avec un papier de grain 150 a permis par contre d'éliminer ce type de défaut. Ces résultats montrent le caractère limité des études entreprises avec le bouleau blanc au pays. Des études plus approfondies sur l'usinage de finition du bois de cette espèce restent ainsi à faire

Tableau 1.2: Résumé des conditions optimales de rabotage pour le bouleau blanc.

Auteurs	Angle d'attaque (deg)	Vitesse d'avance (traces de couteaux par 25,4 mm de longueur)	Type de défauts
Cantin (1967)	15, 20 ou 30	20 (76) <sup>1</sup>	
Williams et Morris (1998)	12	20 (100)	
	20	12 (100), 16 (100) ou 20 (100)	
Lihra et Ganev (1999)	20	16 (42)	Fil arraché et pelucheux

<sup>1</sup> Pourcentage d'échantillons sans défauts.

## Chapitre 2

### Effects of the cutting parameters on surface quality of paper birch wood machined across the grain with two planing techniques

#### 2.1 Abstract

Helical planing and face milling were applied across the grain to surface paper birch wood prior to coating application. Three feed speeds and three cutting depths were evaluated for face milling while three cutting depths were studied for helical planing. The roughness and wetting properties of wood as well as pull-off strength of a solvent-borne coating after aging were evaluated. For helical planing, no significant effects of the cutting depth on roughness and wetting properties were found. For face milling, the cutting depth had no significant effect on the surface roughness while it had a significant impact on the wetting properties. The feed speed affected significant both parameters. Furthermore, none of these parameters had a significant effect on the pull-off strength. However, helical planing produced smoother surfaces with equivalent wetting properties and higher pull-off strength than face milling. Scanning electron microscopy showed more exposed cell lumina and sound cells for helical planed surfaces, which enhanced their wetting and adhesion properties.

#### 2.2 Introduction

Little information is available on the machining properties of paper birch wood. This species has however been included in general studies on Canadian woods undertaken by Cantin (1967), Williams and Morris (1998) and Lihra and Ganev (1999). Based on the standard ASTM D 1666 (1987), the authors suggested the best cutting parameters for planing this species using a conventional peripheral process. However, Lihra and Ganev

(1999) reported only 48 percent of pieces as free of defects when planing paper birch wood. Torn grain and fuzzy grain were the typical defects produced. It is also known that crushed cells and checks on the surface and subsurface are often produced when machining with conventional planing (Stewart et Crist 1982; Murmanis et al. 1983). This superficial damage can hinder coating penetration in the wood (de Meijer et al. 1998; de Moura and Hernández 2005). More research is therefore needed in order to produce satisfactory surfaces of paper birch wood. Other surfacing techniques like helical planing and face milling could be used in order to prevent the occurrence of such defects. Hence, the improvement of the machining techniques of paper birch wood would encourage the expanded utilization of the species.

Helical planing has been studied more extensively than face milling. Reductions in noise levels and in the surface defects have been reported (Stewart 1975b; Stewart and Hart 1976). de Moura and Hernández (2006a) studied helical planing in sugar maple wood. The surfaces planed across the grain had greater cell-wall fibrillation than those fed oblique to the grain. This fibrillation increases the actual surface available for mechanical adhesion which also results in enhanced wetting properties. No crushed cells and checks on the surface and subsurface were observed when planing across the grain (de Moura and Hernández 2006a, 2006c).

Face milling can be applied to wood machining but the data available in the literature is scarce. Stewart (1983; 1984; 1985), by applying this technique in yellow poplar wood reported lower power consumption and better surface quality when compared with conventional peripheral planing.

Surface roughness and wetting properties are usually monitored in order to assess the quality of machining processes. The surface roughness is related to the wetting properties (Wenzel 1936). The latter is often evaluated by measuring the contact angle of a droplet (Garrett 1964; Parker and Taylor 1966; Collett 1972) as well as by evaluating its progress with respect to time (Shi and Gardner 2001; Šernek et al. 2004). It is known that feed and cutting depth are among the most important machining parameters affecting the quality of surfaces. However, the effect of these variables for the helical planing and face milling processes has not been studied.

The objective of the research was to evaluate the impact of feed speed and cutting depth on the surface roughness, wetting properties and lacquer performance of paper birch wood planed with two cross-grain planing techniques. The feed speed should affect the surface roughness and consequently the wetting properties. This will in turn influence the adhesion of the lacquer onto the machined surface.

## 2.3 Materials and methods

### 2.3.1 Testing material

Paper birch (*Betula papyrifera* Marsh.) wood was selected for this study. Twenty-seven air-dried flat-sawn boards were stored in a conditioning room at 20°C and 40% relative humidity (RH), until they reached 8 percent equilibrium moisture content (EMC). After conditioning, each board was crosscut into three 280 mm (L) and nine 150 mm (L) matched sections. The first three sections were used for the helical planing tests, while the nine other sections were used for the face milling tests. All sections were machined at 50 mm (T) width and 22 mm (R) thickness. Each section underwent a surfacing treatment and was re-sectioned to prepare specimens for roughness (50 by 25.4 mm), wetting (50 by 25.4 mm), varnishing, accelerated aging and pull-off adhesion tests (50 by 230 mm or 50 by 100 mm). Another matched piece was used to measure the basic density. The average and standard deviation of the basic density of the boards were 498 and 34 kg/m<sup>3</sup>, respectively.

### 2.3.2 Machining treatments

The helical planing treatments were performed with a Casadei R63H3 24" surface planer provided with two freshly sharpened flexible knives. The rake and helix angles were 30° and 14° respectively. The specimens were planed across the grain. For this purpose, the boards were butted side to side and fed with the grain parallel to a tangent of the helix angle. A jig board was used in order to hold firmly the specimens during cutting. The feed speed was 5.5 m/min which corresponds to 26 knife marks per 25.4 mm of length. The studied depths of cut were 0.4 mm, 1.2 mm and 2.0 mm. An helical planing at 1.0 mm of depth was carried out to level samples prior to each machining treatment.

The face milling treatments were performed with a Rotoplane 16T surface planer provided with 34 new insert knives having an angle of 60°. The positive axial rake and radial rake angles, according to Stewart (1974), were 15° and 13°, respectively. The boards were fed through the center of the disk and therefore planed nearly to 13°-90° (Fig. 1). A jig board was used to hold firmly the specimens during cutting and to reduce vibration. The studied feed speeds were 1.6 m/min, 15.7 m/min and 36.8 m/min which correspond to 0.015 mm, 0.15 mm and 0.34 mm feed per insert knife, respectively. The studied depths of cut were 0.4 mm, 1.2 mm and 2.0 mm. A face milling planing at 1.0 mm of depth was carried out to level samples prior to each machining treatment.

### **2.3.3 Surface topography measurements**

Roughness measurements were carried out with a Micromeasure confocal microscope. Two surfaces of 1 cm<sup>2</sup> were analyzed per sample. For the samples surfaced with face milling, the measured surfaces corresponded to the zones where the knife enters and exits the boards and were located at 1.5 cm from each edge. The data was collected with the Surface Map 2.4.13 software using an acquisition frequency of 100 Hz and a scanning speed of 5 mm/s. The average roughness ( $R_a$ ) was determined by using the Mountain software based upon ISO 4287 (1998). A cut off length of 2.5 mm combined with a Gaussian filter (ISO 11562 1996) were used for calculations. The surface profile was assessed along and across to the grain.

### **2.3.4 Surface wettability tests**

Wetting analyses were performed with a FTÅ D200 imaging goniometer at 20°C. One droplet (6 µl) of an aqueous glycerin solution having a concentration of 50% was added to the wood surface with an injection microsyringe. A frame grabber recorded the changes in contact angle of the droplet during the first two minutes of wetting. The view of the droplet was parallel to the orientation of wood fibers. In this way, the measured contact angles gave an indication of the longitudinal spreading of the tested liquid. Contact angle was calculated as an average of both sides of droplets to compensate for any horizontal variations. Also, to quantify the spreading and penetration of the probe liquid, the k-value was determined according to Shi and Gardner (2001).

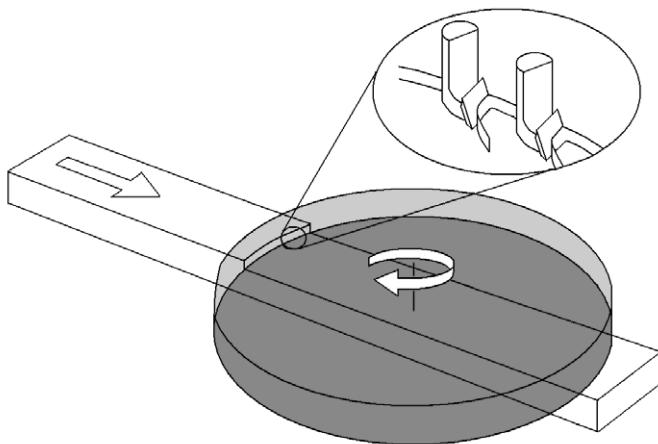


Figure 2.1: Schema illustrating how the Rotoplane 16T works.

### 2.3.5 Microscopic evaluation

Small blocks measuring 1 cm<sup>3</sup> were prepared with a razor blade mounted onto a microtome by carefully cutting one of the end-grain surfaces. All blocks were then desiccated with phosphorous pentoxide for a week and mounted onto standard aluminium stubs. Micrographs by an environmental scanning electron microscopy (ESEM) were taken for two representative machined subsurfaces for each machining treatment.

### 2.3.6 Coating procedure

The machined surfaces were spray coated following a typical industrial procedure in the furniture industry within 24 hours after the machining treatments. During this period, samples were placed face against face, within black plastic bags in order to limit contamination. The coating film consisted of one layer (0.7 g/m<sup>2</sup>) of *Valspar-superseal* followed by one layer (0.6 g/m<sup>2</sup>) of *Valspar-20 ultraguard*. A 320-grit sanding was performed manually between the two coats. This sequence is commonly used in the Canadian furniture industry for making items like bookcases, tables, wardrobe, chests of drawers, etc.

### 2.3.7 Accelerated aging

All specimens underwent an accelerated aging treatment in a Cincinnati Sub-Zero environmental simulation chamber WM-906-MP2H-3-SC/WC. Its temperature and relative

humidity precision is respectively  $\pm 1^{\circ}\text{C}$  and  $\pm 3\%$  RH. The treatment was based upon the ASTM D 3459 (1998) and consisted of 2 cycles of 48 hours at  $50^{\circ}\text{C}$  and 10% RH followed by 48 hours at  $50^{\circ}\text{C}$  and 90% RH. Prior to the treatment, the ends of specimens were sealed with paraffin in order to reduce the moisture exchange through the cross section. After the aging treatment, the specimens were conditioned at  $20^{\circ}\text{C}$  and 40% RH until they have reached their initial EMC (8%).

### **2.3.8 Adhesion tests**

The adhesion of the aged films was evaluated by means of a pull-off test, based upon ASTM D 4541 (1995). A small 20 mm diameter aluminum dolly was glued on the film surface with Araldite 2011 two-part epoxy resin. After 24 hours of curing at  $20^{\circ}\text{C}$  and 40% RH, the perimeter of the glued dolly was carefully incised in order to prevent propagation of failures out of the tested area. Pulling was applied at a 7 mm/min speed until separation of the dolly. A MTS QT5 universal testing machine having a maximal capacity of 5 kN and  $\pm 0.12\%$  accuracy was employed. The maximal normal pull strength at rupture was recorded.

### **2.3.9 Statistical analysis**

The helical planing treatments were analysed as a randomized block design where each block represented a board. The face milling treatments was a 3x3 factorial experiment analysed as a randomized block design where each block represented a board. Least significant difference comparison tests were made when a significant effect was found at the 5 percent probability level.

## **2.4 Results and discussion**

### **2.4.1 Surface topography**

No major defects were noted on the surfaces machined with the two techniques. A light torn grain was observed on the surfaces planed by face milling at 36.8 m/min feed speed. Thus, the surface quality appeared to be better than the one generated by conventional peripheral planing (Lihra and Ganev 1999).

The values of roughness average ( $R_a$ ) measured along and across the grain for three cutting depths tested in helical planing are presented in Table 2.1. The roughness average of paper birch surfaces was higher when measured across to the grain (7.7  $\mu\text{m}$ ) than along the grain (5.3  $\mu\text{m}$ , all cutting depths pooled). A similar behaviour was observed for sugar maple wood planed under similar conditions (de Moura and Hernández 2006a). This was expected given that both hardwoods exhibit quite similar anatomical structures. Results of Table 2.1 also show that the cutting depth did not affect the roughness of paper birch wood. These results also confirm the earlier work undertaken with sugar maple wood when the same feed speed is considered (de Moura and Hernández 2006a). Stewart (1970) reported that the maximum depth of defects produced by straight-knife planing aspen wood across the grain appears unaffected by depths of cut up to 3.2 mm at 10 or more knife marks per 25.4 mm of length. This same conclusion was later expanded to five other hardwoods (Stewart 1975a).

