

CHRISTIAN DAGENAIIS

**ABOUTAGE DE L'ÉRABLE À SUCRE POUR LA
FABRICATION DE PRODUITS DE BOIS
D'INGÉNIERIE STRUCTURAUX**

Mémoire présenté
à la Faculté des études supérieures de l'Université Laval
dans le cadre du programme de maîtrise en Sciences du Bois
pour l'obtention du grade de maître ès sciences (M.Sc.)

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

JUILLET 2007

©Christian Dagenais, 2007

Résumé

Le bois abouté est souvent utilisé dans la fabrication de produits de bois d'ingénierie structuraux tels que le lamellé-collé et la poutrelle en I. Au Québec, les fabricants de produits de bois d'ingénierie utilisent principalement du bois du groupe Épinette-pin-sapin (EPS) qui comporte des essences de résineux acceptées dans les normes canadiennes. Étant un bois de feuillus, l'érable à sucre n'est pas une essence prescrite dans les normes de fabrication par contre, en théorie, ce bois peut offrir une alternative intéressante aux bois résineux compte tenu de sa résistance mécanique supérieure. Une revue de la littérature démontre qu'il existe plusieurs recherches sur l'aboutage par entures multiples, mais que celles portant sur l'aboutage de bois de feuillus sont plutôt rares. Plusieurs paramètres d'usinage doivent être contrôlés afin de fournir de belles surfaces de collage et d'optimiser le procédé d'aboutage. Ce projet vise à définir un intervalle de paramètres d'usinage pour l'aboutage structural par entures multiples de l'érable à sucre afin de développer les meilleures résistances mécaniques que ce bois peut potentiellement offrir. Plus spécifiquement, ce projet étudie la résistance en traction parallèle au fil en variant la vitesse de coupe ainsi que l'avance par couteau (*chip-load*). Des deux paramètres étudiés, la vitesse de coupe semble être le paramètre ayant le plus d'effet sur la résistance en traction parallèle au fil de l'érable à sucre. Les meilleures résistances furent atteintes avec une vitesse de coupe de 2726 m/min et une avance par couteau de 0,60 mm. La vitesse de coupe de 2726 m/min semble être la meilleure afin d'atteindre les meilleures résistances en traction parallèle au fil, et ce, peu importe l'avance par couteau. Finalement, les résultats obtenus nous permet de croire que l'érable à sucre abouté possède un bon potentiel pour des applications structurales dont la fabrication de produits de bois d'ingénierie structuraux.

Mots-clés : aboutage, entures multiples, joints, usinage, bois d'ingénierie, bois de feuillus, érable à sucre.

Abstract

Finger-jointed softwood lumber is often used in manufacturing of structural engineered wood products such as glued laminated (glulam) beams and prefabricated wood I-joists. In Québec, producers of engineered wood products utilize generally wood species of Spruce-pine-fir (SPF) group, which includes softwood species recognized in Canadian standards. As hardwood species, sugar maple is not listed in the product standards, although, presumably, it can offer an interesting alternative to softwoods from the view point of strength. Literature review shows that there are many studies on finger-jointing but there are few on finger jointing of hardwoods. Certain machining parameters have to be controlled in order to produce suitable gluing surfaces and to optimize the finger-jointing process. The main objective of this study was to evaluate the effect of machining parameters on the ultimate tensile strength parallel to grain (UTS) of finger-jointed sugar maple dimension lumber. Three different chip-loads and three cutting speeds were used as variables. Based on test results, the cutting speed appeared to influence the UTS the most. The best UTS (47.1 MPa) of finger-jointed sugar maple specimens were achieved with a chip-load of 0.60 mm and a cutting speed of 2726 m/min (rotation speed of 3250 RPM and feed speed of 11.7 m/min). Finally, results of the study show that finger-jointed sugar maple possesses a good potential for structural applications including fabrication of structural engineered wood products.

Keywords: finger-jointed lumber, machining, engineered wood products, sugar maple, hardwood.

Avant-propos

Ce mémoire de maîtrise fut possible grâce à la supervision et à la collaboration de mon directeur Dr. Alexander Salenikovich ainsi que mon co-directeur Dr. Robert Beauregard de la Chaire Industrielle sur les Bois d'Ingénierie Structuraux et d'Apparence (CIBISA). Je tiens également à remercier Benoît St-Pierre, coordonateur à CIBISA, pour la coordination de toutes les étapes et les ressources nécessaires dans le cadre de ce projet et Mario Payeur, stagiaire à CIBISA, pour toute son aide lors de l'expérimentation.

Je veux aussi remercier tout le personnel du Centre de Recherche sur le Bois (CRB) qui m'a aidé dans ce projet, et plus particulièrement Luc Germain et Daniel Bourgault, techniciens de laboratoire, pour leur grand support lors de la préparation des échantillons.

De plus, je tiens à remercier les personnes ressources du laboratoire de Forintek Canada Corp qui de près ou de loin m'ont conseillé dans cet étude, particulièrement Richard Desjardins et Gérald Beaulieu, respectivement directeurs des départements des Systèmes de Construction et des Produits à Valeurs Ajoutées, pour m'avoir permis d'utiliser leurs laboratoires, ainsi que Olivier Baës, Martin O'Connor et Tommy Martel, techniciens de laboratoire, pour leur énorme aide lors de l'aboutage et des essais mécaniques, sans oublier Dany Normand, chercheur, pour la gestion et la supervision du séchage des pièces d'érable à sucre.

Enfin, je dédie ce mémoire à mon épouse Julie et à mes filles, Josiane et Florence, qui m'ont fourni le support moral et affectif nécessaire à l'accomplissement de ce projet. Concilier le travail, les études et la famille n'est pas toujours évident. Merci infiniment pour tout.

Table des matières

Chapitre 1 - Introduction et Problématique	1
1.1 Introduction.....	1
1.2 Problématique	2
1.3 Objectifs.....	8
Chapitre 2 - Revue de la littérature	10
2.1 Les produits de bois d'ingénierie structuraux.....	10
2.1.1 La poutrelle en I.....	11
2.1.2 La ferme à connecteurs métalliques.....	14
2.1.3 Le lamellé-collé	16
2.2 L'aboutage par entures multiples.....	20
2.2.1 Les facteurs influençant l'aboutage par entures multiples.....	22
2.2.2 Les normes régissant l'aboutage par entures multiples	36
2.3 Les essences de bois	40
2.3.1 Les bois de résineux.....	41
2.3.2 Les bois de feuillus	43
2.3.3 Les essences de bois spécifiées dans les normes	47
Chapitre 3 - Matériel et méthode	49
3.1 Le modèle conceptuel	49
3.1.1 Les paramètres indépendants	49
3.1.2 Les paramètres dépendants	53
3.1.3 Dispositif expérimental.....	53
3.2 Le modèle opératoire	54
3.2.1 Préparation des échantillons de bois.....	54
3.2.2 Procédé d'aboutage.....	57
3.2.3 Contrainte d'épreuve en traction.....	59
Chapitre 4 - Influence of Machining Parameters on the Tensile Strength of Finger-Jointed Sugar Maple Lumber	62
4.1 Abstract.....	62
4.2 Introduction and Background	63
4.3 Materials and Methods.....	65
4.4 Results and Discussion	68
4.5 Conclusion	73
4.6 References.....	73
Chapitre 5 - Conclusion Générale.....	76
Annexe I Étiquettes de livraison des blocs de 4x6	87
Annexe II Teneur en humidité initiale des blocs de 4x6	89
Annexe III Résultats expérimentaux (Série de contrôle).....	91
Annexe IV Résultats expérimentaux (Séries aboutées).....	93
Annexe V Exemples de ruptures expérimentales	103
Annexe VI Résultats statistiques (ANOVA)	105
Annexe VII Résultats statistiques (WEIBULL)	110
Annexe VIII Images de l'expérimentation	121

Liste des tableaux

Tableau 1 : Facteurs influençant la performance mécanique (d'après Fröblom 1975 dans Bustos 2003)	23
Tableau 2 : Profils géométriques étudiés (Ayarkwa <i>et al.</i> 2000a).....	28
Tableau 3 : Paramètre d'usinage étudié dans la littérature	36
Tableau 4 : Modes de rupture (adapté de NLGA 2003a)	39
Tableau 5 : Forêts québécoises et leurs principales essences d'arbre (MRNQ 2005).....	40
Tableau 6 : Combinaison des essences normalisées canadiennes (CSA 2002).....	42
Tableau 7 : Principales utilisations des bois de résineux (QWEB 2005)	43
Tableau 8 : Principales utilisations des bois de feuillus (QWEB 2005).....	43
Tableau 9 : Propriétés mécaniques de bois indigènes au Canada (Jessome 1977).....	45
Tableau 10: Caractéristiques d'usinage.....	50
Tableau 11 : Dispositif expérimental.....	54

List of Tables

Table 1: Machining parameters studied in the experiment.....	67
Table 2: UTS (MPa) of finger-jointed sugar maple machined with three chip-loads and three cutting speeds ^{a, b, c}	69
Table 3: UTS (MPa) of finger-jointed black spruce from Bustos <i>et al.</i> (2004) ^{a, b, c}	69
Table 4: Wood failure of finger-jointed sugar maple machined with three chip-loads and three rotation speeds	72

Liste des figures

Figure 1 : Production de poutrelle en I (adaptée de APA 2006).....	4
Figure 2 : Production de lamellé-collé (adaptée de APA 2006).....	4
Figure 3 : Principales contraintes internes d'un élément fléchi	11
Figure 4 : Poutrelles en I (APA 2005).....	12
Figure 5 : Domaine d'application de la poutrelle en I en 2003 (adaptée d'Adair 2004).....	13
Figure 6 : Principales contraintes internes d'une poutrelle en I fléchie	13
Figure 7 : Ferme de plancher à connecteurs métalliques (JBS 2005).....	14
Figure 8 : Fermes de toit à connecteurs métalliques (WTCA 2005).....	15
Figure 9 : Poutres Nordic Lam ^{MD} (Nordic EWP 2005).....	17
Figure 10 : Zones de contraintes d'un lamellé-collé (adaptée d'ASTM 2005a).....	18
Figure 11 : Domaine d'application du lamellé-collé en 2003 (adaptée d'Adair 2004).....	19
Figure 12 : Profil d'un joint horizontal (A) et vertical (B).....	21
Figure 13 : Paramètres géométriques d'un joint à entures multiples sans épaulement.....	21
Figure 14 : Types de configuration des joints (Bustos 2003).....	27
Figure 15 : Profil géométrique du joint par entures multiples (Bustos 2003).....	52
Figure 16 : Blocs de 4x6 d'érable à sucre	55
Figure 17 : Coupe des blocs de 4x6.....	56
Figure 18 : Tubes d'adhésif UX-200/WD3-A200 (Martineau 2006).....	58
Figure 19 : Dispositif d'encollage manuel (Martineau 2006).....	58
Figure 20: Finger-joint profile (Bustos 2003).....	67
Figure 21: Influence of chip-load and cutting speed on the UTS (5 th percentile) of finger-jointed sugar maple.....	71
Figure 22: Influence of feed speed on the UTS (5 th percentile) of finger-jointed sugar maple.....	71