ESEM analysis of helical planed samples showed no subsurface damage nor crushed cells (Fig. 2.2). Furthermore, good coating penetration was observed. The surfaces were characterized by the presence microfibrils, of packets of microfibrils and individual fibres torn-out from the workpiece at different levels (Fig. 2.6a). The helical planing process across the grain induced the formation of small longitudinal grooves, left on the surface by pulling-out individual cells or groups of cells. Fibrillation is desirable for adhesion, but it has to be limited to an extent in which it cannot be considered as a defect (for instance, fuzzy grain). The importance of fibrillation on adhesion of sanded surfaces was reported by de Moura and Hernández (2006b). However, it is known that sanding produces a superficial layer of crushed cells that hinders coating penetration and may act as a mechanical weak boundary layer, inducing fractures. In contrast, Fig. 2 shows that the cross-grain helical planing produces a high number of anchorage points for mechanical adhesion, with virtually no superficial crushing.

Table 2.1: Roughness average ( $R_a$ ) of helical-knife planed paper birch wood surfaces measured along and across the grain for three cutting depths.

Direction of measurement	Cutting depths (mm)			
	0.4	1.2	2.0	
Along the grain ( $\mu\text{m}$ )	5.3 <sup>1</sup> (0.2) <sup>2</sup>	a <sup>3,4</sup> (0.8)	5.3 a (0.7)	5.3 a (0.7)
Across the grain ( $\mu\text{m}$ )	7.7 (0.3)	b (0.4)	7.7 b (0.4)	7.6 b (0.3)

<sup>1</sup> Means of 27 replicates.

<sup>2</sup> Standard error of the mean in parentheses.

<sup>3</sup> Means within a row followed by the same letter are not significantly different at the 5% probability level.

<sup>4</sup> Means within a column followed by the same letter are not significantly different at the 5% probability level.

For face milling, cutting depth did not affect either the roughness average of paper birch wood (Table 2.2). In contrast, Stewart (1983) reported that surface quality obtained by face milling decreased as depth of cut increased. The difference in results between the two studies could be due to the different axial rake angles used, which affects the chip type formed. Thus, transition between a type III and type I chip in orthogonal cutting across the grain occurs as cutting depth increases at high rake angles (Stewart 1979). At low rake angles, a type III chip was observed regardless of the cutting depth. As a result, a type III chip could be formed for the three cutting depths used in the present study given that the rake angle was 15°.

On the other hand, feed speed had a significant effect on roughness average of paper birch wood.  $R_a$  increased as feed speed increased (Table 2.2). This can be related to the higher cutting forces occurring at higher feed speeds. Similar findings have been reported by Stewart and Lehmann (1974) for cross-grain helical planing, by Carrano et al. (2004) for cross-grain routing, by Iskra and Tanaka (2005) for routing at several grain orientations, as well as by de Moura and Hernández (2006a, 2006c) for oblique and cross-grain helical planing.

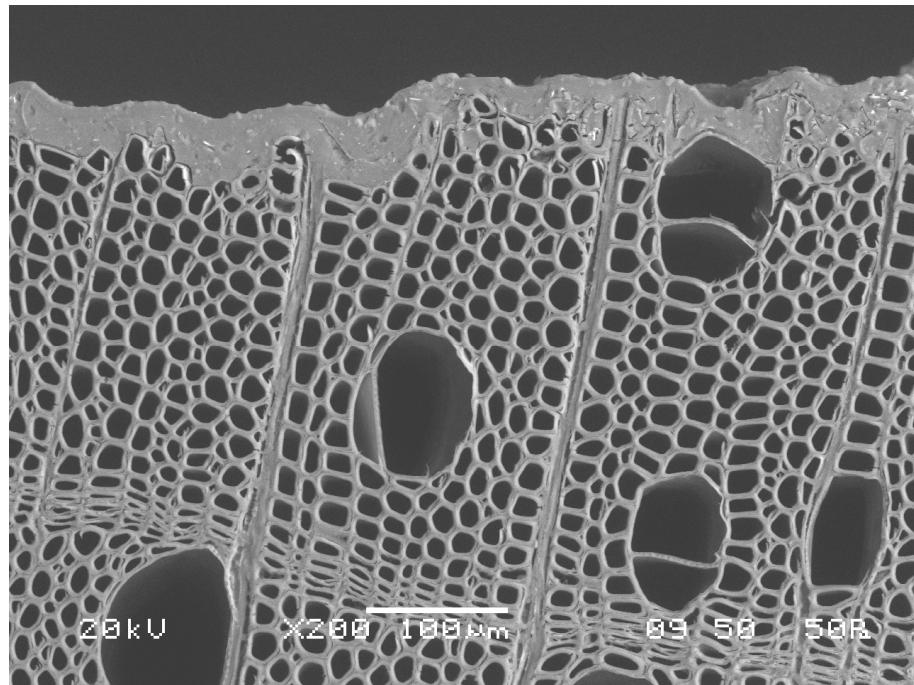


Figure 2.2: Transverse ESEM micrograph of a paper birch surface machined by helical planing.

As for the helical planed surfaces, the average roughness across to the grain ( $R_{a\perp}$ ) was significantly higher than when measured along to the grain ( $R_{a\parallel}$ ) (Table 2.2). The ratio  $R_{a\perp}/R_{a\parallel}$  increases with the feed speed indicating that the transverse component was more sensitive to changes in the feed speed (Fig. 2.3). In addition, it was observed that surface roughness was not uniform throughout the width of the cut. Surface was smoother in the area where the knives exit the workpiece than in the area where they enter. Two hypotheses could explain the observed behaviour. The fact that the tooth pitch is 48 mm, whereas the workpiece had a width of 50 mm, indicates that most of the time there is only one knife working at a time. This could increase the vibration during cutting. Additionally, when the knife enters the workpiece, it enters with a certain level of vibrations which is then damped during the cut. According to Iskra and Tanaka (2005), greater sound intensities during routing are associated with higher surface roughness. Increased surface roughness can hence be observed when the vibration level is increased. On the other hand, the observed behaviour could be associated with the fact that a down-milling situation occurs when the knife exits the workpiece. According to Stewart (1974), down-milling is better than an up-milling situation in terms of surface quality.

Table 2.2: Roughness average  $R_a$  of face milled paper birch wood surfaces measured along and across the grain for three cutting depths and three feed speeds.

Direction of measurement	Feed speed (m/min)	Cutting depth (mm)					
		0.4	1.2	2.0			
Along the grain ( $\mu\text{m}$ )	1.6	4.3 <sup>1</sup> (0.1) <sup>2</sup>	A <sup>3</sup> a	4.0 (0.1)	A a	4.0 (0.1)	A a
	15.7	6.6 (0.2)	A b	6.4 (0.2)	A b	6.5 (0.2)	A b
	36.8	8.0 (0.2)	A c	8.2 (0.3)	A c	8.6 (0.3)	A c
Across the grain ( $\mu\text{m}$ )	1.6	6.3 (0.2)	A a	6.3 (0.2)	A a	6.0 (0.2)	A a
	15.7	9.6 (0.3)	A b	10.3 (0.3)	A b	10.5 (0.4)	A b
	36.8	13.1 (0.4)	A c	14.1 (0.4)	AB c	14.4 (0.4)	B c

<sup>1</sup> Means of 27 replicates.

<sup>2</sup> Standard error of the mean in parentheses.

<sup>3</sup> Means within a row or column followed by the same letter are not significantly different at the 5% probability level. Uppercase letters are for cutting depth comparison within a row; lowercase letters are for feed speed comparison within a column, for each direction of measurement separately.

ESEM analysis of face milled samples showed that no subsurface damage was produced for the two lower feed speeds, which suggests that low levels of cutting forces existed (Fig. 2.4). No crushing cells were observed as it is well the case for sanding (Stewart and Crist 1982, Caster et al. 1985, de Moura and Hernández 2005 and 2006c). However, at the highest feed speed (36.8 m/min) some samples presented slight torn grain on the surfaces. ESEM micrographs showed that some fibre cells and rays were bent and few were even crushed (Fig. 2.4b). In some cases, ruptures of rays extended below the cutting plane. The cutting forces at high feed speed also caused severe separation of vessel walls, pushing them and neighbouring cells within vessel cavities (Fig. 2.6b). The coating penetration was good; up to three rows of fibre cells were filled with lacquer as well as the rays. In contrast, all conditions used for helical planing in this study produced smoother surfaces and showed no subsurface damage nor crushed cells.

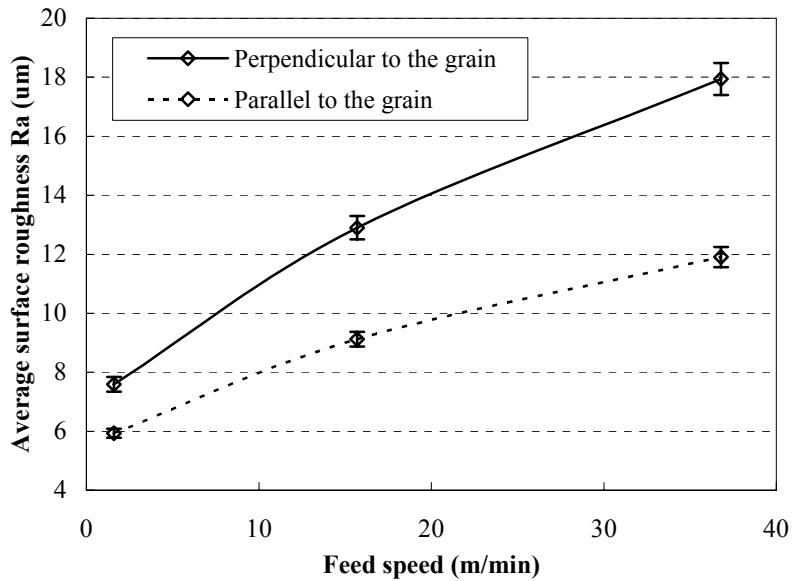


Figure 2.3: Average surface roughness along and across to the grain for the face milling treatment for a cutting depth of 2.0 mm.

#### 2.4.2 Surface wettability

The results of K-value for the two planing experiments are depicted in Figure 2.5. For helical planing, cutting depth had no significant effect on the wetting properties of paper birch surfaces. In contrast, the cutting depth and the feed speed had a significant effect on the wetting properties of face milled samples. As the cutting depth decreased, the k-value tended to increase indicating higher penetration and spreading of the probe liquid. K-value also increased as feed speed increased. Within the range of measurements studied, the feed speed appeared to affect more the wetting properties than the cutting depth. These results can be attributed to the relationships between these properties and surface roughness. It is known that better wetting properties are associated to higher surface roughness (Dolenko et al. 1974; de Moura and Hernández 2005). Table 2.2 confirms that feed speed affected more surface roughness than cutting depth.

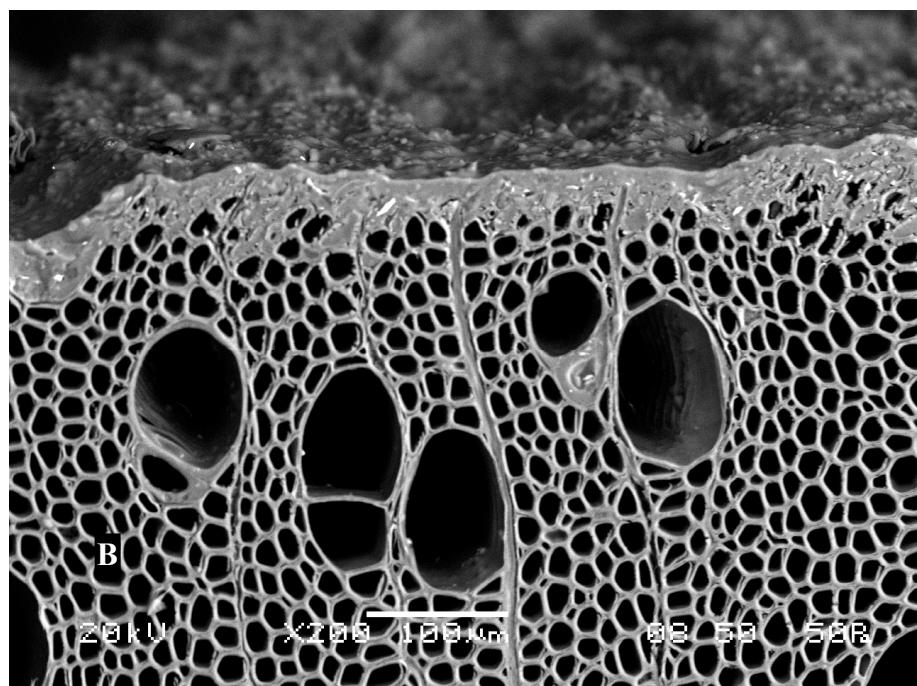
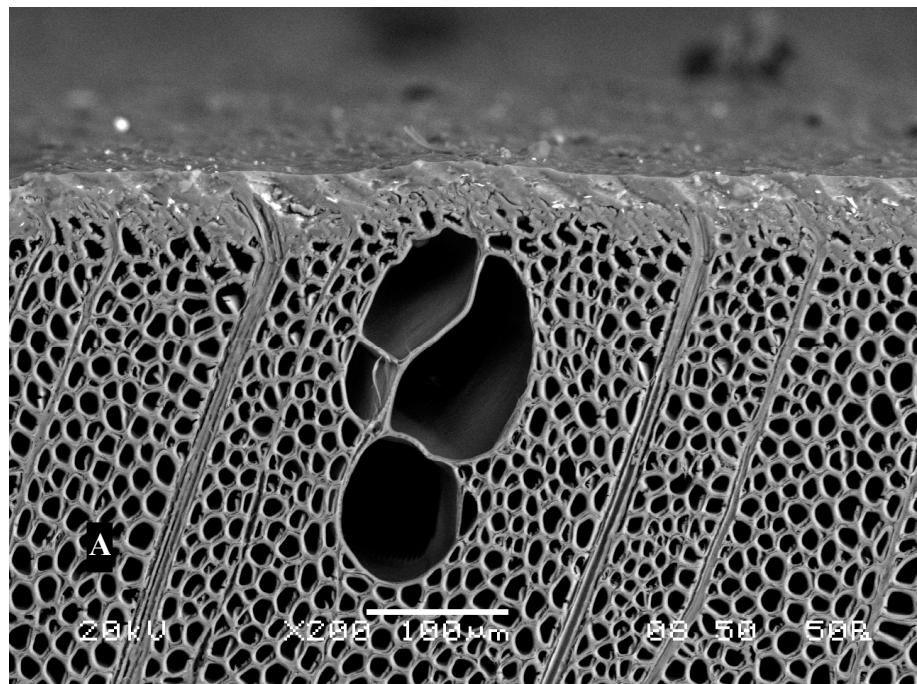


Figure 2.4: Transverse ESEM micrograph of a paper birch surface machined by face milling at a feed speed of 1.6 m/min (A) and 36.8 m/min (B).