Chapitre 1 - Introduction et Problématique

1.1 Introduction

Le procédé d'aboutage par entures multiples d'un bois permet d'utiliser du bois de moindre qualité afin d'obtenir un produit fini de meilleure qualité, d'augmenter sa résistance et son apparence visuelle en enlevant les défauts indésirables et de produire un bois de diverses longueurs (Fisette & Rice 1988). Le bois abouté est souvent utilisé dans la fabrication de produits de bois d'ingénierie structuraux tels que le lamellé-collé et la poutrelle en I. Il a été démontré que ce type de produit à valeur ajoutée est aussi propice à la fabrication des fermes à membrures parallèles en bois formées avec des connecteurs métalliques (Desjardins & Grandmont 2004). D'un point de vue économique, il est avantageux d'utiliser du bois abouté car il permet un meilleur rendement monétaire à cause de son augmentation de la résistance finale, tout en réduisant les variations dans le produit final. En effet, le bois abouté a moins tendance à gauchir à cause de l'orientation aléatoire du fil le long de la pièce finale (Vrazel & Sellers Jr. 2004). Au Québec, les fabricants de produits de bois d'ingénierie (ou de leurs composantes) utilisent principalement du bois du groupe Épinette-pin-sapin (EPS) (Mohammad 2002).

Une revue de la littérature sur l'aboutage par entures multiples démontre qu'il existe plusieurs recherches sur ce sujet, mais que celles portant sur l'aboutage de bois de feuillus sont plutôt rares. De plus, nous n'avons trouvé que deux études portant sur l'aboutage de l'érable à sucre (Brashaw & Vatalaro 2000, Verreault 2000), mais ces études ne portaient pas sur l'optimisation des paramètres d'aboutage. En effet, la grande majorité des études trouvées portent sur l'aboutage de bois de résineux, soit les essences de bois prescrites dans les normes de construction nord-américaines. Dans le cadre de ce travail, nous nous

attardons à l'optimisation de l'aboutage par entures multiples de l'érable à sucre pour la fabrication de produits de bois d'ingénierie structuraux.

Ce travail se divise en cinq grandes parties principales. La première comporte une brève introduction et la justification de notre travail de recherche. Nous y expliquons la problématique et justifions la raison de cette recherche. Dans la deuxième partie, nous effectuons une revue de la littérature des principaux concepts de l'étude, c'est-à-dire les produits de bois d'ingénierie structuraux, le procédé d'aboutage par entures multiples et les essences de bois. Nous discutons des produits de bois d'ingénierie structuraux pouvant bénéficier de l'aboutage de l'érable à sucre ainsi que du procédé d'aboutage par entures multiples pour des applications structurales. Nous étudions également les normes régissant ce procédé de transformation ainsi que les facteurs qui l'influencent. Par ailleurs, nous discutons des essences de bois afin de distinguer les deux grandes familles de bois, soit les résineux et les feuillus, décrivons les essences présentement utilisées dans la fabrication des principaux bois d'ingénierie structuraux et résumons des études réalisées dans le but d'utiliser des bois de feuillus dans la fabrication de bois d'ingénierie structuraux. La troisième partie comporte la méthodologie envisagée afin de déterminer les paramètres optimaux pour l'aboutage par entures multiples de l'érable à sucre. En se basant sur la revue de la littérature, nous justifions le choix des paramètres dépendants et indépendants utilisés dans le cadre de cette étude. Pour sa part, la quatrième partie consiste en un article scientifique soumis au journal *Wood & Fiber Science*. Finalement, une conclusion termine ce travail où nous faisons un rappel des objectifs de ce travail, résumons les résultats obtenus ainsi que des recommandations et des pistes de recherche pour des travaux futurs.

1.2 Problématique

La demande en produits forestiers croît constamment, les échanges internationaux deviennent de plus en plus importants au bien-être économique et social des populations de diverses parties du monde et l'usage local de produits forestiers gagne en appréciation et en

complexité (Youngs & Hammett 2001). Nous sommes constamment confrontés à la nécessité de conserver la forêt, tout en l'utilisant efficacement.

Par ailleurs, une analyse annuelle du marché des produits forestiers effectuée en 2004 par la Commission économique pour l'Europe et l'Organisation des Nations Unies (CEE/ONU) mentionne que la diminution des ressources provenant de forêts anciennes, les nouvelles techniques de transformation, l'amélioration des techniques de collage, l'adoption à l'échelle planétaire de codes de construction axés sur la performance et l'intense concurrence favorisée par la mondialisation sont des facteurs régissant la demande envers les produits de bois d'ingénierie.

En effet, les produits de bois d'ingénierie ne cessent d'évoluer tant dans leur conception que dans leurs applications (CEE/ONU 2004). Selon APA (2006), la production de poutrelles en I et de lamellé-collé devrait croître respectivement de 866 à 1525 millions de pieds linéaires et de 377 à 492 millions de PMP de l'an 2000 à 2011.

La Figure 1 et la Figure 2 illustrent la croissance prévue de ces deux grandes familles de produits de bois d'ingénierie.

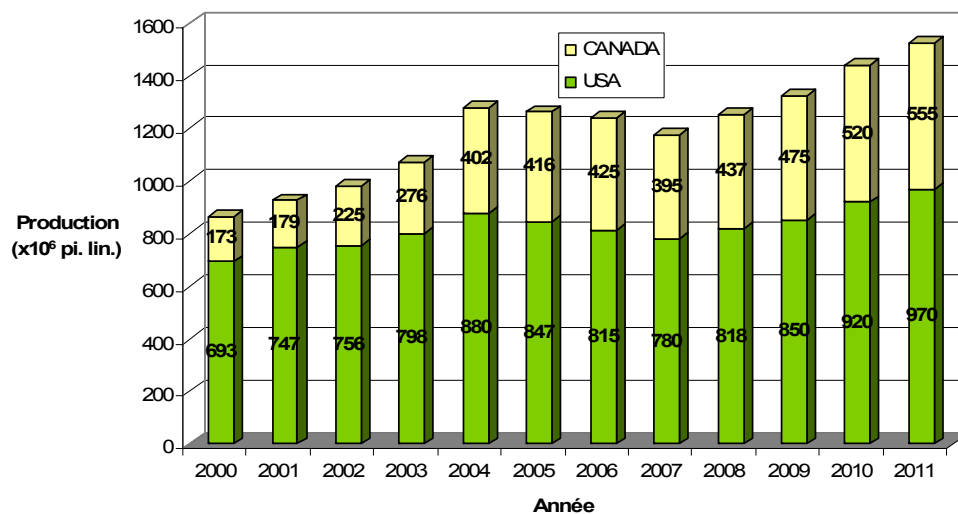


Figure 1 : Production de poutrelle en I (adaptée de APA 2006)

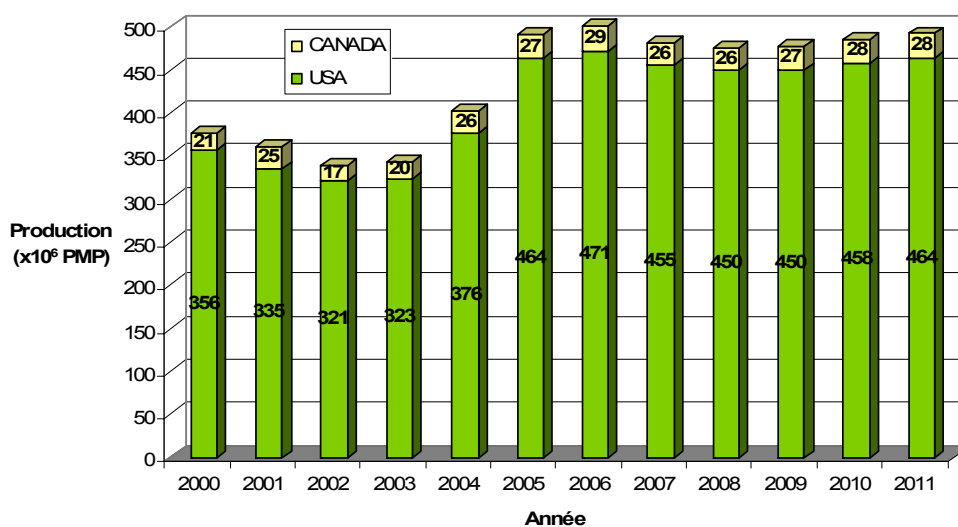


Figure 2 : Production de lamellé-collé (adaptée de APA 2006)

Par ailleurs, Schuler *et al.* (2001) mentionnent que le marché nord-américain consomme près de 75% de la production mondiale de produits de bois d'ingénierie. Cette part de marché est 3,5 fois supérieure à celle de l'Europe et 5,5 fois supérieure à celle du Japon. Une partie de l'explication de cette forte consommation nord-américaine est la

prédominance de la construction résidentielle en ossature de bois, en comparaison à celle en acier ou en béton.

En 2003, 80% de la production de poutrelle en I était utilisée pour la construction de nouveaux planchers résidentiels. Les poutrelles en I ont l'avantage de posséder une qualité prévisible (et plus constante) et elles créent moins de déchets que les bois de charpente conventionnels. Les constructeurs apprécient la performance des poutrelles en I et leur intérêt envers les poutrelles en I continuera de croître (Adair 2004).

Toujours en 2003, 66% de la production de lamellé-collé était utilisée pour les nouvelles constructions résidentielles et la rénovation. L'ajout d'une nouvelle gamme de lamellé-collé compatible avec les poutrelles en I continue de bien faire son chemin dans le marché résidentiel. Les poutrelles et ces nouvelles poutres ont maintenant la même hauteur, ce qui facilite la pose au chantier et la finition des plafonds. Adair (2004) prévoit que l'utilisation de lamellé-collé dans la construction non résidentielle devrait changer en 2004. Selon cet auteur, ce changement devrait être positif pour les fabricants. Par ailleurs, il sera intéressant de voir comment les concepteurs de structures non résidentielles s'adapteront aux changements du nouveau code du bâtiment aux États-Unis. Ce dernier permet maintenant des charpentes en bois d'une plus grande hauteur et d'une plus grande superficie (ICC 2003). Ce changement augmentera certainement la demande de lamellés-collés ainsi que plusieurs autres types de produits de bois structuraux pour les structures non résidentielles.