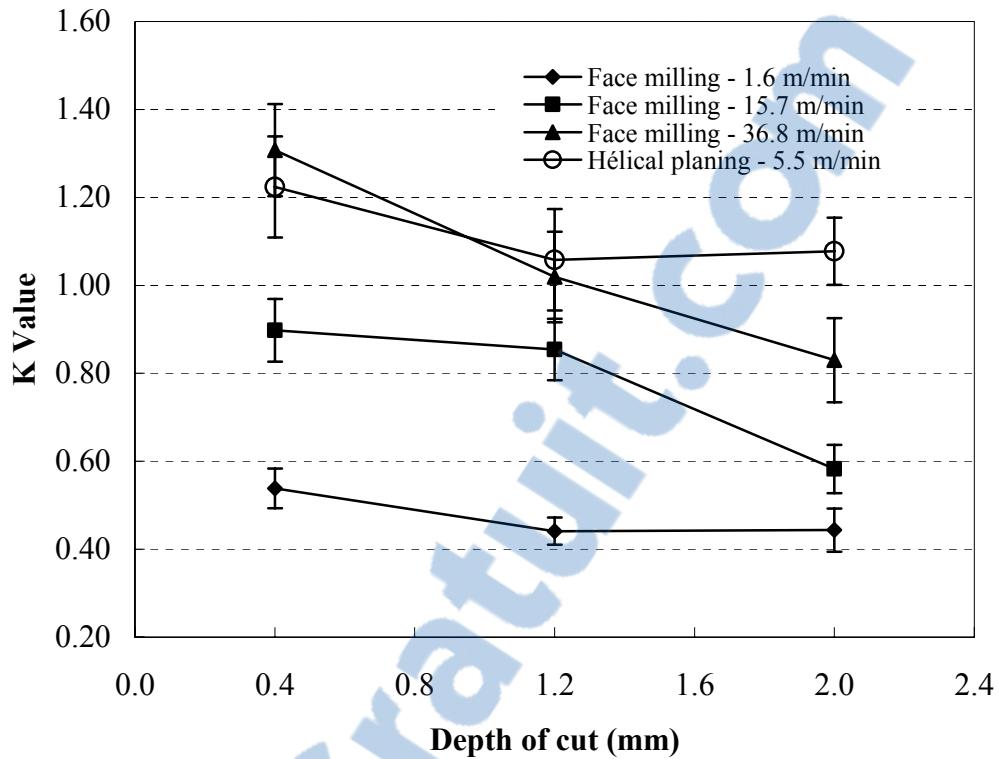


Figure 2.5: K-value as a function of the cutting depth for face milling at three different feed speeds.

The helical planed surfaces were more wettable than face milled surfaces even though the former generated a lower  $R_a$  (Tables 2.1 and 2.2). This indicates that the planing treatments probably induced differences in other surface roughness parameters. Face milling was performed at  $15^\circ$  axial rake angle and probably produced segmented type III chips, where compression and shear failures occur in the wood ahead of the knife (Stewart 1979). Thin cell walls, as those of vessels, were not clearly severed and were rather pushed within their lumina (Fig. 2.6b). In contrast, helical was performed at  $30^\circ$  rake angle under up-milling condition. Thus the depth of cut is minimal at the beginning of the cut and the evacuation of chips is easier. As a result, the helical planing with a high rake angle across the grain gave enhanced surface quality. Wood cells were clearly severed and a higher proportion of opened vessel lumina and fibre lumina were observed (Fig. 2.6a). This should explain the better wetting conditions observed for the helical surfaces.

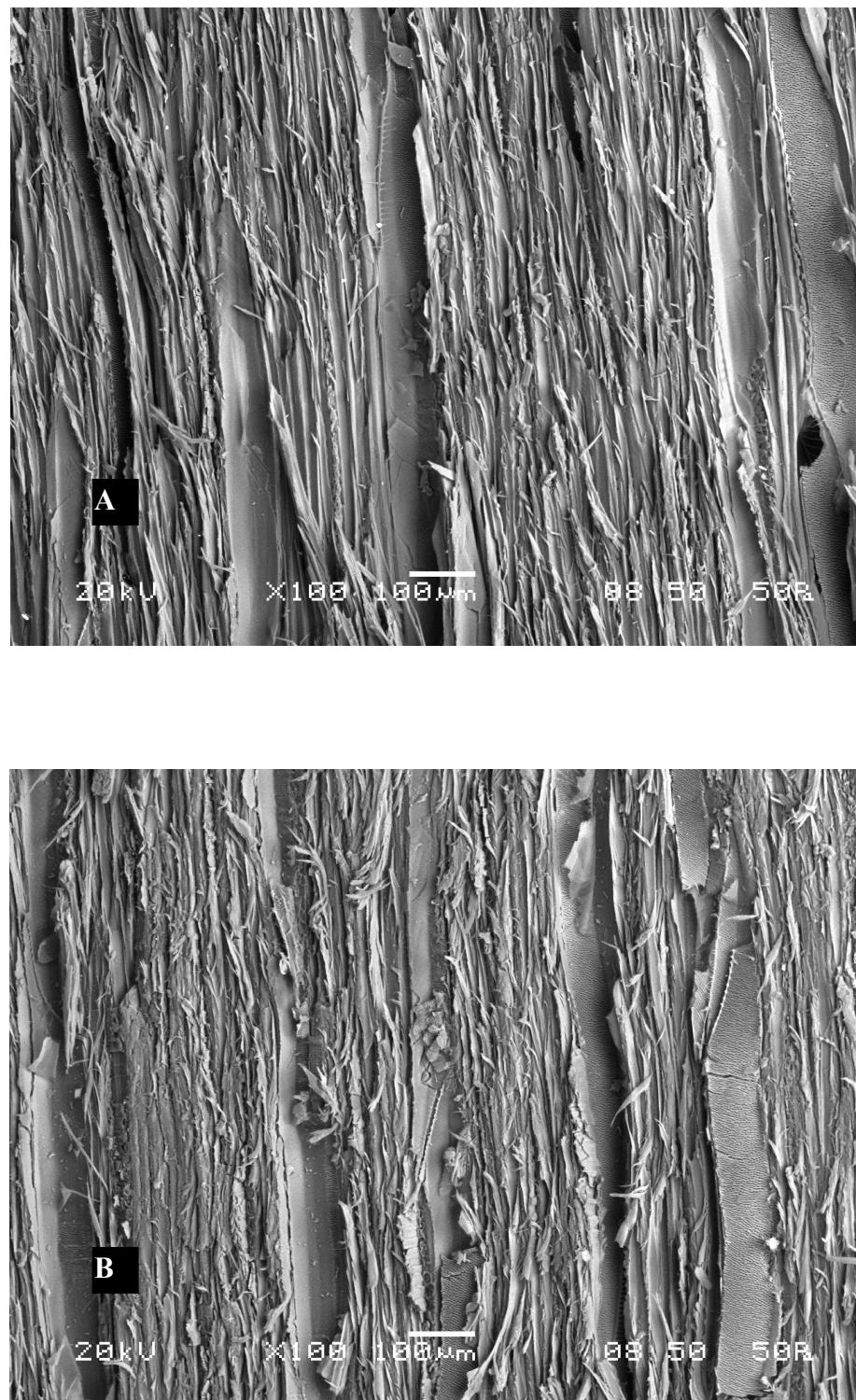


Figure 2.6: ESEM micrograph illustrating top views for (A) helical planing and (B) face milling.

### 2.4.3 Adhesion tests

The results of the pull-off tests for the two planing treatments are summarized in Table 2.3. For helical planing, the cutting depth had no significant effect on the pull-off strength of the coated paper birch wood. A similar behaviour was noted for  $R_a$  and the wetting properties (Table 2.1, Fig. 2.5). For face milling, neither cutting depth nor feed speed did affect the pull-off strength of the coating (Table 2.3). Again, the same behaviour was observed for  $R_a$  but not for the K-value results (Table 2.2, Fig. 2.5). These observations confirm that the roughness and the wetting properties could give useful information on the coating adhesion ability of a wood surface.

The coating adhesion strength was significantly higher for the helical planed specimens than for the face milled ones (Table 2.3). The helical planing treatment did not induce subsurface damage, whereas in the case of the face milled samples bent rays and crushed cells were seen. More opened vessels and sound cells were observed in helical planed surfaces. The better wetting properties of the helical planed surfaces suggest that the spreading and penetration of coating was more efficient. There are no direct evidences in this work indicating the formation of chemical linkages between wood and coatings. Therefore, we could affirm that mechanical bonding was the major adhesion factor. Hence, the deeper bonds of helical planed surfaces might have been created resulting in stronger mechanical bonds.

Table 2.3: Adhesion strength of helical planed and face milled paper birch wood coated surfaces as a function of feed speed and cutting depth.

Planing process	Feed speed (m/min)	Cutting depth (mm)	Adhesion strength (MPa)
Helical planing	5.5	0.4	2.2 <sup>1</sup> (0.1) <sup>2</sup> a <sup>3</sup>
		1.2	2.0 (0.1) a
		2.0	1.9 (0.1) a
Face milling	1.6	0.4	1.2 (0.1) b
		1.2	1.3 (0.1) b
		2.0	1.6 (0.1) b
-	15.7	0.4	1.2 (0.1) b
		1.2	1.3 (0.1) b
		2.0	1.3 (0.1) b
-	36.8	0.4	1.2 (0.1) b
		1.2	1.1 (0.1) b
		2.0	1.3 (0.1) b

<sup>1</sup> Means of 27 replicates.

<sup>2</sup> Standard error of the mean in parentheses.

<sup>3</sup> Means within a column followed by the same letter are not significantly different at the 5% probability level.

## 2.5 Conclusions and recommendations

The cutting depth did not affect the surface quality nor the coating performance of helical planed and face milled surfaces. Virtually no defects were observed for the helical planed surfaces. However, the feed speed had a significant effect on the surface quality and the adhesion strength for the face milled specimens. By increasing the feed speed, the roughness, the level of fibrillation, the level of subsurface damage and the wetting

properties increased. At the highest feed speed, torn grain was observed on the face milled surfaces.

The pull-off strength of coating after weathering was greater for the helical planed specimens than for the face milled ones. The lack of subsurface damage combined with good wetting properties may be responsible for the observed results. Furthermore, the two cutting processes differ in many aspects that could have affected the surfaces.

For the studied conditions, helical planing seems to produce the best surfaces. However, only the depth of cut and the feed speed were studied. Given that the rake angle has a significant effect on the surface quality, this parameter needs to be optimized in future works. By doing so, surfaces of better quality could even be produced for both the helical and the face milling processes.

## **Chapitre 3**

### **Evaluation of water-borne and solvent-borne coating performance for three surfacing methods on paper birch wood**

#### **3.1 Abstract**

Helical planing, face-milling and sanding were used to surface paper birch wood prior to the application of coating. Surface roughness, wetting properties and the adhesion strength of an ultra-violet cured water-borne coating and a solvent-borne coating, were evaluated before and after weathering. The specimens surfaced with helical planing produced surfaces with the higher surface roughness, the best wetting properties, no subsurface damage and good adhesion strength before weathering. The ones surfaced with face-milling generated surfaces with the intermediate surface roughness, intermediate wetting properties, slight subsurface damage and good adhesion strength before weathering. The sanded samples produced the lowest surface roughness, lowest wetting properties, the highest subsurface damage and good adhesion strength before weathering. After weathering, all the samples coated with the same varnish showed to have the same adhesion strength regardless of the surfacing treatment. However, the samples surfaced with helical planing proved to have the best long-term adhesion strength. The ultra-violet cured water-borne coating created stronger bonds with the substrate than the lacquer.