Tel que mentionné dans l'étude de la CEE/ONU (2004), l'approvisionnement en ressource provenant de forêts anciennes devient de plus en plus un enjeu important. Les arbres de deuxième, troisième et quatrième génération sont maintenant utilisés. Le bois disponible est maintenant de plus petit diamètre et de moindre qualité que jamais. Plusieurs essences qui étaient jugées indésirables auparavant sont maintenant réclamées afin d'augmenter

l'approvisionnement réduit des essences plus désirées (McKeever 1997). En dépit de ces changements dans la ressource forestière, la demande en bois continue d'augmenter.

Or, selon Schuler *et al.* (2001), il y a eu depuis 1990, une diminution significative de la disponibilité du bois sur les terres publiques de l'ouest des États-Unis ainsi que sur les terres privées et publiques du Canada. Au Québec, suite au dépôt du rapport de la Commission Coulombe en décembre 2004 et du rapport du Forestier en chef du Québec, il a été recommandé que d'ici l'entrée en vigueur des plans d'aménagement forestier intégré (PAFI) de 2008-2013, la possibilité ligneuse pour le groupe Sapin-Épinette-Pin gris-Mélèze (SEPM) soit réduite de 23,8% et que la possibilité ligneuse pour tous les autres groupes d'essences soit inchangée. Par contre, considérant la baisse pour le groupe SEPM et l'influence que celle-ci peut avoir sur la coupe de bois de feuillus en peuplement mixte, il a été recommandé de s'assurer que les volumes autorisés à la récolte pour les essences feuillues n'excèdent pas la possibilité dans ces peuplements (Bureau du Forestier en Chef 2006, Commission d'étude sur la gestion de la forêt publique québécoise 2004). Le groupe SEPM représente les essences résineuses les plus utilisées au Canada dans la fabrication de produits de bois d'ingénierie et les bois de construction. Qui plus est, ces essences résineuses font partie de celles prescrites dans la norme canadienne de calcul des charpentes en bois, la norme CSA-O86-01 (CSA 2002).

On remarque alors qu'une augmentation de la demande des produits de bois d'ingénierie et une réduction de l'approvisionnement en bois de résineux entraînera un déséquilibre entre l'offre et la demande. Ainsi, afin d'augmenter cet approvisionnement réduit en bois, déjà plusieurs études ont été effectuées dans le but de remédier à ce futur déséquilibre (Schuler *et al.* 2001). On n'a qu'à songer à l'utilisation de nouvelles essences de bois comme les bois de feuillus (Chui & Delahunty 2005, Manbeck *et al.* 1996, Verreault 2000), les bois de charpente composites (*Structural Composite Lumber*) ou à l'utilisation de matériaux composites fibreux (Hernandez *et al.* 1997, Pelvris & Triantafillou 1992, Spaun 1981, Theakston 1965). Il est pertinent de souligner que la norme canadienne CSA-O86-01 ne

dicte aucune ligne directrice pour l'utilisation de bois de feuillus pour la construction de charpentes en bois permettant ainsi une meilleure utilisation de la ressource forestière et diversifiant l'approvisionnement en bois requis pour la fabrication de produits de bois d'ingénierie.

Pourtant, l'utilisation efficace d'essences sous-utilisées est un élément primordial pour rehausser le rôle de la forêt mondiale tout en maintenant un développement durable. Cette utilisation efficace des essences sous-utilisées est une partie intégrante dans la conservation de la forêt et la transformation du bois en est l'élément clé. Par contre, ce processus doit être effectué en reconnaissant non seulement la technologie et le marché, mais aussi la nature de la forêt et sa place dans le monde environnemental, social et économique dans lesquels elle se trouve (Youngs & Hammett 2001). Ces derniers stipulent que la partie sous-utilisée de la ressource est généralement plus grande et plus vaste que celle communément utilisée, et représente près de 90% de la ressource globale.

Par contre, Youngs & Hammett (2001) soulèvent une question à se poser quant à l'utilisation d'essences sous-utilisées : doivent-elles réellement être utilisées ? Ils prescrivent que le marché de l'exportation ne se tournera pas vers ces essences sous-utilisées tant et aussi longtemps que l'approvisionnement des essences présentement en demande demeure stable. La demande grandira uniquement avec la création de marchés et le développement d'aptitudes de transformation appropriés à ces « nouvelles » essences. L'avancement et la croissance rapide des industries de composites ajoutent beaucoup à la possibilité d'utilisation d'essences sous-utilisées. Plusieurs aspects au niveau de la difficulté et de l'avantage de l'utilisation d'essences sous-utilisées doivent être considérés, tels que la diversité de la ressource, la productivité et la rentabilité possible de ces ressources ainsi que la possibilité d'une gestion soutenue tout en effectuant des opérations pour un meilleur usage de ces essences sous-utilisées. Suite à la question posée précédemment, ils concluent que les essences sous-utilisées doivent être utilisées, dans la mesure où l'on peut le faire de façon durable et soutenue. Ces mêmes auteurs ajoutent

également, le concept fort simple suivant : *“If something is available for use and is much needed, it seems only natural to figure out a way to use it.”*

La réussite des produits de bois d'ingénierie réside justement en une meilleure utilisation des fibres de bois pour effectuer un ouvrage identique ou meilleur aux bois de charpente conventionnels. Pour l'instant, les bois de résineux sont majoritairement utilisés dans la fabrication de ces produits, mais l'utilisation des bois de feuillus nous semble une bonne alternative.

La fabrication des deux grandes familles de produits de bois d'ingénierie structuraux mentionnées précédemment nécessite un approvisionnement constant de bois aboutés par entures multiples. La qualité et le volume de bois à abouter sont des éléments importants, tout comme les paramètres d'aboutage utilisés afin d'obtenir le maximum de capacité suite à cette transformation.

1.3 Objectifs

Selon le *Wood Handbook* (FPL 1999), l'usage principal de l'érable à sucre (appelé en anglais *hard maple*) se situe dans la fabrication de meubles, de revêtements de plancher, les boiseries, les moulures et d'ouvrages d'ébénisterie et de palettes. Pourtant, un regard sur ses propriétés mécaniques nous permet de constater que ce bois serait une alternative intéressante par rapport à l'utilisation des bois de résineux présentement énumérés dans la norme CSA-O86-01 et qu'il est certainement apte à l'aboutage par entures multiples.

Le procédé d'aboutage par entures multiples est une étape de transformation critique parmi les divers procédés de fabrication des bois d'ingénierie tels que le lamellé-collé et la poutrelle en I. À cet effet, les joints par entures multiples sont considérés comme une zone

de faiblesse dans la performance mécanique globale des produits de bois d'ingénierie structuraux (St-Pierre 2003). La rupture en service d'un seul bois abouté peut ruiner son marché (Strickler 1980). Plusieurs facteurs influencent la performance mécanique d'un bois abouté (Tableau 1). Ces facteurs doivent être bien définis et bien maîtrisés afin d'obtenir le maximum d'un bois, dont celui de l'érable à sucre.

Ce projet a pour objectif de définir un intervalle de paramètre d'usinage pour l'aboutage structural par entures multiples de l'érable à sucre afin de développer les meilleures résistances mécaniques que ce bois peut potentiellement offrir. Plus spécifiquement, ce projet étudiera la résistance en traction parallèle au fil en variant la vitesse de coupe ainsi que l'avance par couteau (*chip-load*) et il comparera les résultats aux exigences des normes de produits spéciaux SPS-1 et SPS-4 (NLGA 2003a, 2003c) ainsi qu'aux résultats obtenus par Bustos *et al.* (2004) qui ont étudié l'aboutage par entures multiples de l'épinette noire à l'aide d'un adhésif comparable. D'un point de vue théorique, ce bois peut offrir un potentiel intéressant et supérieur aux bois présentement utilisés lors de la fabrication (majoritairement des bois résineux) cependant, l'aboutage structural d'un bois de feuillus s'avère plus compliqué que lors de l'utilisation de résineux. Ce projet de maîtrise a donc pour but d'évaluer l'aboutage structural de l'érable à sucre dans le but de diversifier l'approvisionnement en bois entrant dans la fabrication de produits de bois d'ingénierie structuraux, tels que le lamellé-collé, la poutrelle en I ainsi que la ferme à connecteurs métalliques.

Chapitre 2 - Revue de la littérature

2.1 Les produits de bois d'ingénierie structuraux

Un produit de bois d'ingénierie peut se définir comme un produit structural fabriqué à partir de billes de bois réduites en petits morceaux de bois (en copeaux, en bois de sciage de courtes longueurs ou en minces placages). Le principe d'un produit de bois d'ingénierie structural est de permettre une meilleure utilisation de la matière première, d'éliminer les principaux défauts et les points faibles du bois (ou du moins de réduire leurs impacts), de réduire les résidus de bois et de réduire la quantité de bois requise en fabriquant un produit plus fort et plus homogène (Guss 1995, Malgren 1999).

Plus particulièrement, les produits de bois d'ingénierie que nous visons dans le cadre de ce travail sont ceux utilisés comme substituts aux bois de sciage (ou de charpente) conventionnels pour des applications structurales. Cette classe de produits de bois d'ingénierie structuraux regroupe plusieurs types de produits, dont les poutrelles en I, les fermes à connecteurs métalliques, les lamellés-collés et les bois aboutés. Or, il existe d'autres types de bois d'ingénierie qui entrent dans la même catégorie, dont les bois de charpente composites (SCL) : les bois en placages stratifiés (LVL), les bois de copeaux parallèles (PSL), les bois de copeaux laminés (LSL) et les bois de copeaux orientés (OSL). Par contre, la fabrication de ces derniers ne nécessite pas l'usage de bois aboutés. Les produits de bois d'ingénierie structuraux offrent la résistance et la rigidité supérieurs par rapport aux bois des sciages traditionnels; ils donc peuvent supporter de plus grandes charges lors de la conception d'une charpente. Les poutrelles en I et les fermes à

connecteurs métalliques sont généralement conçues pour supporter des charges de gravité. Les poutrelles sont soumis à des efforts de flexion et de cisaillement tandis que les membrures des fermes sont globalement soumises à des efforts de flexion, de traction ou de compression. Les lamellés-collés et les bois de charpente composites peuvent être conçus pour résister à des efforts de flexion et cisaillement (poutres et poutrelles) ou à des efforts de compression et de traction axiales (colonnes, montants ou contreventements). Dans le cadre de ce travail, nous nous concentrerons sur les éléments soumis à des efforts de flexion/axial (σ) et de cisaillement (τ), donc des poutrelles et des poutres en bois d'ingénierie structuraux. La Figure 3 illustre ces contraintes pour le cas d'une poutre/poutrelle de section rectangulaire homogène sur deux appuis simples. Chaque produit d'ingénierie structural décrit ci-après agira différemment à ces contraintes et la disposition du bois doit être optimisée selon des principes d'ingénierie connus.

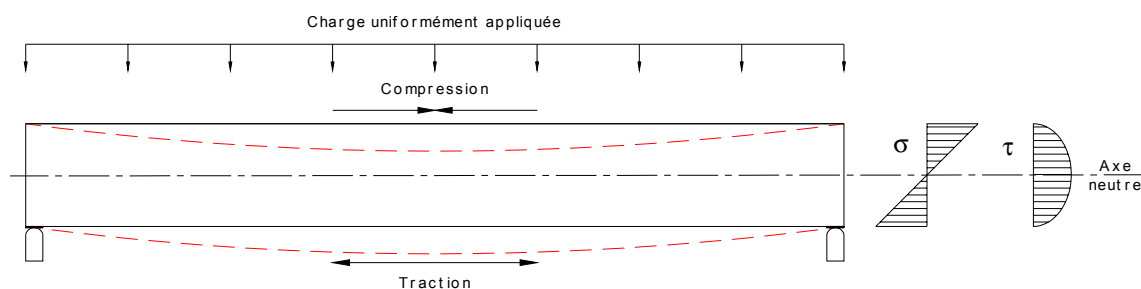


Figure 3 : Principales contraintes internes d'un élément fléchi

2.1.1 La poutrelle en I

Une poutrelle en I est habituellement composée de semelles en bois de sciage aboutés ou en LVL collées à un panneau d'âme fait de panneaux en OSB ou de contreplaqué. La forme en « I » de ces produits leur procure un ratio résistance/poids très élevé (Figure 4). Le produit fini est léger, stable dimensionnellement et possède des propriétés mécaniques connues (propres à chaque produit). La rigidité uniforme, la résistance et le faible poids de ces poutrelles préfabriquées font d'elles des solives très appropriées pour des applications de

plancher et de toiture, autant pour la construction résidentielle que commerciale (CCB 2001).



Figure 4 : Poutrelles en I (APA 2005)

En 1997, près de 74% des fabricants de poutrelles en I utilisaient des semelles en LVL plutôt qu'en bois de sciage et cette proportion a diminué à 63% en 2003. Généralement, des semelles en bois de sciage sont moins coûteuses que celles en LVL. De plus, les nouvelles usines de poutrelles en I sont de plus en plus basées uniquement sur des semelles en bois de sciage dont la plupart proviennent du Canada (Adair 2004).

Tel que mentionné à la section 1.2 , 80% de la production en 2003 des poutrelles en I était utilisée pour la construction de nouveaux planchers résidentiels (Adair 2004). Le reste de la production se divise selon les proportions montrées à la Figure 5.

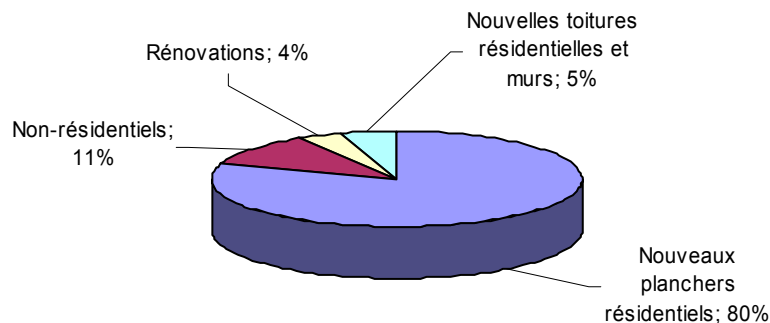


Figure 5 : Domaine d'application de la poutrelle en I en 2003 (adaptée d'Adair 2004)

Selon les contraintes internes développées suite à un effort de flexion (se référer à la section 2.1), la semelle supérieure de la poutrelle sera soumise à une contrainte de compression et, à l'inverse, la semelle inférieure sera soumise à une contrainte de traction. De son côté, l'âme de la poutrelle reprend peu de ces contraintes, mais reprend principalement la contrainte de cisaillement (FPL 1999). La Figure 6 illustre la distribution des contraintes internes dans une poutrelle en I.

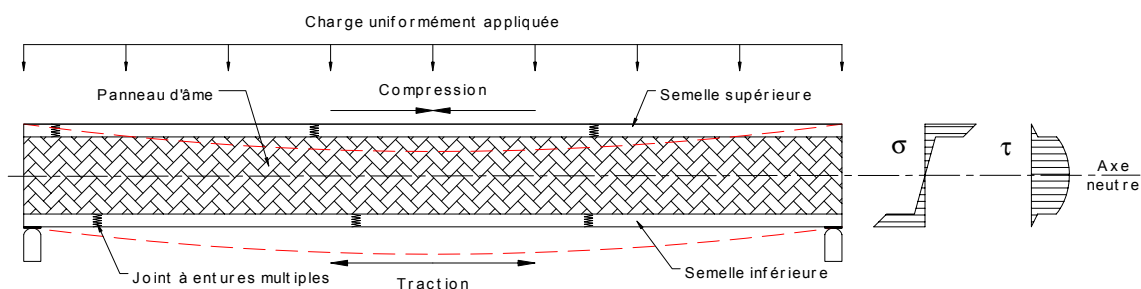


Figure 6 : Principales contraintes internes d'une poutrelle en I fléchie

La rigidité, la résistance et la qualité du bois utilisé pour les semelles influenceront grandement le comportement final de la poutrelle (résistance à la flexion et rigidité flexionnelle). En effet, la rupture d'une poutrelle soumise à un effort de flexion s'initiera normalement dans la semelle en traction puisque le bois est plus susceptible de rompre en

traction qu'en compression (fragilité versus ductilité). Il est alors impératif que l'aboutage du bois n'influence pas négativement la résistance finale de la poutrelle et c'est à cause de ce comportement que la performance en traction est le critère utilisé pour l'évaluation de la qualité de l'aboutage.

2.1.2 La ferme à connecteurs métalliques

L'utilisation des fermes en bois est largement répandue dans la construction résidentielle (résidences unifamiliales et multifamiliales) ainsi que dans la construction commerciale, agricole et institutionnelle. Une ferme est un cadre structural triangulé (treillis) composé d'âmes et de membrures pour transmettre les charges aux appuis (Figure 7 et Figure 8). Tout comme la poutrelle en I, cette disposition lui confère un ratio résistance/poids élevé ce qui permet d'adopter des portées plus longues que les solives traditionnelles. La forme et la taille des fermes ne sont limitées que par les contraintes de fabrication, d'expédition et de manipulation. Les fermes en bois sont préfabriquées en les assemblant par des connecteurs métalliques (plaques) posées sur les éléments de bois taillés en forme et en longueur et disposés dans un gabarit qui leur donne leur forme (CCB 2001). La résistance en flexion et la rigidité flexionnelle de la ferme à connecteurs métalliques seront grandement influencées par la qualité et la résistance du bois utilisé dans les membrures supérieures et inférieures.

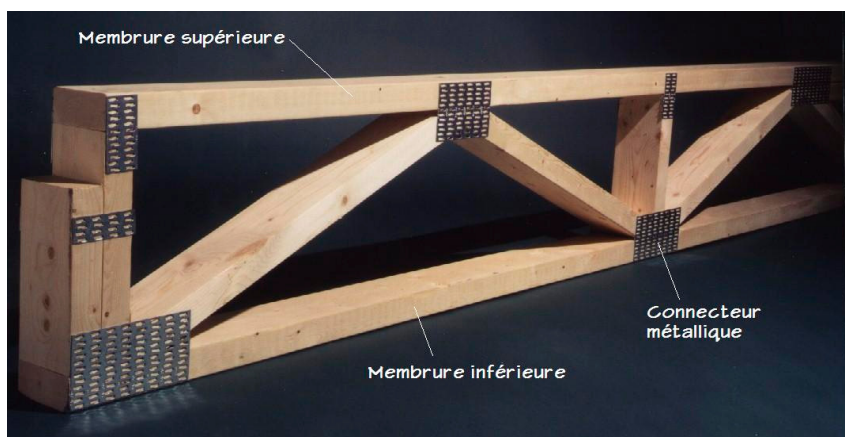


Figure 7 : Ferme de plancher à connecteurs métalliques (JBS 2005)



Figure 8 : Fermes de toit à connecteurs métalliques (WTCA 2005)

Selon le Conseil Canadien du Bois (2001), plusieurs maisons neuves utilisent des fermes en bois. Grâce à une utilisation efficace du bois et à l'aide d'un système permettant de s'installer en la moitié moins de temps que la charpente conventionnelle, les fermes en bois préfabriquées constituent une solution économique à la construction. Tout comme les autres produits d'ingénierie, les fermes en bois optimisent l'utilisation du bois à chaque application, ce qui augmente les avantages environnementaux.

Dans les années 80, la norme CSA-O86 fut modifiée afin d'exclure l'usage du bois abouté dans les fermes en bois. Elle est maintenant en révision afin de permettre l'usage de ce type de bois suite à d'autres études effectuées sur cette application. À ce jour, la norme CSA-O86-01 (CSA 2002) ne présente aucune restriction formelle quant à l'usage de bois abouté par entures multiples dans la fabrication de ce type de fermes (Desjardins & Grandmont 2004). Elle admet tous les types de bois classés par les règles de la Commission Nationale de Classification des Sciages (NLGA) dont les résistances sont prescrites dans la norme CSA-O86-01 (TPIC 1996), soit des essences de bois de résineux.

Or, à notre connaissance, les fabricants de fermes en bois n'utilisent pas (ou peu) le bois abouté par entures multiples pour les membrures supérieures et inférieures des fermes à membrures parallèles. Ils utilisent du bois de charpente conventionnel allant jusqu'à 6,6 m (22 pieds) de longueur maximale. Lorsque la fabrication des fermes nécessite de plus longues pièces de bois, ils ont alors recours aux connecteurs métalliques afin de relier les membrures entre elles (communément appelées les entures). Le bois abouté serait, à notre avis, une bonne alternative dans la fabrication de fermes à connecteurs métalliques afin de réduire les entures dans les membrures supérieures (chevrons) et les membrures inférieures (entraits).