#### **3.2 Introduction**

A better understanding of adhesion mechanisms on wood surfaces is of great interest to extend service life of transparent film-forming coatings. Wettability and roughness analyses provide important information on the ability of wood surfaces for adhesion of coating films. Good wetting is essential to adhesion as it provides better mechanical interlocking,

molecular-level interactions and secondary force interactions between the coating film and the wood surface. For any type of coating, good wetting might contribute to good film performance (Wulf et al. 1997). If a coating cures before complete wetting, a weak boundary layer of entrapped air may be formed in the interface (Lewis and Forrestal 1969). An increase in surface roughness enhances wettability by facilitating liquid spreading by capillarity (Garrett 1964; Lewis and Forrestal 1969). In addition, a suitable level of roughness provides a greater actual surface available for adhesion mechanisms. The importance of wood surface wettability and roughness on adhesion of polyurethane varnishes has been reported in previous studies (de Moura and Hernández 2005; 2006).

Sanding is a common practice used to prepare wood surfaces for coating. However, sanding is one of the most skill-based, time-consuming, and expensive operations in the wood industry (Taylor et al. 1999). This machining process produces defect-free uniform surfaces (Richter et al. 1995). But, sanded wood is characterized by a layer of crushed cells at the surface and subsurface, lumens clogged by fine dust, scratches, and packets of micro-fibrils torn out from cell walls. Crushing and clogging of cells hinder penetration (de Meijer et al. 1998), while fibrillation and scratches accelerate spreading of liquid coatings on sanded surfaces. The benefits of fibrillation for mechanical adhesion of coating films have been demonstrated for sanded wood surfaces (de Moura and Hernández 2005). In searching for methods to reduce the need for sanding, the helical planing and the face milling have been proposed (Stewart and Lehmann 1974; Stewart 1974).

In true helical planing, the knives are mounted onto the periphery of a cutterhead at an angle to the axis of rotation and form a continuous oblique cutting edge (Stewart 1971). Torn grain, raised grain and chipmarks are reduced in helical planing, due to a gradual cutting action (Jones 1994). Helical planing performed across the grain appears to have a good potential to reduce dependence on sanding as it improves surface adhesion properties and enhance the performance of coatings. This surfacing method provides surfaces with improved wetting properties, good fibrillation and virtually no cell crushing (de Moura and Hernández 2006a).

Face milling is generally considered to be the combined cutting action of cutting edges located in the periphery and the face of a cutter to machine a flat surface perpendicular to

the cutter axis (Stewart 1974). Stewart (1984) studied the surface quality of several combinations of cutterhead diameter, chamfer angle, and feed position when face milling clear-grained hardwoods. The results showed that these variables had minimal effect on the milling process. However, investigations of other variables of face milling appeared worthwhile (Stewart 1984). Furthermore, this process typically occurs across the grain so a suitable level of fibrillation could be expected.

Solvent-borne coatings are usually applied in the wood furniture product industry. Although these products are efficient, there is a tendency to reduce the emission of volatile organic compounds (VOC). Hence, water-borne coating products have been introduced into the market and proved to be able to reduce the emission of VOC up to 60 percent compared with solvent-borne coatings (Tichy 1997). Also, Rijckaert et al. (2001b) observed that water-borne coatings created stronger bonds with the substrate than solvent-borne coatings.

This work evaluated the effect of sanding, cross-grain helical planing and face milling on the surface quality of paper birch wood for varnish coating. Surface quality was assessed by topography measurements, wetting analyses, and cell damage evaluation. The performance of a water-borne and a solvent-borne coating film was assessed by accelerated aging and pull-off tests.

### **3.3 Materials and methods**

#### **3.3.1 Testing material**

Paper birch (*Betula papyrifera* Marsh.), a diffuse porous hardwood, was selected for this study. Twenty-six air-dried flat-sawn boards were stored in a conditioning room at 20°C and 40 percent relative humidity (RH) until they reached 8 percent equilibrium moisture content (EMC). After conditioning, each board was crosscut into three matched sections of 390 mm (L) in length. All sections were machined at 50 mm (T) width and 22 mm (R) thickness. Each section underwent a surfacing treatment and was resectioned to prepare specimens for roughness (50 by 25.4 mm), wetting (50 by 25.4 mm), varnishing, accelerated aging and pull-off adhesion tests (50 by 84.8 mm). The average and standard deviation of basic density of the boards were 495 and 35 kg/m<sup>3</sup>, respectively.

### 3.3.2 Machining treatments

The helical planing treatment was performed with a Casadei R63H3 24" planer provided with two freshly sharpened flexible knives. The rake and helix angles were 30° and 14° respectively. The specimens were planed across the grain. For this purpose, the boards were butted side to side and fed with the grain aligned along to a tangent of the helix angle. A jib board was built in order to hold firmly the specimens during cutting. The feed speed was 5.5 m/min which corresponds to 26 knife marks per 25.4 mm of length. The depth of cut was 0.6 mm.

The face milling treatment was performed with a Rotoplane 16T planer provided with a disk holding 34 new insert knives having an angle of 60°. The positive axial rake and radial rake angles (according to Stewart 1974) were 15° and 13° respectively. The boards were fed through the center of the disk and therefore planed nearly to 13°-90°. A jig board was used in order to hold firmly the specimens during cutting. The studied depth of cut was 0.6 mm while the feed speed was 7.4 m/min, which corresponds to 0.07 mm of feed per insert knife.

The sanding treatment was performed with a SCM Sandya 20 wide-belt sander provided with open-coat paper-backed sanding belts. The boards were sanded with aluminum oxide sandpapers whose abrasive grains were coated with anti-static zinc stearate. The sanding program was 100-120-150-grit stages. The 100-grit sanding belt was installed onto a drum working with a 0.35 mm removal depth. The second sanding stage was performed with a drum-and-pad combined unit. This unit held a 120-grit sanding belt and was set to remove 0.15 mm of depth. The 150-grit sanding belt was mounted onto a pad unit removing 0.1 mm of depth. Sanding drums, 172 mm in diameter, were operated at 21 m/s. All sanding units had a 65 SH hardness. Sander feeding was carried out fiberwise with 10 m/min of feed speed. Oscillating blowers performed cooling and cleaning of belts during sanding.

### 3.3.3 Surface topography evaluation

Roughness measurements were carried out on defect-free zones with a Micromeasure confocal microscope based on the method described in chapter 2. The average roughness ( $R_a$ ), the maximum height of profile ( $R_z$ ), the kurtosis ( $R_{ku}$ ) and the skewness of the profile

( $R_{sk}$ ) were determined by using the Mountain software based upon ISO 4287 (1998). A cut off length of 2.5 mm combined with a Gaussian filter (ISO 11562 1996) were used for calculations. The surface profile was assessed along and across to the grain.

### 3.3.4 Surface wettability tests

Wetting analyses were performed with a FTÅ D200 imaging goniometer at 20°C based on the method described in chapter 2. Contact angle was calculated as an average of both sides of the droplet to compensate for any horizontal variations. Also, to quantify the spreading and penetration of the probe liquid, the k-value was determined according to Shi and Gardner (2001).

### 3.3.5 Microscopic evaluation

To analyse the subsurface cell damage and the coating penetration, small blocks measuring 1 cm<sup>3</sup> were prepared with a razor blade mounted onto a microtome by carefully cutting one of the end-grain surfaces. All blocks were then desiccated with phosphorous pentoxide for a week and mounted onto standard aluminium stubs with silver paint. Environmental scanning electron microscopy (ESEM) micrographs were taken for two representative machined subsurfaces for each machining treatment.

### 3.3.6 Coating procedure

The machined surfaces were spray coated following a typical industrial procedure within 24 hours after the machining treatments. During this period, samples were placed face against face, within black plastic bags in order to keep contamination at minimum levels. Two types of coatings were applied, a solvent-borne lacquer (SB) and a water-borne varnish (WB). The SB consisted of a *Valspar-Superseal* sealer (0.7 g/m<sup>2</sup>) followed by a *Valspar-20 Ultraguard* lacquer (0.6 g/m<sup>2</sup>). The WB consisted of a *Chemcraft-Plastiseal low VOC* sealer (1.1 g/m<sup>2</sup>) followed by a *Chemcraft-Aquacure* varnish (0.85 g/m<sup>2</sup>). A 320-grit sanding was performed manually between the two coats.

### 3.3.7 Accelerated aging

Half the specimens underwent an accelerated aging treatment in an environmental stimulation chamber CSZ-WM-906-MP2H-3-SC/WC having a temperature and relative humidity precision of  $\pm 1^{\circ}\text{C}$  and  $\pm 3\%$  RH, respectively. The treatment was based upon the ASTM D 3459 (1998) and consisted of 2 cycles of 48 hours at  $50^{\circ}\text{C}$  and 10% RH followed by 48 hours at  $50^{\circ}\text{C}$  and 90% RH. Prior to the treatment, the ends of the specimens were sealed with paraffin in order to reduce the moisture exchange through the cross section. After aging, the specimens were conditioned at  $20^{\circ}\text{C}$  and 40% RH until they have reached their initial EMC (8%).

### 3.3.8 Adhesion tests

The adhesion of the accelerated aged films as well as those that didn't undergo the aging treatments was evaluated by means of a pull-off test according to ASTM D 4541 (1995). A MTS QT5 universal testing machine having a maximal capacity of 5 kN and  $\pm 0.12\%$  accuracy was employed. Small 20 mm diameter dollies were glued on the film surface with Araldite 2011 two-part epoxy resin. After 24 hours of curing at  $20^{\circ}\text{C}$  and 40% RH, the perimeters of the glued dollies were carefully incised in order to prevent propagation of failures out of the tested area. Pulling was applied at a 7 mm/min speed until separation of the dolly from the substrate. The maximal normal pull strength at rupture was recorded.

### 3.3.9 Statistical analysis

The surface roughness and the wetting properties were analyzed as a randomized block design. The adhesion strength variation was evaluated as a strip split plot design. Each analysis was done on SAS 9.1. Means difference comparison tests were made when a significant effect at 5% probability level was found.

## 3.4 Results and discussion

### 3.4.1 Surface topography

No major defects, like torn grain or fuzzy grain, were noted on the surfaces machined for the three surfacing methods.  $R_a$  and  $R_z$  were significantly higher across the grain than along

the grain for all surfacing methods (Table 3.1). The highest roughness for both directions of measurement, were provided by cross-grain helical planing, followed by face milling and sanding. The skewness values ( $R_{sk}$ ) indicate that, compared to sanded surfaces, helical planed and face milled surfaces had more material near the top of the roughness profile. The three surfacing treatments tended to produce wide peaks and valleys as indicated by the kurtosis coefficients ( $R_{ku}$ ), which were higher than 3 (Table 3.1).  $R_z$  was higher for helical planing, followed by face milling, and, finally sanding. This could partially indicate the proportion of open lumens, which would affect the actual surface available for mechanical anchorage between coating and wood.

ESEM showed superficial cell damage in sanded surfaces (Fig. 3.1b). Tearing and crushing were the main causes of damage in cells at surface and subsurface. Typical scratches produced by the tearing action of the abrasive grains were noted (Fig. 3.1a). Presence of cell damage in sanded surfaces has been reported in earlier studies (de Meijer et al. 1998; de Moura and Hernández 2005; 2006b; 2006c). This damage is principally caused by normal cutting forces that outweighed the ultimate rupture strength of wood tissues (Stewart and Crist 1982). Lumens were hence covered by cell dust and neighbouring cell fractions, which prevents the penetration of coatings into wood (de Meijer et al. 1998) (Fig. 3.1a). In contrast, helical planed surfaces showed lower superficial cell damage, with relatively more open cells as vessels and fibres (Fig. 3.2). Similar results were observed in sugar maple surfaces by de Moura and Hernandez (2006a). Face milling produced surfaces similar to helical planed surfaces but with occasionally some bent rays and least open lumens (Fig. 3.3).

All three machining processes generated cell-wall fibrillation on the surface. As indicated previously, fibrillation increases the actual surface available for bonding. Helical planed samples presented the lowest level of fibrillation (Fig. 3.2a). This surface feature has been observed before for cross-grain helical planing and sanding but not for the face milling process. In up-milling planing, chip thickness is minimal at the beginning of the cut. As a result, wood cells were more clearly severed and a higher number of lumens were exposed. Face milling produced an intermediate level of fibrillation (Fig. 3.3a). A  $15^\circ$  rake angle probably produced type III chips, with compression and shear failures occurring ahead of

Table 3.1: Roughness averages ( $R_a$ ), maximum height of profile ( $R_z$ ), skewness coefficient ( $R_{sk}$ ) and kurtosis coefficient ( $R_{ku}$ ) measured along ( $\parallel$ ) and across ( $\perp$ ) the grain, obtained for three surfacing techniques applied to paper birch wood.