Dans une récente étude, Desjardins & Grandmont (2004) stipulent que l'emploi de membrures en bois abouté par entures multiples ne présente aucun risque dans la fabrication de fermes à membrures parallèles en bois formées avec des connecteurs métalliques. Cette étude démontre également qu'aucune réduction de résistance et aucune différence relativement aux modes de défaillance n'ont été révélées. Les résultats obtenus sont favorables à l'utilisation de membrures en bois abouté par entures multiples dans la fabrication de fermes en bois à membrures parallèles. Il semble toutefois que l'industrie soit toujours réticente à aller dans ce sens et qu'elle demande d'autres études permettant de valider les résultats de cette étude dans tous les cas d'espèce.

2.1.3 Le lamellé-collé

Le lamellé-collé est un produit de bois d'ingénierie composé de plusieurs pièces de bois. Ces pièces sont généralement de dimensions nominales (2x3, 2x4, 2x6, etc.) de diverses longueurs. La largeur des pièces de bois à utiliser dépendra de la largeur de la poutre à fabriquer. Les pièces de bois sont individuellement classées et ensuite aboutées ensemble afin de produire des pièces de bois plus longues (appelées lamelles). Ces dernières sont ensuite collées sur la face, selon une combinaison prédéfinie, afin de former une poutre de section rectangulaire pleine. Le nombre de lamelles détermine la hauteur de la poutre. De

plus, étant donné que le bois est joint par les extrémités (*end-to-end*), puis collée sur les faces étroites (*edge-to-edge*) et sur les faces larges (*face-to-face*), les dimensions d'un lamellé-collé ne sont donc limitées que par les moyens de production de l'usine ou les restrictions au niveau du transport (Figure 9).



Figure 9 : Poutres Nordic Lam^{MD} (Nordic EWP 2005)

Les lamelles sont disposées, selon des principes d'ingénierie connus, de façon à créer la combinaison permettant d'aller chercher les meilleures propriétés mécaniques. La résistance d'un lamellé-collé dépendra alors de la qualité et de la disposition des lamelles de bois, selon que les lamelles de haute qualité (de meilleures propriétés mécaniques) sont en haut ou en bas (un lamellé-collé débalancé), ou des deux côtés (balancé). Donc, de façon générale, les lamelles de bois de meilleure qualité sont disposées aux extrêmes (supérieurs et/ou inférieurs) dépendant de l'utilisation finale de la poutre. Le cœur de la poutre, étant moins sollicité par des efforts de traction/compression, est habituellement fait de bois de qualité visuelle, de moindre qualité (Figure 10). C'est dans cette perspective que l'on peut dire que le lamellé-collé utilise avantageusement la ressource bois en tant que produit de bois d'ingénierie structural.

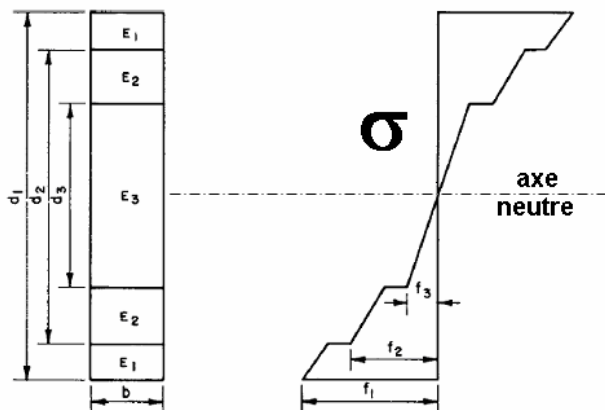


Figure 10 : Zones de contraintes d'un lamellé-collé (adaptée d'ASTM 2005a)

Selon les efforts internes développés suite à un effort de flexion, un lamellé-collé peut se diviser en trois zones critiques (ASTM 2005c). La Figure 10 illustre ces zones ainsi que la distribution des contraintes à travers un lamellé-collé de type balancé (disposition symétrique des lamelles de part et d'autre de l'axe neutre). Les trois zones sont la zone externe en traction/compression (E_1), la zone interne en traction/compression (E_2) et le cœur (E_3). Ce sont ces zones que le concepteur du lamellé-collé doit vérifier lors de la conception et de la détermination de l'ordre des lamelles pour la fabrication.

Les contraintes maximales de traction et de compression agissent aux zones externes (lamelles externes) selon la distribution montrée à la Figure 10. Le matériel de ces dernières doit alors être particulièrement d'une grande résistance en traction car ce sont les régions les plus critiques à la rupture (rupture fragile du bois). À cet effet, ces lamelles doivent rencontrer une panoplie de critères de qualité et de résistance, ce dernier critère étant généralement le plus restrictif et sélectif dans l'approvisionnement du bois.

Afin de trouver une alternative aux lamelles externes en bois de haut grade, l'industrie du lamellé-collé continue d'innover par l'utilisation de bois de placages stratifiés (LVL), de

renforts de couches de matériaux composites fibreux et des bois de feuillus. En 2004, il n'existait que quatre fabricants nord-américains de lamellé-collé utilisant des lamelles de LVL et deux fabricants utilisant des couches de matériaux composites fibreux (Adair 2004).

Par ailleurs, tel que mentionné à la section 1.2 , 66% de la production en 2003 de lamellé-collé était utilisée pour les nouvelles constructions résidentielles et les rénovations (Adair 2004). Le reste de la production se divise selon les proportions montrées à la Figure 11. Selon Adair (2004), l'ajout d'une nouvelle gamme de lamellé-collé compatible avec les poutrelles en I et la nouvelle génération de lamellé-collé de résistance en flexion 30F procurent maintenant plus d'opportunités dans le marché résidentiel.

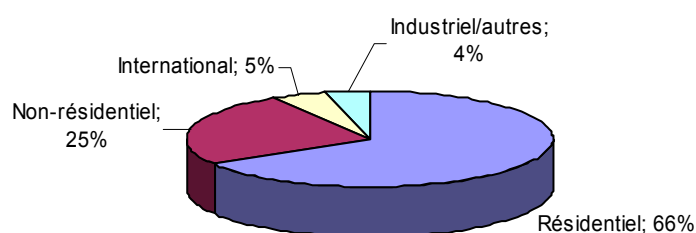


Figure 11 : Domaine d'application du lamellé-collé en 2003 (adaptée d'Adair 2004)

Tous les produits de bois d'ingénierie structuraux décrits aux sections 2.1.1 à 2.1.3 utilisent (ou ont avantage à utiliser) du bois abouté par entures multiples. Nous nous attarderons donc au procédé d'aboutage par entures multiples dans la section suivante.

2.2 L'aboutage par entures multiples

L'aboutage de pièces de bois permettant l'utilisation de pièce unique fut beaucoup utilisé dans les années 1900, alors que ce procédé était utilisé pour la fabrication d'aéronefs. Ce procédé utilisait des coupes en biseau afin de coller les pièces entre elles. Cette coupe en biseau fut développée compte tenu de la faible résistance qu'offrait l'aboutage bout-à-bout (*end-to-end*) et furent améliorées afin de fournir une surface de collage presque parallèle au grain du bois. Au début des années 1950, des efforts furent concentrés au développement d'un profil de joint permettant d'obtenir un joint ayant une meilleure résistance, tout en n'augmentant pas le volume de bois à usiner. L'enture multiple, comme on la connaît aujourd'hui, a alors vu le jour (Hernandez 1998).

Il existe plusieurs raisons d'aboutier du bois (Fisette & Rice 1988). En effet, du bois de moindre qualité peut être utilisé afin de produire un produit fini de meilleure qualité dont la résistance et l'apparence d'un bois seront augmentées en y enlevant les défauts indésirables. Le bois abouté peut être produit selon n'importe laquelle longueur et il existe un marché pour ce type de produit pour des applications structurales ainsi que de spécialités.

Un joint à entures multiples peut se définir comme un joint entre les extrémités de deux pièces de bois dont les extrémités ont été profilées en une série de saillies qui s'emboîtent (CSA 1992). Ces saillies sont pratiquées perpendiculairement aux faces étroites ou aux grandes faces (joints horizontaux ou verticaux) (voir Figure 12). L'aboutage par entures multiples est un procédé de fabrication permettant d'obtenir des pièces de bois de grande longueur réalisé par le collage longitudinal de courtes pièces de bois reliées entre elles par les entures.

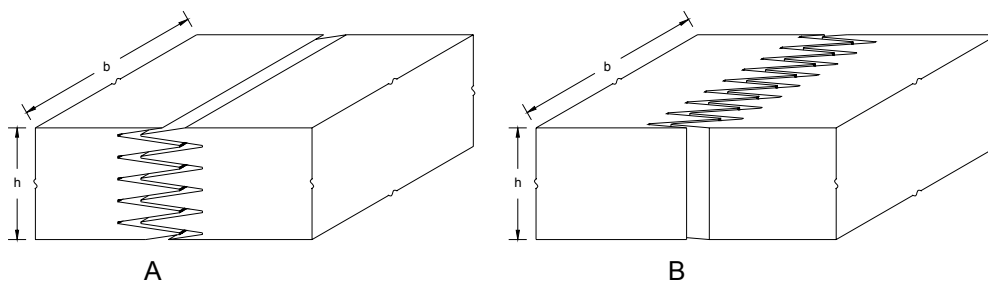


Figure 12 : Profil d'un joint horizontal (A) et vertical (B)

Une surface de collage d'un joint par enture multiple est sujette à deux types de contraintes (Figure 13), soit une contrainte de cisaillement (τ) et une contrainte de traction perpendiculaire à la surface du joint ($\sigma_{T\perp}$) (Jokerst 1981, Mohammad 2002). Afin d'obtenir le maximum de résistance, il est recommandé que la surface de collage soit la plus grande possible et que la pointe soit la plus fine possible (Mohammad 2002, Selbo 1963).