Surfacing method	$R_a$		$R_z$		$R_{sk}$		$R_{ku}$	
	$\parallel$	$\perp$	$\parallel$	$\perp$	$\parallel$	$\perp$	$\parallel$	$\perp$
(μm)								
Helical planing	9.5 <sup>1</sup> A <sup>3</sup> (0.2) <sup>2</sup>	11.6 A (0.4)	60 A (1)	204 A (4)	-1.0 A (0.1)	-1.9 A (0.1)	9.3 A (0.7)	10.9 A (1.4)
Face milling	8.0 B (0.2)	10.2 B (0.3)	51 B (2)	167 B (4)	-1.2 A (0.1)	-2.1 A (0.1)	8.9 A (0.5)	10.7 A (0.7)
Sanding	5.1 C (0.1)	6.3 C (0.1)	36 C (1)	145 C (5)	0.1 B (0.1)	-0.2 B (0.1)	10.3 A (0.8)	11.3 A (1.8)

<sup>1</sup> Means of 26 replicates

<sup>2</sup> Standard error of the mean in parentheses

<sup>3</sup> Means within a column followed by the same letter are not significantly different at the 5% probability level.

the insert knives (Stewart 1979). Fine dust, bent rays, and packets of microfibrils were dragged by the tools and likely clogged open vessels. The sanded samples showed the greatest level of fibrillation (Fig. 3.1a). Type III chips were also formed because of the negative rake angle of abrasive grains. Cell fractions, individual cells and groups of cells were detached from the surface and filled cell lumens. The parameter  $R_z$  was lower for the sanding process (Table 3.1). This confirms the fact that sanding brings the surface more uniform and reduces the influence of wood anatomy on the roughness profile. This observation has been reported previously (Richter et al. 1995; de Moura and Hernández 2006b).

### 3.4.2 Surface wettability

Helical planing showed the fastest wetting, followed by sanding and face milling (Fig. 3.4). The initial wetting for helical planed surfaces was faster thus suggesting that the coating will spread easily on the surface and will be able to fill the asperities properly. ESEM confirmed that up to two to three cells were often filled with the coating (Fig.3.2b). K-values show that helical planing induced good penetration and spreading characteristics (Fig. 3.4). Fibrillation as well as open vessels makes it possible for the coating to spread

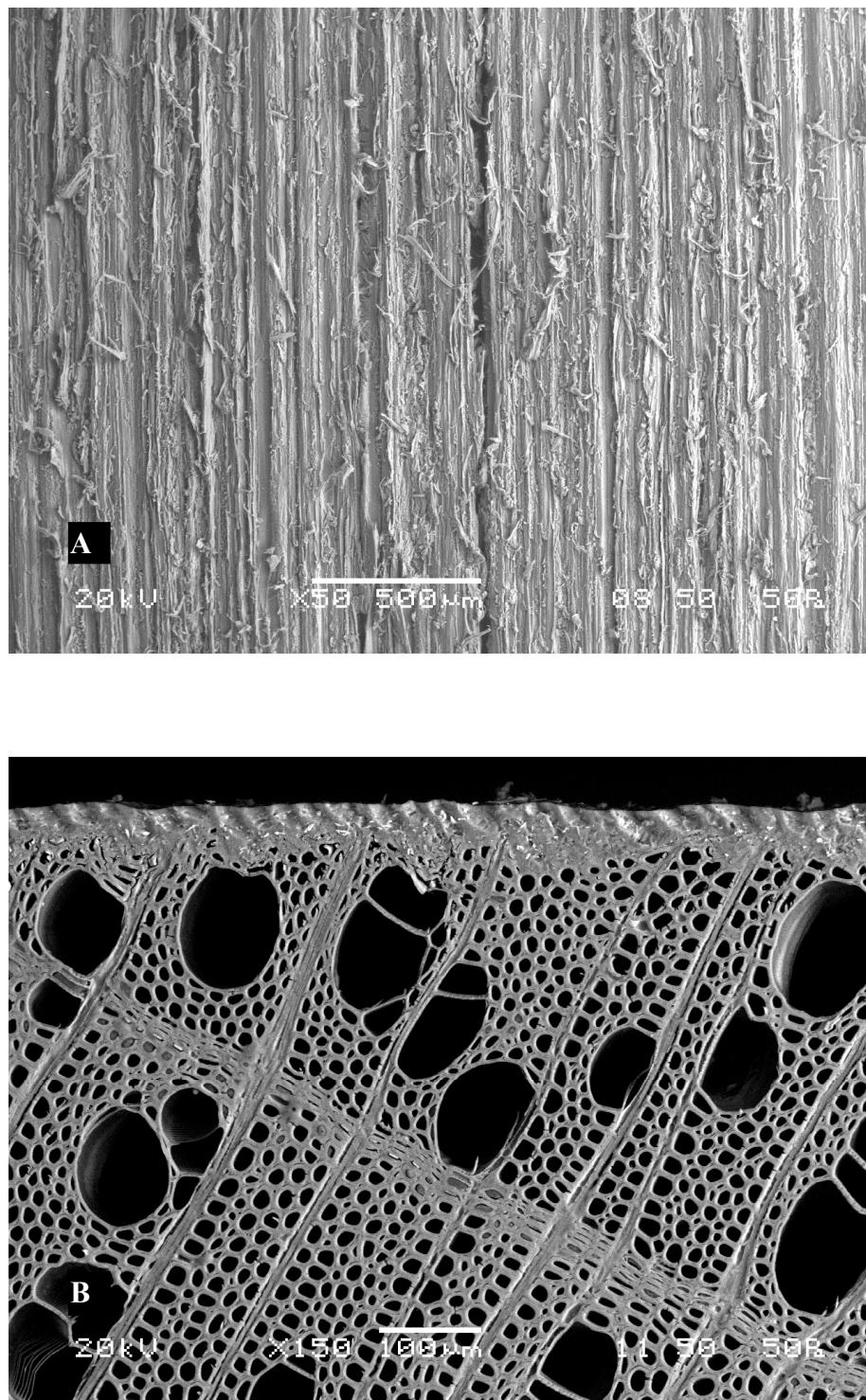


Figure 3.1: ESEM micrographs illustrating (A) top view and (B) transverse view for a sanded specimen.

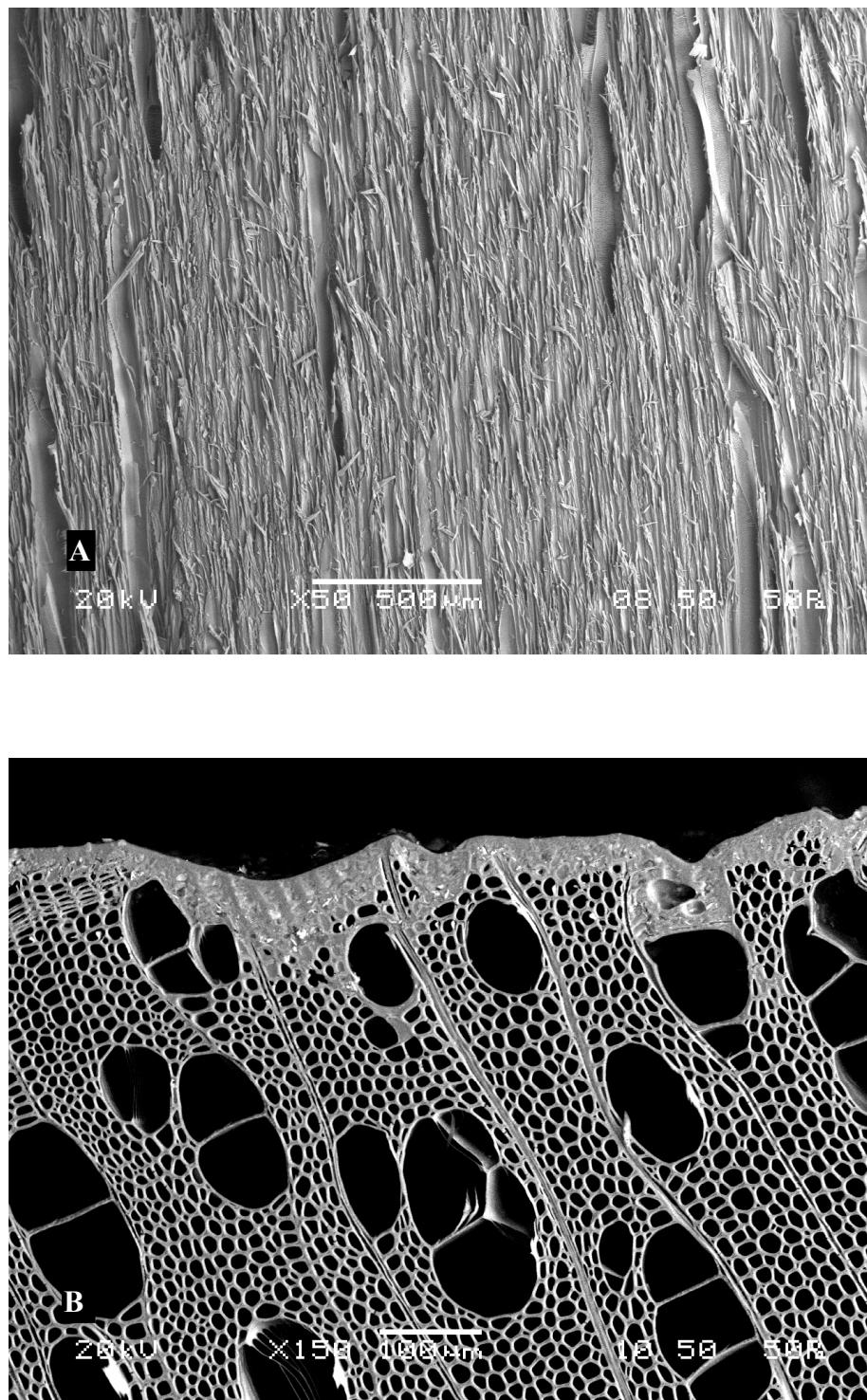


Figure 3.2: ESEM micrographs illustrating (A) top view and (B) transverse view for a helical planed specimen.

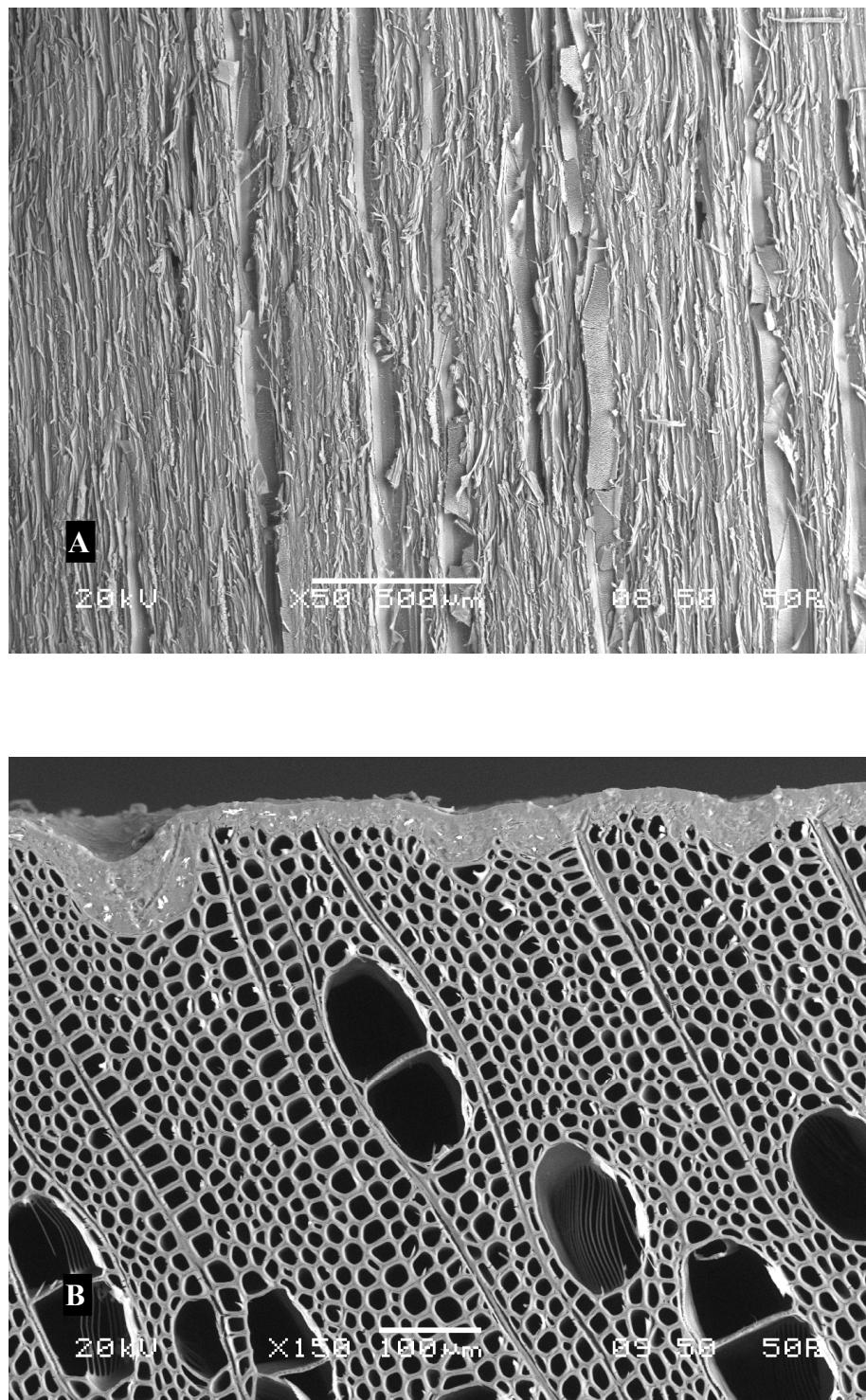


Figure 3.3: ESEM micrographs illustrating (A) top views and (B) transverse view for a face milled specimen.

and penetrate easily into the substrate (Fig. 3.2a). Face milling showed the worst wetting properties (Fig. 3.4). ESEM confirmed that the first row cells were filled with coating and that it rarely penetrated further (Fig. 3.3b). Sanded specimens had quite good overall wetting properties. The initial wetting was low, but the substrate absorbed the probe liquid constantly (Fig. 3.4). ESEM showed that only the first cells were filled with coating (Fig. 3.1b). Poor penetration and spreading properties are also pointed out by the k-value of sanded surfaces (Fig. 3.4). As noted by de Meijer et al. (1998), the damaged layer prevented the probe liquid to penetrate in the surface. The higher degree of fibrillation observed on the sanded surfaces could also have slowed down the process at the initial steps of wetting.

### 3.4.3 Adhesion tests

The pull-off strength was statistically similar for the two coatings before the aging treatment. After the aging treatment, the WB coating performed better than the SB lacquer regardless of the surfacing process (Table 3.2).

The helical planed surfaces showed slight lower adhesion before the aging treatment for both types of coatings. However, after aging, the WB coating lost up to 13% and the SB coating lost up to 37% of the adhesion strength (Table 3.2). This loss in adhesion was significantly lower than those produced by the surfaces machined by face milling or sanding (Table 3.2). A bigger loss in adhesion among the surfacing treatments could be detected with a more severe weathering treatment. Thus, it is possible to affirm that better long-term bonds were created with helical planing. Because lower superficial cell damage was observed for helical planing, a better mechanical adhesion took place. This adhesion was a result of the good wetting properties and the best quality of the fibrillation produced by this technique.

The sanded and face milled samples experimented similar aging effect (Table 3.2). The higher loss in strength resulted from a more important surface and subsurface damage. During the aging process, damage cells shrunk and swelled more, causing micro ruptures in the coating-substrate interface. The fibrillation on the surface could have shrunk and swelled through the aging process, which also weakened bonds.

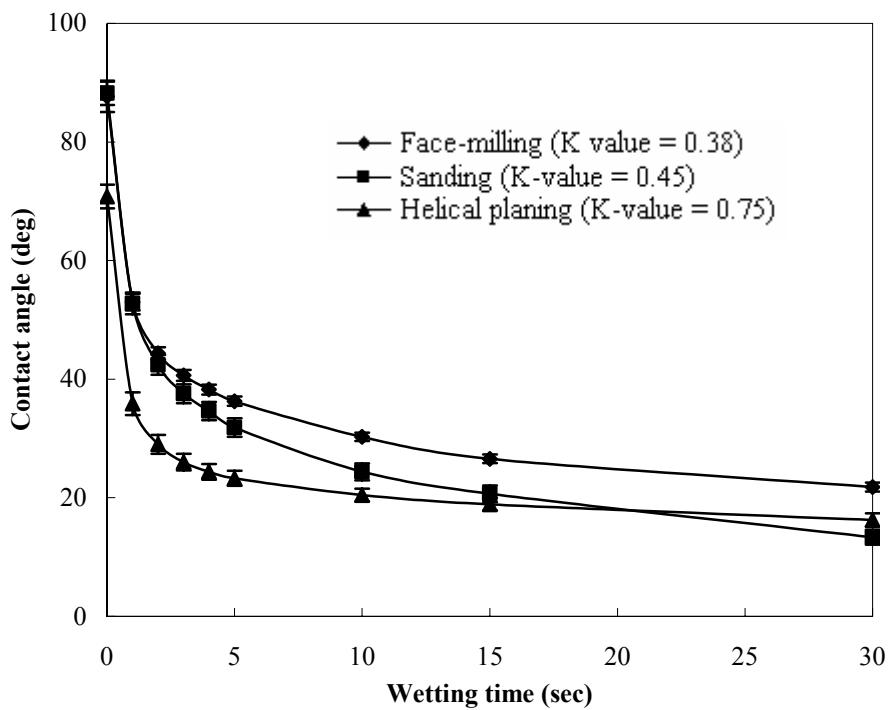


Figure 3.4: Contact angle evolution with wetting time for all treatments.

Table 3.2: Pull-off adhesion strength for a water-borne (WB) and a solvent-borne (SB) coating applied to paper birch wood machined by three surfacing methods.

Surfacing method	Pull-off adhesion before aging (MPa)		Pull-off adhesion after aging (MPa)		Adhesion loss (%)	
	WB	SB	WB	SB	WB	SB
Helical planing	5.1 <sup>1</sup> (0.2) <sup>2</sup>	A <sup>3</sup> a <sup>4</sup> (0.3)	4.6 Aa (0.2)	4.4 Aa (0.2)	2.9 Ba (0.2)	13 37
Face milling	5.9 Aa (0.2)	5.4 ABa (0.4)	4.3 Ba (0.3)	2.7 Ca (0.1)	27	50
Sanding	5.5 Aa (0.3)	5.4 Aa (0.3)	4.2 Ba (0.2)	3.0 Ca (0.1)	24	44

<sup>1</sup> Means of 26 replicates.

<sup>2</sup> Standard error of the means in parentheses.

<sup>3</sup> Means in a row followed by the same uppercase letter are not significantly different at the 5% probability level.

<sup>4</sup> Means in a column followed by the same lowercase letter are not significantly different at the 5% probability level.

### 3.5 Conclusions and recommendations

Although all three surfacing techniques generated samples having the same coating adhesion strength after the accelerated aging treatment, helical planing was the one that had lost the less adhesion strength throughout the aging treatment. Thus, helical planing showed the best potential for long-term utilization since the coating-substrate bond created was of better quality. Good cell-wall fibrillation, no subsurface damage and high wetting properties seemed to be the best combination to obtain good and long-term adhesion strength. Also, the water-borne coating proved to have better adhesion strength than the studied solvent-borne.

Further research needs to be done in order to determine the optimal level of cell-wall fibrillation and how to quantify it. Also, good wetting properties are essential to achieve good wood-coating adhesion strength but more research is needed to determine what parameter would describe it best. Face milling and helical planing were not performed under their optimal conditions. For instance, the optimal rake angle of both machining techniques was not determined. Once all cutting parameters are optimized, the helical planing and face milling should give even better results.

## Conclusions générales

Le présent projet a eu comme but d'évaluer l'aptitude à l'usinage de finition du bois de bouleau blanc (*Betula papyrifera* Marsh.). Le bouleau blanc est une espèce jusqu'à présent peu utilisée, bien qu'elle soit disponible en quantité importante dans les forêts québécoises. La maîtrise des procédés de préparation des surfaces est donc une étape très importante dans le but de faire la promotion de cette espèce pour des applications à valeur ajoutée.

Le présent travail s'est divisé en deux volets. Le premier a porté sur l'optimisation de la qualité de surface en fonction de l'épaisseur de coupe et de la vitesse d'avance de deux procédés de rabotage de finition, l'un en coupe hélicoïdale en direction transversale et l'autre en coupe rotative. L'objectif général du projet étant d'éliminer l'étape du ponçage, la qualité de surface de ce procédé a par la suite été comparée à celle produite par les deux techniques de rabotage initialement utilisées. Cette comparaison a été réalisée en termes de la qualité de surface produite ainsi qu'au moyen de l'évaluation de la performance de deux types de revêtements de finition.

Une cinquantaine de planches de 1,2 m de longueur ont été utilisées pour effectuer les expérimentations. Dans un premier temps, 27 planches ont servi à étudier et à optimiser certains paramètres de coupe du rabotage hélicoïdal et du rabotage rotatif dans le but d'appliquer un revêtement de finition à base de solvant organique. Par la suite, 26 planches ont été utilisées dans le but de comparer la qualité de surface et l'adhésion de surfaces rabotées en coupe hélicoïdale, en coupe rotative et poncées. Deux types de produits de finition ont été étudiés soit, l'un à base de solvant organique et l'un à base de solvant inorganique. La qualité de surface avant l'application du produit de finition a été évaluée par le biais de la rugosité, de la mouillabilité et de l'analyse au microscope électronique à balayage environnemental (MEBE).

Les résultats du premier volet de l'expérience ont montré que l'épaisseur de coupe n'a eu aucun effet sur la qualité de surface, ni sur l'adhésion, des échantillons rabotés en coupe hélicoïdale. Les surfaces obtenues furent exemptes de tout défaut visible. Par ailleurs, l'étude de microphotographies prises au MEBE a révélé l'absence d'écrasement cellulaire sous la surface.

Pour les échantillons rabotés en coupe rotative, l'épaisseur de coupe n'a eu non plus aucun effet significatif sur la qualité de surface ni sur la résistance à l'arrachement. La qualité de surface a par contre été affectée par la vitesse d'avance du bois. Une augmentation de cette vitesse était traduite par une augmentation de la rugosité de surface et de sa mouillabilité. Des défauts de type fil arraché ont été observés sur les échantillons rabotés avec une vitesse d'avance élevée. La MEBE a révélé la présence d'un léger endommagement cellulaire sous la surface. Les rayons étaient souvent fléchis et les cellules avoisinantes déformées. La gravité de cet endommagement a semblé augmenter avec la vitesse d'avance et l'épaisseur de coupe. Des microfissures ont également été observées sous le plan de coupe. Une vitesse d'avance élevée de même que le traitement de vieillissement appliqué ont amplifié ce type de défaut, ce qui a dû compromettre la qualité de l'adhésion du verni à la surface. La perte d'adhésion entre 5,5 et 36,8 m/min de vitesse d'avance a été en effet d'environ 14%. Malgré cela, cette perte n'a pas été statistiquement significative.

Les échantillons rabotés en coupe hélicoïdale ont montré une résistance à l'adhésion après vieillissement plus élevée que ceux rabotés en coupe rotative. L'absence d'érasrement cellulaire sous la surface et les meilleures propriétés de mouillage des surfaces rabotées en coupe hélicoïdale a permis d'obtenir une meilleure adhésion. L'augmentation de l'angle d'attaque permettrait d'améliorer encore la qualité de surface, particulièrement celle des pièces rabotées en coupe rotative dont l'angle d'attaque était très faible, soit 15°.

Dans le second volet de recherche, les surfaces rabotées en coupe hélicoïdale, rabotées en coupe rotative et celles poncées ont été évaluées dans le but de déterminer le procédé produisant la meilleure qualité de surface et la meilleure adhésion. La coupe hélicoïdale a produit la rugosité la plus élevée, le niveau de fibrillation le plus faible, les meilleures propriétés de mouillage et la meilleure adhésion après vieillissement, et ce, pour les deux types de revêtements étudiés. Conformément aux observations précédentes, ce type de rabotage n'a généré aucun érasrement cellulaire, ni défaut visible en surface. Le rabotage en coupe rotative a permis d'obtenir une rugosité et une fibrillation intermédiaires, des propriétés de mouillage faibles et une bonne adhésion avant vieillissement pour les deux finis essayés. Un léger endommagement cellulaire a été noté sous forme de rayons fléchis, de cellules déformées et de micro-ruptures. Les surfaces poncées furent celles ayant

présenté la plus faible rugosité, le plus haut niveau de fibrillation, des propriétés de mouillage intermédiaires et une bonne adhésion avant vieillissement pour les deux types de revêtements utilisés. La sous-surface était clairement endommagée, les cellules étaient écrasées et des microfissures étaient facilement visibles.

Le revêtement à base d'eau a offert une plus grande résistance à l'adhésion que celui à base de solvant organique, notamment après vieillissement. Le revêtement à base de solvant organique est peut être plus rigide que celui à base d'eau. Ce dernier peut donc suivre la déformation du bois lors du gonflement et du retrait ce qui réduit la formation et la propagation de micro-ruptures. Sa résistance fut donc plus conservée suite au vieillissement accéléré. Des différences d'ordre chimique et physique, telle la viscosité, pourraient aussi expliquer les différences significatives qui furent observées.

Finalement, les résultats démontrent que le bouleau blanc se travaille bien et que cette espèce pourrait s'intégrer facilement dans l'industrie de la seconde transformation. Toutefois, l'optimisation des différents paramètres de coupe est nécessaire afin d'obtenir des produits d'excellente qualité, et ce, à un moindre coût.

Dans le cas de la coupe hélicoïdale, l'augmentation de l'angle d'hélice ainsi que de l'angle d'attaque permettrait d'améliorer la qualité de surface en réduisant d'une part les vibrations générées lors de la coupe, et, d'autre part, les forces de coupe.

Pour la coupe rotative, l'angle d'attaque utilisé a semblé un peu faible. Son augmentation devrait minimiser les forces de coupe ce qui pourrait limiter la formation de copeaux de type III. La qualité de surface serait donc meilleure suite à une réduction ou élimination de l'endommagement cellulaire.

Par ailleurs, l'effet de l'usure des outils de coupe ainsi que le phénomène d'inactivation de la surface méritent toute notre attention.

Certains travaux restent également à faire en ce qui concerne l'établissement d'une méthodologie adéquate pour l'évaluation de la qualité de la surface. Il pourrait alors être intéressant d'établir un paramètre qui caractériserait le mieux les surfaces rabotées et donnerait une bonne indication de leur potentiel d'adhésion. Des méthodes pour quantifier

l'endommagement cellulaire et la fibrillation des surfaces du bois seraient également un atout important.