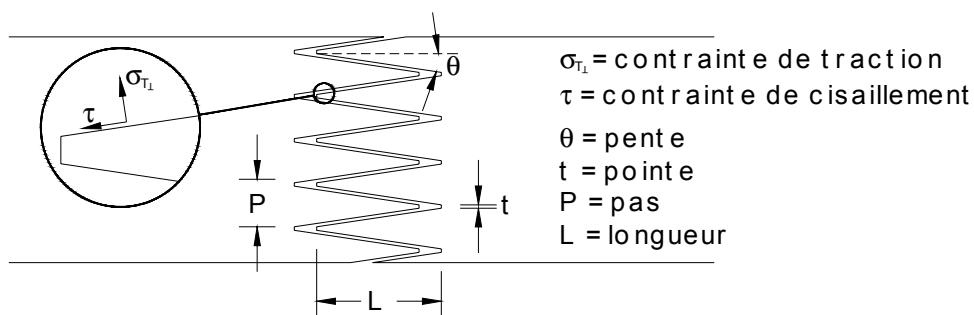


Figure 13 : Paramètres géométriques d'un joint à entures multiples sans épaulement

Tel que mentionné précédemment, les joints par entures multiples sont considérés comme une zone de faiblesse dans la performance mécanique globale des produits de bois d'ingénierie structuraux (St-Pierre 2003). En effet, la résistance d'un bois abouté est inférieure à celle d'un bois non-abouté (Jokerst 1981). Selon le Forest Products Laboratory (1999), un bois abouté par entures multiples peut atteindre près de 75% de la résistance en

traction d'un bois clair de défauts et montre un comportement identique à ce bois clair. Il est alors crucial d'effectuer un contrôle de la qualité sévère lors de la fabrication. Une seule rupture en service d'un bois abouté peut nuire gravement au marché de ce produit (Strickler 1980). Au Canada, le contrôle de la qualité est régie par la norme NLGA-SPS 1 (NLGA 2003a) et se divisent en cinq (5) étapes principales (Mohammad 2002), soit 1) la sélection et la préparation du bois, 2) l'usinage des profils des joints, 3) l'application de l'adhésif, 4) l'assemblage des joints et 5) le durcissement de l'adhésif. La norme SPS-1 indique que le bois utilisé dans la fabrication du bois de charpente jointé peut être de n'importe quelle essence ou groupe d'essences prescrite par les règles de classification pour le bois d'œuvre canadien de la NLGA (*National Lumber Grading Authority* ou Commission Nationale de Classification des Sciages).

2.2.1 Les facteurs influençant l'aboutage par entures multiples

Tel que mentionné par Bustos (2003), nombreux sont les facteurs qui influencent la performance mécanique d'un assemblage par entures multiples. En effet, la performance d'une enture multiple dépend des propriétés du bois, de la géométrie des entures et de la qualité du collage. Les propriétés du bois comportent les paramètres anatomiques et physiques du bois. La géométrie des joints englobe les paramètres géométriques des joints (le type de joint, la pente, l'orientation, etc.). Finalement, la qualité du collage comporte les paramètres de production et d'usinage. Le Tableau 1 dénombre les multiples facteurs influençant la performance mécanique d'un bois abouté.

Plusieurs études ont été effectuées afin de déterminer l'effet de plusieurs paramètres sur la performance mécanique de bois aboutés. Par contre, il n'existe à notre connaissance que très peu d'information quant à l'aboutage des bois de feuillus.

Tableau 1 : Facteurs influençant la performance mécanique (d'après Fröblom 1975 dans Bustos 2003)

Propriétés	Facteurs
Propriétés du bois	Anatomie
	Masse volumique
	Proportion de bois final
	Nœuds (grandeur, quantité et forme)
	Pente du fil
	Grandeur des cernes annuels
	Bois de traction ou de compression
	Bois juvénile
	Teneur en humidité
	Gerces produites par le séchage
	Cambrure et gauchissement
Teneur en résine	
Géométrie des joints	Type de joint
	Paramètres de profil des joints
	Direction de coupe des joints
Propriétés de production	Séchage et conditionnement
	Coupe transversale des blocs
	Coupe des entures
	Type d'adhésif
	Application de l'adhésif
	Pression d'assemblage
	Application de chaleur sur les joints
	Entreposage
	Rabotage
	Contrôle de la qualité dans l'usine

Effet des propriétés du bois

L'habileté au collage d'un bois dépend des propriétés physiques du bois, telles que la densité, la porosité, la teneur en humidité et les changements directionnels (gonflement/retrait volumique) (FPL 1999).

Nœuds

Du bois aboutés, des 2x4 en Sapin Douglas, furent testés en traction parallèle au fil afin d'évaluer l'effet de nœuds sur la résistance lorsqu'ils sont situés à proximité des entures (Pellicane *et al.* 1987). Les échantillons furent classés selon trois catégories, soient : « clair » (aucun nœuds à moins de 305mm (12 pouces) des entures), « 6mm (¼ pouce) » (nœuds allant de 6 à 13mm (¼ à ½ pouce)) et « 13mm (½ pouce) » (nœuds allant de 13 à 19mm (½ à ¾ pouce)). Tous les nœuds étaient situés à une distance de deux diamètres ou moins des entures. Les auteurs ont démontré que les nœuds à proximité des entures produisent des effets nuisibles sur la résistance en traction du bois abouté.

Une distance minimale des entures est généralement demandée dans les normes portant sur l'aboutage structural. A cet effet, la norme SPS-1 (NLGA 2003a) prescrit les dimensions admissibles des nœuds dans la région d'une enture selon la classe et la dimension des pièces à abouter.

Température et teneur en humidité du bois

Le bois utilisé pour l'aboutage doit être préalablement séché à une teneur en humidité convenable pour un collage adéquat (Jokerst 1981). Il est recommandé de sécher le bois à une teneur en humidité semblable à celle qu'il atteindra lors de sa tenue en service (teneur en humidité d'équilibre généralement entre 6% et 17%). Le bois ayant une haute teneur en humidité causera des problèmes lors de la cure par radiofréquence. En effet, l'énergie fournie servira alors à chauffer l'eau contenue dans le bois au lieu de durcir l'adhésif. Mohammad (2002) renchérit en obtenant une teneur en humidité optimale de 12% (à une température de 20°C) lors de l'optimisation de l'aboutage par entures multiples de l'épinette noire. De plus, une température basse a généralement un effet négatif plus important sur les résistances en traction avec du bois vert (teneur en humidité supérieure à 19%) que sur du bois sec (St-Pierre 2003). De plus, certains adhésifs sont plus affectés par la teneur en humidité. Selon St-Pierre (2003), les adhésifs phénoliques nécessitent l'utilisation d'un four à radio-fréquence et sont beaucoup plus sensibles aux écarts

d'humidité tandis que les adhésifs à prise rapide à la température ambiante sont beaucoup plus robustes et moins sensibles aux variations de teneur en humidité du bois.

Masse volumique et densité

La densité varie beaucoup d'un bois à un autre compte tenu de la différence de vide dans le bois ainsi que l'épaisseur de ses parois cellulaires. Un bois ayant une faible densité possède de minces parois cellulaires et un plus grand volume de cavités cellulaires, tandis qu'un bois de grande densité possède des parois cellulaires plus épaisses, mais des cavités cellulaires plus petites. La résistance d'un bois est directement reliée à la densité d'un bois dû au fait que des parois cellulaires épaisses sont plus résistantes que des parois cellulaires minces.

Tel que mentionné dans le *Wood Handbook* (FPL 1999), la résistance d'un joint de colle augmente avec une densité allant jusqu'à 700 à 800 kg/m² (à une teneur en humidité de 12%), puis décroît à partir de cette densité. Par ailleurs, une étude sur l'effet du pH, de la perméabilité et de la densité sur les habilités au collage de bois de feuillus, la densité fut le facteur prédominant quant à la résistance en cisaillement du plan de colle lors de l'utilisation d'adhésifs de types urée et résorcinol-phénol (Sellers Jr. *et al.* 1988).

Les bois de haute densité et de faible porosité nécessite plus de temps d'assemblage (temps écoulé entre l'application de l'adhésif et l'application de la pression d'assemblage) afin de bien laisser pénétrer l'adhésif. Dans le même ordre d'idée, la porosité du bois affecte également le temps de pression d'assemblage pour un adhésif qui durcit à partir de la migration et l'évaporation de son solvant. À cet effet, une comparaison entre le chêne rouge (bois à zone poreuse) et l'érable à sucre (bois à pores diffus) montre que le chêne rouge nécessite deux fois plus de temps que l'érable à sucre lors de l'application de la pression

d'assemblage afin de développer 50% de la résistance (Bustos *et al.* 2003b, Sellers Jr. *et al.* 1988).

Par ailleurs, lors d'une étude sur l'effet de la géométrie et de la pression d'assemblage, Ayarkwa *et al.* (2000a) remarquèrent que l'efficacité des joints (le ratio de la résistance du joint à celle du bois clair) diminuait avec une augmentation de la densité du bois.

De plus, Ayarkwa *et al.* (2000b) étudièrent les adhésifs de type isocyanate, résorcinol-formaldéhyde (RF) et mélamine-formaldéhyde (MF) pour l'aboutage de trois bois tropicaux. Il a été démontré que la performance des adhésifs semble liée à la densité du bois, présentant la meilleure efficacité dans le bois de basse densité (351 kg/m³) et la pire efficacité dans le bois le plus dense (819 kg/m³). L'adhésif de type MF a par contre mieux performé pour les bois de haute densité (677 kg/m³ et 819 kg/m³). En effet, un bois plus dense nécessitera un adhésif moins visqueux, soit plus liquide, qui pénétra plus rapidement et efficacement. Un bois moins dense permet une pénétration rapide même pour des adhésifs très visqueux.

Effet de la géométrie des joints

Type de joint

Il existe plusieurs types de configurations de joints sur le marché. Selon Bustos (2003), les principales sont les configurations sans épaulement, mâle-femelle et inversée (Figure 14). De plus, les fabricants de bois abouté ont tendance à produire des joints à entures multiples courtes et avec des épaulements compte tenu de son plus faible coût de production.

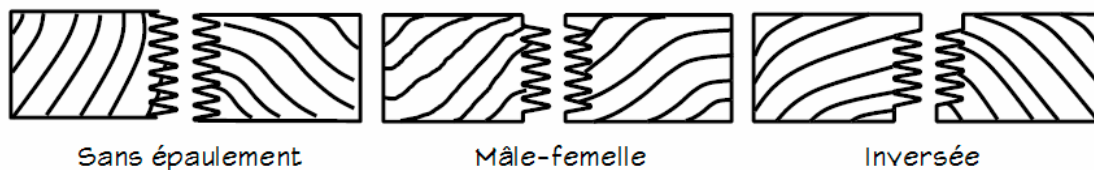


Figure 14 : Types de configuration des joints (Bustos 2003)

À ce sujet, une étude réalisée sur l'aboutage de l'épinette noire selon différentes configurations de joints horizontaux (sans épaulement, mâle-femelle et inversée) démontra que les joints sans épaulement obtiennent de meilleures performances (Bustos 2003, Bustos *et al.* 2003a). Les trois configurations avaient les mêmes caractéristiques géométriques ($L=28,27\text{mm}$, $t=0,76\text{mm}$ et $P=6,69\text{mm}$), à l'exception de l'épaulement.

Paramètres de profil des joints

Le profil d'une enture multiple (Figure 13) est déterminé par quatre paramètres, soit la longueur (L), le pas (P), la pointe (t) et la pente de l'enture (θ) (Fisette & Rice 1988). Ces paramètres sont interdépendants les uns des autres de sorte que la modification d'un de ces paramètres changent automatiquement les autres selon l'équation 1 (Jokerst 1981, Selbo 1963) :

$$S = \tan \theta = \frac{\frac{1}{2}P - t}{L} \quad (1)$$

Selbo (1963) étudia l'effet de la géométrie du joint sur la résistance en traction d'un assemblage abouté de bois de deux résineux (l'épinette de Sitka et le sapin-Douglas) et d'un feuillu (le chêne blanc). Il étudia l'effet de trois pointes (0,045 po, 0,090 po et 0,135 po), six pentes (1/6, 1/8, 1/10, 1/12, 1/14 et 1/16) et six pas (3/16 à 9/16 po en incréments de 1/16 po) sur les résineux. Il n'utilisa qu'une seule pointe pour le feuillu, soit une pointe

de 0,045 po. En général, il conclut que l'augmentation de la résistance en traction semble être proportionnelle à l'augmentation du ratio L/P, jusqu'à ce que ratio atteigne une valeur maximale de 4. Il remarqua également que pour une pointe plus épaisse, la résistance augmentait significativement avec une augmentation du pas, mais lorsque la pointe devenait mince (presque pointue), l'effet du pas semblait presque nul. De plus, lorsque la pente et la pointe sont constantes, la résistance du joint augmentait généralement avec une hausse du pas. Finalement, une mince pointe développera une meilleure résistance, et là où des résistances maximales sont nécessaires comme dans des éléments fléchis ou tendus, la plus petite pointe usinable devrait être fabriquée.

Toujours dans le même courant de pensée, Ayarkwa *et al.* (2000a) étudièrent eux aussi l'effet de la géométrie et de la pression d'assemblage sur la résistance en flexion de trois bois de feuillus africains tropicaux. Ils étudièrent les trois géométries et les trois pressions d'assemblage montrées au Tableau 2.

Tableau 2 : Profils géométriques étudiés (Ayarkwa *et al.* 2000a)

Type	Longueur (L)	Pas (P)	Pointe (t)	Pente (θ)
F1	10 mm (0,40 po)	3,7 mm (0,15 po)	0,6 mm (0,02 po)	1/6
F2	18 mm (0,72 po)	3,7 mm (0,15 po)	0,6 mm (0,02 po)	1/12
F3	20 mm (0,80 po)	6,0 mm (0,24 po)	0,6 mm (0,02 po)	3/20

Les résultats obtenus démontrent que le profil des entures a un effet significatif sur la résistance en flexion (MOR), mais pas sur la rigidité flexionnelle (MOE). Le profil F2 a obtenu les meilleures performances et ils remarquèrent aussi que l'efficacité des joints (le ratio de la résistance du joint à celle du bois clair) diminuait avec une augmentation de la densité du bois.

Direction de coupe des joints

Finalement, le profil des entures peut être selon la face étroite ou large de la pièce de bois (joint horizontal ou vertical). À cet effet, Jokerst (1981) mentionne qu'un profil sur la face large (joint vertical) donne de meilleures performances en flexion et en traction compte tenu du fait que dans un joint horizontal, les deux dernières entures supportent la majorité de la contrainte tandis que dans un joint vertical, la contrainte est répartie plus uniformément entre toutes les entures. Par contre, Janowiak *et al.* (1993) ont obtenu des résultats légèrement différents à savoir qu'il n'y a pas d'avantage marqué d'aboutir du bois de feuillus (le chêne rouge, l'érable rouge et le tulipier) verticalement ou horizontalement, quoique la résistance en traction fût légèrement supérieure pour les joints verticaux.

Effet des paramètres de production

Pression d'assemblage

La pression requise pour l'assemblage d'un joint dépend de la viscosité de l'adhésif utilisé et de la qualité de l'agencement recherché. De plus, il a été démontré que des joints bien agencés donnent de bonnes performances, même à une pression d'assemblage minimale (Jokerst 1981).

À cet effet, Fisette et Rice (1988) étudièrent la performance de l'aboutage de deux bois de résineux, soit le pin blanc et la pruche du Canada, selon une pression d'assemblage de 0.24 MPa (35 psi) et de 0.35 MPa (50 psi). Ils mentionnent qu'il est important d'appliquer une pression adéquate afin que les pièces soient bien agencées, mais il ne faut pas que cette pression endommage les pointes des entures. Il a été conclu que les pressions de 35 psi et de 50 psi étaient respectivement les optimales pour le pin blanc et la pruche du Canada. De plus, il a été démontré que la pression n'affecte pas la résistance en traction de la pruche du Canada, mais qu'une pression excessive réduit la résistance en traction pour le pin blanc.

Également, une étude portant sur l'effet de la géométrie et de la pression d'assemblage sur la résistance en flexion de trois bois de feuillus africains tropicaux démontra que la pression d'assemblage n'a pas d'influence significative sur la résistance en flexion (MOR), ni sur la rigidité flexionnelle (MOE) (Ayarkwa *et al.* 2000a). Les bois d'Obeche, de Makore et de Maobi furent utilisés et ont une densité moyenne de 351 kg/m³, 677 kg/m³ et de 819 kg/m³ respectivement. Des pressions d'assemblage de 8, 12 et 18MPa (1160, 1740 et 2600 psi) furent utilisées pour les bois de Maobi et de Makore, tandis que des pressions de 2, 3, 4, 8 et 12 MPa (290, 435, 580, 1160 et 1740 psi) furent utilisées pour le bois d'Obeche.

Par contre, six pressions d'assemblage étudiées pour l'aboutage de l'épinette noire démontrèrent qu'il existe une pression pour laquelle la performance en traction est optimale et lorsqu'on s'éloigne de ce point en plus ou en moins, la performance tend à diminuer (Bustos 2003, Bustos *et al.* 2003b). Les pressions étudiées furent de 1,3, 2,2, 2,8, 3,7, 4,0 et 4,9 MPa (de 200 à 700psi) pour l'épinette noire de densité moyenne de 448 kg/m³. Une pression de 3.43 MPa (498 psi) semble être la pression optimale pour l'aboutage de cette essence.

Bien que les résultats de recherches antérieures semblent quelques fois contradictoires quant à l'effet de la pression d'assemblage, il semble toutefois qu'il y a une tendance quant à l'existence d'une pression optimale directement proportionnelle à la densité du bois.

Rappelons cependant que la porosité du bois affecte le temps de pression d'assemblage pour un adhésif qui durcit à partir de la migration et l'évaporation de son solvant. De plus, les bois de haute densité et de faible porosité nécessite plus de temps d'assemblage afin d'immobiliser l'adhésif. À cet effet, une comparaison entre le chêne rouge (bois à zone poreuse) et l'érable à sucre (bois à pores diffus) a démontré que le chêne rouge nécessite deux fois plus de temps que l'érable à sucre lors de l'application de la pression d'assemblage afin de développer 50% de la résistance (Sellers Jr. *et al.* 1988).

Type d'adhésif

Un adhésif utilisé dans la fabrication de bois abouté par entures multiples doit posséder un court temps de durcissement et une excellente résistance afin de tenir les pièces jointes ensemble afin d'effectuer de plus amples transformations (King & Chen 2001). Un adhésif apte au collage de pièces de bois peut techniquement être approprié au collage d'entures multiples (Jokerst 1981). Par contre, l'utilisation finale de la pièce de bois déterminera si cet adhésif est approprié ou non. Par exemple, Jokerst (1981) mentionne que si une utilisation extérieure est envisagée, le choix des adhésifs est automatiquement limité au type résorcinol, phénol-résorcinol ou mélamine. Il indique également que la principale différence entre un adhésif de type résorcinol et un adhésif de type phénolique est la possibilité de durcir la colle à plus basse température. Il est par contre recommandé d'utiliser une température de 21°F (70°F) ou plus pour les bois de résineux et une température encore plus élevée pour les feuillus. Un bois qui ne se prête pas bien au collage avec un certain type d'adhésif peut par contre mieux performer avec un autre.

Trois types d'adhésif furent étudiés sur l'aboutage de bois de Sapin-Douglas, de Pin du Sud et de Keruing (Vrazel & Sellers Jr. 2004). Les auteurs ont obtenu les meilleures performances en traction et en flexion sur le bois de Keruing abouté avec un adhésif de type résorcinol-formaldéhyde (RF) que lors de l'utilisation des types polyuréthane combiné à un polymère en émulsion aqueuse (PU/AEP) et soja-résorcinol-formaldéhyde combiné (RF/Soya). Les auteurs expliquent leurs résultats par le fait que le bois de Keruing est de plus grande densité (780 kg/m³) que le Sapin-Douglas (550 kg/m³) et le Pin du Sud (580 kg/m³), et donc présente évidemment de meilleures propriétés mécaniques.

Une étude réalisée par Labosky Jr. *et al.* (1993) servait à déterminer si les adhésifs utilisés pour les bois de résineux sont équivalents lors du collage de bois de feuillus. Le chêne rouge, l'érable rouge et le peuplier jaune aboutés avec des adhésifs de type résorcinol-

formaldéhyde (RF) et phénol-résorcinol-formaldéhyde (PRF) furent étudiés. Les deux types d'adhésif ont démontré des résultats satisfaisants pour l'aboutage du chêne rouge et des résultats acceptables pour l'érable rouge et le peuplier jaune (des bois de plus faible densité que le chêne rouge). Janowiak *et al.* (1993) renchérissent en concluant que les adhésifs de type mélamine-formaldéhyde (MF) et résorcinol-formaldéhyde (RF) procurent des résultats équivalents lors de l'aboutage des trois (3) bois de feuillus utilisés par Labosky Jr. *et al.* (1993) et qu'il n'y a pas d'avantage à utiliser un adhésif de type résorcinol, ce dernier étant plus dispendieux.

Les adhésifs de type isocyanate, résorcinol-formaldéhyde (RF) et mélamine-formaldéhyde (MF) furent étudiés pour l'aboutage de trois bois tropicaux (Ayarkwa *et al.* 2000b). Il a été démontré que l'adhésif utilisé influence les résistances en flexion et en traction, mais influence peu les rigidités (MOE) respectives. La performance des adhésifs semble liée à la densité du bois, présentant la meilleure efficacité dans le bois de basse densité (351 kg/m³) et la pire efficacité dans le bois le plus dense (819 kg/m³). L'adhésif de type MF a par contre mieux performé pour les bois de haute densité (677 kg/m³ et 819 kg/m³).