## Bibliographie

- American Society for Testing and Materials. 1987. *ASTM D 1666. Standard methods for conducting machining tests of wood and wood base materials.* Philadelphia, PA.
- American Society for Testing and Materials. 1995. *ASTM D 4541. Standard test method for pull-off strength of coatings using portable adhesion testers.* Philadelphia, PA.
- American Society for Testing and Materials. 1997. *ASTM D 907. Standard terminology of adhesives.* Philadelphia, PA.
- American Society for Testing and Materials. 1997. *ASTM D 3359. Standard test methods for measuring adhesion by tape test.* Philadelphia, PA.
- American Society for Testing and Materials. 1998. *ASTM D 3459. Standard test method for humid-dry cycling for coatings on wood and wood products.* Philadelphia, PA.
- Arnold, M., W.C. Feist et R.S. Williams. 1992. *Effect of weathering of new wood on the subsequent performance of semitransparent stains.* Forest Products Journal, 42(3):10-14.
- Aydin, I. et G. Colakoglu. 2005. *Effects of surface inactivation, high temperature drying and preservative treatment on surface roughness and colour of alder and beech wood.* Applied Surface Science, 252(2):430-440.
- Axelsson, B.O.M. 1994. *Lateral cutting force during machining of wood due to momentary disturbances in the wood structure and degree of wear of the cutting tool.* Holz als Roh-und Werkstoff, 52(3):198-204.
- Back, E.L. 1991. *Oxidative activation of wood surfaces for glue bonding.* Forest Products Journal, 41(2):30-36.
- Back, E. et E. Sandström. 1982. *Critical aspects on accelerated methods for predicting weathering resistance of wood based panels.* Holz als Roh- und Werkstoff, 40(2):61-75.
- Beaty, W.T. 1983. *Preparing wood for finishing.* In: Finishing eastern hardwoods. Sous la dir. de Carter, R.M. Forest Products Research Society, Madison, pages 15-28.
- Boehme, C. et G. Hora. 1996. *Water absorption and contact angle measurement of native European, North American and tropical wood species to predict gluing properties.* Holzforschung, 50(3):269-276.

- Brinkmann, S., H. Bodschwinna et H.-W. Lemke. 2000. *Development of a robust Gaussian regression filter for three-dimensional surface analysis.* Tenth International Colloquium on Surfaces, tenu à Chemnitz, Germany, du 31 janvier au 1<sup>er</sup> février 2000, 11 pp.
- Burdurlu, E, I. Usta, M. Ulupinar, B. Aksu et T.C Erarslan. 2005. *The effect of the number of blades and the grain size of abrasives in planing and sanding on the surface roughness of European black pine and Lombardy poplar.* Turkish Journal of Agriculture and Forestry, 29(4):315-321.
- Burdurlu, E., Y. Kiliç, G.C. Elibol et M. Kiliç. 2006. *The shear strength of Calabrian pine (*Pinus brutia Ten.*) bonded with polyurethane and polyvinyl acetate adhesives.* Journal of Applied Polymer Science, 99(6):3050-3061.
- Cantin, M. 1967. *Propriétés d'usinage de 16 essences de bois de l'Est du Canada.* Direction générale des Forêts. Publication n° 1111 S. 31 pp.
- Carrano, A.L, J.B. Taylor et R. Lemaster. 2002. *Parametric characterization of peripheral sanding.* Forest Products Journal, 52(9):44-50.
- Carrano, A.L, J.B. Taylor et R. Lemaster. 2004. *Machining-induced subsurface damage of wood.* Forest Products Journal, 54(1):85-91.
- Caster, D., N. Kutscha et G. Leick. 1985. *Gluability of sanded lumber.* Forest Products Journal, 35(4):45-52.
- Christiansen, A.W. 1990. *How overdrying wood reduces its bonding to phenol-formaldehyde adhesives: a critical review of the literature. Part I. Physical responses.* Wood and Fiber Science, 22(4):441-459.
- Collett, B.M. 1972. *A review of surface and interfacial adhesion in wood science and related fields.* Wood Science and Technology, 6:1-42.
- Couvrat, P. 1990. *Le collage moderne.* Hermès, Paris, 63 pp.
- Cyra, G. C. Tanaka et T. Nakao. 1996. *On-line control of router feed speed using acoustic emission.* Forest Products Journal, 46(11/12):27-32.
- Davis, E.M. 1942. *Machining and related characteristics of Southern hardwoods.* Technical bulletin n°824. United States Department of Agriculture, Washington D.C. 42 pp.
- de Meijer, M., K. Thurich et H. Militz. 1998. *Comparative study on penetration characteristics of modern wood coatings.* Wood Science and Technology, 32(5):347-365.

- de Meijer, M. et H. Militz. 1998. *Wet adhesion measurements of wood coatings*. Holz als Roh- und Werkstoff, 56(5):306.
- de Meijer, M., K. Thurich et H. Militz. 2001. *Quantitative measurements of capillary coating penetration in relation to wood and coating properties*. Holz als Roh- und Werkstoff, 59(1/2):35-45.
- de Meijer, M. 2001. *Review on the durability of exterior wood coatings with reduced VOC-content*. Progress in Organic Coatings, 43(4):217-225.
- 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.
- Deniston, G.L. 1949. *The science of modern wood finishing; a digest of modern materials and methods for industrial finishers and home craftsmen*. Research Press, Dayton, Ohio, 386 pp.
- Dight, J.F. 1966. *Adhesion to a very porous substrate*. Aspects of Adhesion, vol. 4, actes des conférences tenues à The City University, EC1, Angleterre, du 20 au 21 avril 1966, sous la dir. de Alner, D.J., pages 47-64.
- Dolenko, A.J., R.L. Desai et M.R. Clarke. 1974. *Application parameters for water-based coatings on wood products*. Journal of the Institute of Wood Science, 6(5):18-22.
- Elbez, G. et D. Bentz. 1991. *Le collage du bois*. CTBA, Paris, 215 pp.
- Estrada, N. 1958. *Exposure characteristics of clear finishes for exterior wood surfaces*. Forest Products Journal, 5(2):66-72.

- Feist, W.C. 1983. *Weathering and protection of wood*. Actes du 79<sup>th</sup> Annual Meeting of American Wood Preservers Association, tenu à Kansas City, MO Stevensville, MD American Wood Preservers Association, du 17 au 29 avril 1983, volume 79, pages 195-205.
- Feist, W.C. 1988. *Role of pigment concentration in the weathering of semitransparent stains*. Forest Products Journal, 38(2):41-44.
- Feist, W.C., J.K. Little and J.M. Wenesheimer. 1985. *The moisture-excluding effectiveness of finishes on wood surfaces*. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, Madison, Wisconsin, États-Unis. 38 pp.
- Franz, N.C. 1958. *An analysis of the wood-cutting process*. The University of Michigan Press, Michigan. 152 pp.
- Fujiwara, Y. 2004. *Evaluation of wood surface roughness as related to tactile roughness*. Thèse de doctorat, Écoles des Études Supérieures en Agriculture, Université de Kyoto, Kyoto, Japon. 67 pp.
- Garrett, H.E. 1964. *Contact angles and their significance for adhesion*. Aspects of Adhesion, vol. 2, actes des conférences tenues à Northampton College of Advanced Technology, EC1, Angleterre, du 23 au 24 mars 1964, sous la dir. de Alner, D.J., pages 19-41.
- Gindl, M., A. Reiterer, G. Sinn et S.E. Stanzl-Tschegg. 2004. *Effects of surface ageing on wettability, surface chemistry, and adhesion of wood*. Holz als Roh- und Werkstoff, 62(4):273-280.
- Gray, V.R. 1964. *Contact angles, surface tensions and adhesion*. Aspects of Adhesion, vol. 2, actes des conférences tenues à Northampton College of Advanced Technology, EC1, Angleterre, du 23 au 24 mars 1964, sous la dir. de Alner, D.J., pages 42-48.
- Gurău, L., H. Mansfield-Williams et M. Irle. 2005a. *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. 2005b. *Processing roughness of sanded wood surfaces*. Holz als Roh und Werkstoff, 63(1):43-52.
- 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.

- Hall, A. et J. Heard. 1982. *Wood finishing and refinishing*. Holt, Rinehart and Winston, New York, 196 pp.
- Hernández, R.E. 1994. *Effect of two wood surfacing methods on the gluing properties of sugar maple and white spruce*. Forest Products Journal, 44(7/8):63-66.
- Hernández, R.E. et N. Naderi. 2001. *Effect of knife jointing on the gluing properties of wood*. Wood and Fiber Science, 33(2):292-301.
- Hernández, R.E., C. Bustos, Y. Fortin 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 northern red oak wood*. Wood and Fiber Science, 34(4):540-552.
- Heurtematte, J., M. Orus, P. Pouzeau et R. Le Sage. 1985. *Usinage du bois: à l'usage des élèves des enseignements technologiques, des professionnels de l'industrie intéressés par la formation permanente*. Delagrave, Paris, 127 pp.
- Hoadley, R.B. 2000. *Understanding wood: a craftsman's guide to wood technology*. Taunton Press, Newtown, Connecticut, 256 pp.
- Hu, C. et M.T. Afzal. 2005. *Automatic measurement of wood surface roughness by laser imaging. Part 1: Development of laser imaging system*. Forest Products Journal, 55(12):158-163.
- Huang, Y.-S. 1994a. *Cutting force components in orthogonal cutting parallel to the grain (90-0) II. Effects of feed lengths*. Mokuzai Gakkaishi, 40(10):1059-1066.
- Huang, Y.-S. 1994b. *Cutting force components in orthogonal cutting parallel to the grain (90-0) I. Effects of the rake angles*. Mokuzai Gakkaishi, 40(10):1134-1140.
- Huntsberger, J.R. 1963. *The relationship between wetting and adhesion*. Advances in Chemistry series 43: Contact angle, wettability, and adhesion. Actes du Kendall Award Symposium, tenu à Los Angeles, Californie, États-Unis, du 2 au 3 avril 1963, pages 180-188.
- International Organization for Standardization. 1998. *ISO 4287. Geometrical product specifications (GPS) – Surface Texture: profile method – Terms – Definition and surface texture parameters*. British Standards Institute, London.
- International Organization for Standardization. 1996. *ISO 11562. Geometrical product specifications (GPS) – Surface Texture: profile method – Metrological characteristics of phase correct filters*. British Standards Institute, London.

- International Organization for Standardization. 1996. *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. (cité par Gurău 2006).
- 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. (cité par Gurău 2006).
- Iskra, P. et Tanaka, T. 2005. *The influence of wood fiber direction, feed rate and cutting width on sound intensity during routing.* Holz als Roh- und Werkstoff, 63(3):167-172.
- Jessome, A.P. 1977. *Résistance et propriétés connexes des bois indigènes au Canada.* Rapport Technique de Foresterie 21. Laboratoire des Produits Forestiers de l'Est, Ottawa, Ontario, 37 pp.
- Jin, W. et L. Cai. 1996. *Study and analysis on cutting forces of oblique cutting of wood.* Holz als Roh- und Werkstoff, 54(4):283-286.
- Jin, W. et L. Cai. 1997. *Study on the normal component force in oblique cutting of wood.* Holz als Roh- und Werkstoff, 55(2):118-120.
- 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, 433 pp.
- Jokerst, R.W. et H.A. Stewart. 1976. *Knife- versus abrasive-planed wood: quality of adhesive bonds.* Wood and Fiber, 8(2):107-113.
- Jones, C.W. 1994. *Cutterheads and knives for machining wood.* C.W. Jones, Seattle, WA, 138 pp.
- Juan, J. 1992. *Comment bien usiner le bois.* Département Ameublement, CTBA, Paris, 140 pp.
- Kalnins, M.A. et W.C. Feist. 1993. *Increase in wettability of wood with weathering.* Forest Products Journal, 43(2):55-57.
- Kazayawoko, M., A.W. Neumann et J.J. Balatinecz. 1997. *Estimating the wettability of wood by the axisymmetric drop shape analysis-contact diameter method.* Wood Science and Technology, 31(2):87-95.
- Kilic, M., S. Hiziroglu et E. Burdulu. 2006. *Effect of machining on surface roughness of wood.* Building and Environment, 41(8):1074-1078.

- Kimerling, A.S. et S.R. Bhatia. 2004. *Block copolymers as low-VOC coatings for wood: characterization and tannin bleed resistance.* Progress in Organic Coatings, 51(1):15-26.
- Koch, P. 1955. *An analysis of the lumber planing process: Part I.* Forest Products Journal, 5(4):255-264.
- Koch, P. 1964. *Wood machining processes.* Ronald Press, New York, 530 pp.
- Koch, P. 1976. *Prototype flaking head smooths surfaces left by headrig or edger chipping heads.* Forest Products Journal, 26(12):22-27.
- Koch, P. 1985. *Utilization of hardwoods growing on southern pine sites.* Volume II. Processing. Agriculture handbook N°. 605, USDA, Forest Service, Washington, DC.
- Komatsu, M. 1993. *Machining performance of a router bit in the peripheral milling of wood I. Effects of the radial rake angle of the peripheral cutting-edge on the cutting force and machined-surface roughness.* Mokuzai Gakkaishi, 39(6):628-635.
- Lavery, D.J, D. McLarnon, J.M. Taylor, S. Moloney et A. Atanockovic. 1995. *Parameters affecting the surface finish of planed Sitka spruce.* Forest Products Journal, 45(8):45-50.
- 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 14<sup>th</sup> International Wood Machining Seminar, tenu à Paris, Espinal et Cluny, France, du 12 au 19 septembre 1999, pages 479-488.
- Lewis, A.F. et L.J. Forrestal. 1969. *Adhesion of coatings.* In: Treatise on Coatings. Volume 2. Characterization of Coatings: Physical Techniques. Marcel Dekker, New York, pages 57-98.
- Lihra, T. et S. Ganev. 1999. *Machining properties of eastern species and composite panels.* Forintek Canada Corp., Division de l'Est, Ste-Foy, Québec, 62 pp.
- Liptáková, E. et J. Kúdela. 1994. *Analysis of the wood-wetting process.* Holzforschung, 48(2):139-144.
- Lister, S. 1948. *Sanders and sanding.* Lomax, Erskine & Co., Londres, 76 pp.
- 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.

- Maldas, D.C. et D.P. Kamdem. 1999. *Wettability of extracted southern pine*. Forest Products Journal, 49(11/12):91-93.
- McKenzie, W.M. 1960. *Fundamental aspects of the wood cutting process*. Forest Products Journal, 10(9):447-456.
- McKenzie, W.M. et N.C. Franz. 1964. *Basic aspects of inclined or oblique wood cutting*. Forest Products Journal, 14(12):555-566.
- Middleton, T.M. 1993. *Coating/wood substrate behaviour in Dacrydium cupressinum, Podocarpus dacrydioides and Pinus radiata weatherboards*. Wood Science and Technology, 27(5):357-371.
- Middleton, T.M. 1996. *An electron microscope study of coated weatherboards from three timber species*. Surface Coatings Australia, 33(3):26-30.
- Mitchell, P.H. et R.L. Lemaster. 2002. *Investigation of machine parameters on the surface quality in routing soft maple*. Forest Products Journal, 52(6):85-90.
- 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.
- Mullins, E.J. et T.S. McKnight. 1981. *Le bois du Canada, leurs propriétés et leurs usages*. Éditions du Pélican (Québec) conjointement avec le service canadien des forêts (Environnement Canada) et le centre d'édition du gouvernement du Canada. 389 pp.
- Mummery, L. 1992. *Surface texture analysis. The handbook*. Hommelwerke GmbH, West Germany, 106 pp.
- Murmanis, L., B.H. River et H.A. Stewart. 1983. *Microscopy of abrasive-planed and knife-planed surfaces in wood-adhesive bonds*. Wood and Fiber Science, 15(2):102-115.
- Murmanis, L., B.H. River et H.A. Stewart. 1986. *Surface and subsurface characteristics related to abrasive-planing conditions*. Wood and Fiber Science, 18(1):107-117.
- Naderi, N. et R.E. Hernández. 1999. *Effect of planing on physical and mechanical properties of sugar maple wood*. Wood and Fiber Science, 31(3):283-292.
- Nepveu, G. et T. Tran Ngoc. 1984. *Relations entre les composantes densitométriques et l'état de surface de planches rabotées chez Pseudotsuga menziesii*. Annales des Sciences Forestières, 41(5):171-194.
- Nussbaum, R.M. 1999. *Natural surface inactivation of Scots pine and Norway spruce evaluated by contact angle measurements*. Holz als Roh- und Werkstoff, 57(6):419-424.

- 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.
- Ojala, S., U. Lassi et R.L. Keiski. 2006. *Testing VOC emission measurement techniques in wood-coating industrial processes and developing a cost-effective measurement methodology*. Chemosphere, 62(1):113-120.
- Ozaki, S. et S. Kimura. 1989. *The oblique cutting of wood. V. Splits below the cutting plane and the ratio of shrinkage of the chips in a 90°-90° cutting situation*. Mokuzai Gakkaishi, 35(10):896-904.
- Palmquist, J. 2003. *Parallel and normal cutting forces in peripheral milling of wood*. Holz als Roh-und Werkstoff, 61(6):409-415.
- 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.
- Parker, R.S.R. et P. Taylor. 1966. *Adhesion and adhesives*. Pergamon Press, Oxford, 142 pp.
- Podgorski, L., V. Georges, N. Condomines et J.-D. Lanvin. 2004. *Adhesion measurements methods*. Cost E18- Wood and Coating Systems for Wood- Symposium on measurement methods, tenu à Copenhague, Danemark, du 16 au 17 février 2004, 6 pp.
- Ratnasingam, J. et F. Scholz. 2006. *Optimal surface roughness for high-quality finish on rubberwood (*Hevea brasiliensis*)*. Holz als Roh-und Werkstoff, 64(4): 343-345.
- Rice, R.W. et D.P. Phillips. 2001. *Estimating the moisture excluding effectiveness of surface coatings on Southern Yellow pine using acoustic emission technology*. Wood Science and Technology, 34(6):533-542.
- Richter, K., W.C. Feist et M.T. Knaebe. 1995. *The effect of surface roughness on the performance of finishes. Part 1. Roughness characterization and stain performance*. Forest Products Journal, 45(7/8):91-97.
- Rijckaert, V., M. Stevens, J. Van Acker, M. de Meijer et H. Militz. 2001a. *Quantitative assessment of the penetration of water-borne and solvant-borne wood coatings in Scots pine sapwood*. Holz als Roh- und Werkstoff. 59(4):278-287.
- Rijckaert, V., M. Stevens et J. Van Acker. 2001b. *Effect of some formulation parameters on the penetration and adhesion of water-borne primers into wood*. Holz als Roh- und Werkstoff. 59(5):344-350.
- River, B.H. et V.P. Miniutti. 1975. *Surface damage before gluing-weak joints*. Wood and Wood Products, 80(7):35-36,38.

- Rozumek, O. et G. Elbez. 1985. *Étude de la mouillabilité du pin maritime par une résine urée-formol.* Holzforschung, 39(4):239-243.
- Saloni, D.E., R.L. Lemaster et S.D. Jackson. 2005. *Abrasive machining process characterization on material removal rate, final surface texture, and power consumption for wood.* Forest Products Journal, 55(12):35-41.
- Sandak, J. et C. Tanaka. 2003. *Evaluation of surface smoothness by laser displacement sensor 1: effect of wood species.* Journal of Wood Science, 49(4):305-311.
- Šernek, M., F.A. Kamke et W.G. Glasser. 2004. *Comparative analysis of inactivated wood surface.* Holzforschung. 58(1):22-31.
- Shi, S.Q. et D.J. Gardner. 2001. *Dynamic adhesive wettability of wood.* Wood and Fiber Science, 33(1):58-68.
- Sinn, G., M. Ginkl, A. Reiterer et S. Stanzl-Tschegg. 2004. *Changes in the surface properties of wood due to sanding.* Holzforschung. 58(3):246-251.
- Soltys, K. 2000. *Nonstaining water-based coatings for cedar siding.* MA Environmental Technology Research Needs, Massachussets Executive Office of Environmental Affairs.(cité par Kimerling et Bhatia 2004).
- Stehr, M. et I. Johansson. 2000. *Weak boundary layers on wood surfaces.* Journal of Adhesion Science and Technology, 14(10):1211-1224.
- Stehr, M. et S. Östlund. 2000. *An investigation of the crack tendency on wood surfaces after different machining operations.* Holzforschung, 54(4):427-436.
- Stewart, H.A. 1969. *Effect of cutting direction with respect to grain angle on the quality of machined surface, tool force components and cutting friction coefficient.* Forest Products Journal, 19(3):43-46.
- Stewart, H.A. 1970. *Cross-grain knife planing improves surface quality and utilization of aspen.* USDA, Forest Service, Research Note, North Central Forest Experiment Station, n° NC-127, 4 pp.
- Stewart, H.A. 1971a. *Chip formation when orthogonally cutting wood against the grain.* Wood Science, 3(4):193-203.
- Stewart, H.A. 1971b. *Chips produced with a helical cutter.* Forest Products Journal, 21(5):44-45.
- Stewart, H.A. 1974. *Face milling can improve for surfacing and flaking.* Forest Products Journal, 24(2):58-59.

- Stewart, H.A. 1975. *Knife planing across the grain can be applied to hardwoods*. USDA, Forest Service, Research Note, North Central Forest Experiment Station, n° NC-196, 4 pp.
- Stewart, H.A. 1977. *Optimum rake angle related to selected 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. 1983. *Cutting forces and surface and flake quality from face-milling combinations*. Forest Products Journal, 33(7/8):27-32.
- Stewart, H.A. 1984. *Resultant force and surface quality from some face-milling variables*. Forest Products Journal, 34(5):27-32.
- Stewart, H.A. 1985. *Determining face-milling radial rake angle to reduce exit edge tear-out in yellow poplar*. Forest Products Journal, 35(7/8):57-58.
- Stewart, H.A. 1986. *Fixed knife-pressure bar system for surfacing dry wood*. Forest Products Journal, 36(6):52-56.
- Stewart, H.A. 1988. *How to determine rake angles from strength properties of wood*. Wood and Wood Products, (10):121-126.
- Stewart, H.A. 1989. *Fixed-knife pressure-bar planing method reduces or eliminates subsurface damage*. Forest Products Journal, 39(7/8):66-70.
- Stewart, H.A. et W.F. Lehmann. 1974. *Cross-grain cutting with segmented helical cutters produces good surfaces and flakes*. Forest Products Journal, 24(9):104-106.
- Stewart, H.A. et J.B. Crist. 1982. *SEM examination of subsurface damage of wood after abrasive and knife planing*. Wood Science, 14(3):106-109.
- Stewart, H.A. et P.D. Parks. 1980. *Peripheral milling across the grain with rake angle up to 60°*. Forest Products Journal, 30(6):54-57.
- Stewart, J.S. 1975b. *Noise-reducing tooling for planer noise control*. Modern Sawmill Techniques, vol. 4, actes du 4<sup>th</sup> Sawmill Clinic, pages 174-187. H.G. Lambert, Saint Francisco, Ca.: Miller Freeman Publ., Inc.
- Stewart, J.S. 1978. *Wood planer cutterhead design for reduced noise level*. U.S. Patent 4.074.737. U.S. Patents Office, Washington, D.C., 6 pp.

- Stewart, J.S. 1981. *An overview of sources and source controls for woodworking machinery noise*. Actes du Noise-Con 81 National Conference on Noise Control Engineering, tenu à l'Université de la Caroline du Nord, Caroline du Nord, États-Unis, pages 305-310.
- Stewart, J.S. et F.D. Hart. 1976. *Control of industrial wood planer noise through improved cutterhead design*. Noise Control Engineering, 7(1):4-9.
- Stumbo, D.A. 1963. *Surface texture measurement methods*. Forest Products Journal, 13(7):299-304.
- Suleman, Y.H. et S.H. Rashid. 1999. *Chemical treatment to improve wood finishing*. Wood and Fiber Science, 31(3):300-305.
- 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):41-46.
- Tichy, R.J. 1997. *Interior wood finishing: industrial use guide*. Forest Products Society, Madison, 124 pp.
- 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.
- Usenius, A. 1975. *Surface smoothness measurement of sawn timber*. Papper och Trä, 12:871-875.
- Vick, C.B. 1999. *Adhesive bonding of wood materials*. Wood Handbook. Forest Products Laboratory. Madison, WI, USDA, Forest Service, Chapter 9, pp 1-24.
- Wei, H., N. Ulkem, D. Berk et G.J. Kubes. 2006. *Wetting and absorption on wood surface with surfactants*. Paper and Timber. 88(1):51-55.
- Wengert, G. 1988. *The wood doctor's RX*. Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Va.
- Wenzel, R.N. 1936. *Resistance of solid surfaces to wetting by water*. Industrial and Engineering Chemistry, 28(8):988-994.
- Williams, D. et R. Morris. 1998. *Machining and related mechanical properties of 15 B.C. wood species*. Forintek Canada Corp., Division de l'Ouest, Vancouver, B.C., 31 pp.

- Williams, R.S. et W.C. Feist. 1994. *Effect of preweathering, surface roughness, and wood species on the performance of paint and stains.* Journal of Coatings Technology, 66(828):109-121.
- Woodson, G.E. et P. Koch. 1970. *Tool forces and chip formation in orthogonal cutting of loblolly pine.* Forest Service Research Paper SO-52. U.S. Department of Agriculture.
- Wulf, M., P. Netuschil, G. Hora, P. Schmich et H.K. Cammenga. 1997. *Investigation of the wetting characteristics of medium density fibreboards (MDF) by means of contact angle measurements.* Holz als Roh- und Werkstoff, 55(5):331-335.
- Zhang, H.J., D.J. Gardner, J.Z. Wang et Q. Shi. 1997. *Surface tension, adhesive wettability, and bondability of artificially weathered CCA-treated southern pine.* Forest Products Journal, 47(10):69-72.
- Zhang, L.Z. et J.L. Niu. 2003. *Mass transfer of volatile organic compound from painting material in a standard field and laboratory emission cell.* International Journal of Heat and Mass Transfer, 46:2415-2423.