Finalement, un nouveau type d'adhésif de type polyuréthane (PUR) gagne de plus en plus de terrain en Amérique du Nord pour une variété d'applications structurales (Bustos 2003). Ce type d'adhésif offre plusieurs possibilités étant donné que son processus de durcissement n'est pas limité par les mêmes conditions que les adhésifs phénoliques.

À ce sujet, le *Wood Handbook* (FPL 1999) mentionne que même si les adhésifs utilisés pour les résineux et les feuillus sont généralement différents chimiquement, les adhésifs utilisés doivent être conçus spécifiquement pour les résineux ou les feuillus (et propres aux essences) ou doivent posséder des propriétés ajustables en fonction de l'utilisation finale du produit. Qui plus est, Chui & Delahunty (2005) indiquent que l'adhésif PU/AEP utilisé lors de leur étude sur l'érable rouge ne semblait pas permettre d'atteindre le plein potentiel de

l'aboutage par entures multiples de cet essence, possiblement parce que cet adhésif est formulé pour des bois résineux.

Coupe des entures

De mauvaises pratiques d'usinage entraînent des surfaces trop rugueuses ou trop lisses (dites glacées) et endommagent les fibres de bois en surface. Les surfaces résultantes d'un mauvais usinage restreignent le mouvement de l'adhésif et augmentent la quantité d'adhésif requise lors de son application et du mouillage du bois. Les bois denses, généralement difficiles à coller adéquatement, requièrent une surface lisse et non endommagée afin de fournir une adhésion performante (Sellers Jr. *et al.* 1988). Plusieurs paramètres d'usinage doivent être contrôlés afin d'optimiser le procédé d'aboutage. L'avance par couteau (*chip-load*), la vitesse de coupe et l'angle d'attaque en sont des exemples. Les paramètres d'usinage sont généralement prescrits par les fabricants des outils de coupe (Mohammad 2002). Une attention particulière doit être portée à l'usinage afin de fournir de belles surfaces de collage. Ces dernières doivent être usinées à l'aide d'outils bien affûtés.

L'avance par couteau (*chip-load*) est la quantité de bois enlevée par chaque couteau pour une rotation complète de l'axe et ce paramètre doit être adéquat afin de ne pas brûler les outils de coupe et de fournir une bonne finition sur la surface du bois. Elle peut être déterminée selon la relation 2 suivante :

$$\text{Avance par couteau} = \frac{V_{\text{avance}}}{nN} \quad (2)$$

V_{avance} = vitesse d'avance (m/min)

où n = nombre de couteaux

N = vitesse de rotation (tour/min)

Une augmentation de l'avance par couteau entraîne une augmentation de la pression appliquée et de la chaleur en surface du bois (Bustos 2003). Une trop faible avance par couteau implique que les couteaux froteront davantage et couperont moins bien, tandis qu'une trop grande avance par couteau générera un excès de bois arraché en raison de la pression appliquée par l'outil de coupe. Il est à noter que les avances par couteau peuvent être comparées si la longueur et la géométrie du joint sont égales. Une plus grande longueur des dents du joint enlèvera plus de bois qu'un joint usiné avec la même avance par couteau, mais avec une longueur des dents plus courte.

La vitesse de coupe est la vitesse avec laquelle les couteaux passent à travers le bois (Bustos 2003). Elle est directement reliée à la vitesse de rotation des outils de coupe et au diamètre de coupe selon la relation 3 suivante :

$$V_{coupe} = \frac{\pi DN}{1000} \quad (3)$$

V_{coupe} = vitesse de coupe (m/min)

où D = diamètre du cercle de coupe du porte - outil (mm)

N = vitesse de rotation (tour/min)

Le diamètre du cercle de coupe peut se définir comme étant le diamètre du porte-outil, allant jusqu'au bout des dents. Tel que mentionné par Bustos (2003), la vitesse d'avance a un effet direct sur l'usure des outils de coupe. Une plus grande vitesse d'avance génère une plus haute température à la surface du bois et réduit la durée de vie des outils. Cette vitesse est alors contrôlée par la dureté du matériau à usiner et par la qualité du métal constituant l'arête de coupe des outils.

Les surfaces de collage peuvent être affectées négativement par la chaleur générée par la friction entre les couteaux et la surface du bois (Hernández & Naderi 2001, Hernández & Rojas 2002). Hernández & Naderi (2001) mentionnent que l'habileté au collage de l'érable à sucre diminue avec une augmentation de la largeur de l'outil de coupe (largeur du couteau touchant au bois). De plus, une meilleure résistance au cisaillement (dans le plan de colle) a été observée lors de l'utilisation de couteaux ayant peu d'usure dans des conditions hygrothermiques constantes. Il existe un effet significatif sur l'habileté au collage de l'érable à sucre par rapport à la rectification des couteaux et leur usure (Hernández & Rojas 2002).

À cet effet, Reeb *et al.* (1998) évaluèrent la qualité des joints par entures multiples après 4, 6 et 32 heures d'usure des couteaux. Ils ont utilisés du Pin de Ponderosa abouté à l'aide de joints horizontaux de type mâle-femelle et une pression d'assemblage de 1200 psi. Ils ont observé une relation directe entre la profondeur des cellules endommagées et le temps d'usure des couteaux. La surface de collage devient rugueuse et plus irrégulière lors d'une utilisation prolongée des couteaux. Il a été conclu que l'entretien des couteaux est une étape importante dans le but de produire des surfaces de collage de qualité.

Bustos *et al.* (2004) étudièrent l'effet des paramètres d'usinage sur la performance structurale de l'aboutage par entures multiples de l'épinette noire. La résistance en traction fut évaluée pour différentes vitesses d'avance par couteau et différentes vitesses de coupe. En général, ils ont obtenus de faibles résistances en traction associées à des vitesses de coupe élevées, et ce pour les trois avances par couteau étudiées. Une vitesse de coupe plus élevée que 2932 m/min est déconseillée et une vitesse de coupe comprise entre 1676 et 2932 m/min semble produire des résultats satisfaisants pour les trois avances par couteau étudiées. Les meilleurs résultats ont été obtenus à une vitesse de coupe de 1676 m/min et une avance par couteau de 0,86 mm. Compte tenu du fait que 1676 m/min était la plus petite vitesse de coupe étudiée, il n'est pas clair si une plus petite vitesse de coupe

produirait de meilleurs résultats. Le Tableau 3 résume les différents paramètres d'usinage que nous avons recensé dans les recherches antérieures.

Tableau 3 : Paramètre d'usinage étudié dans la littérature

Type	Essence	Densité (kg/m ³)	Avance par couteau (mm)	Vitesse de rotation (tour/min)	Vitesse de coupe (m/min)	Vitesse d'avance (m/min)	Auteur(s)
Résineux	Épinette noire	480 à 550	0,76	1100 à 3600	1403 à 4592	8,4 à 27,4	(Cossette 2005)
				1998	1676	7,7	
				0,64	3495 4495	2932 3770	
	Épinette noire	437	0,86	1998	1676	10,3	(Bustos <i>et al.</i> 2004)
				3495	2932	18,1	
				4495	3770	23,2	
				1998	1676	13,7	
				1,14	3495 4495	2932 3770	
	Épinette noire	448	0,84	3500	3500	18,3	(Bustos <i>et al.</i> 2003b)
	Feuillus	Érable à sucre	719	0,71	3600	3020	15,24

2.2.2 Les normes régissant l'aboutage par entures multiples

Plusieurs normes régissent la fabrication de bois abouté par entures multiples. À ce sujet, Kent & Leichti (2005) ont étudié quatre normes nord-américaines régissant le procédé d'aboutage par entures multiples. Il est important de mentionner qu'au Canada, il existe une norme supplémentaire de la NLGA, soit la norme de produits spéciaux SPS-4 qui régit la semelle de bois jointé pour la fabrication de poutrelles en I (NLGA 2003c), mais elle ne

sera pas traitée dans ce chapitre compte tenu qu'elle est spécifique aux semelles de bois jointé pour les poutrelles en I et que notre étude ne vise pas d'abord les poutrelles en I.

Les normes étudiées par Kent & Leichti (2005) prescrivent les lignes directrices pour la certification du bois abouté pour son utilisation en tant que substitut du bois de charpente conventionnel, ainsi que pour le contrôle de la qualité. Ces normes sont les suivantes :

1. Manufacturing Quality Control Systems Manual AITC 200 (AITC 1992)
2. Normes de produits spéciaux pour le bois de charpente jointé SPS-1 (NLGA 2003a)
3. Standard Test Method for Mechanical Properties of Lumber and Wood-Base Structural Material ASTM D4761 (ASTM 2005a)
4. Glued Lumber Procedures Manual 1025 (SPIB 2000)


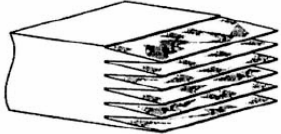
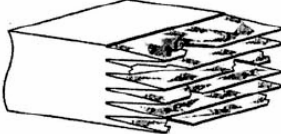
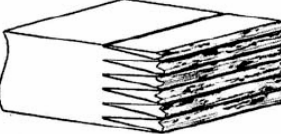
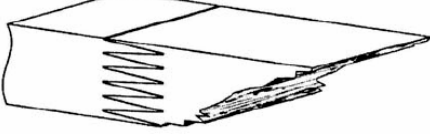
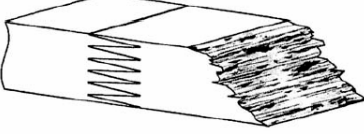
Des échantillons de 2x4 de bois de Sapin-Douglas aboutés verticalement furent testés en traction et en flexion afin de déterminer les différents modes de rupture associés à chaque méthode. En effet, il existe des différences entre une rupture en traction pure et une rupture en flexion parce que l'essai en traction sollicite entièrement la section transversale, tandis que l'essai en flexion sollicite les fibres externes des zones en traction et en compression. Donc pour une section transversale donnée, les défauts naturels du bois peuvent grandement influencer la résistance en traction et ce, peu importe où ils se trouvent transversalement. Par contre, afin que ces défauts influencent négativement la résistance en flexion, ils doivent se trouver dans les zones les plus sollicitées (les fibres externes) (Kent & Leichti 2005). Les échantillons furent testés en traction selon les normes AITC 200 et SPIB 1025, en flexion sur la rive selon les normes ASTM D4761 et SPIB 1025 et à plat selon les normes NLGA SPS-1 et SPIB 1025. Il a été conclu qu'aucune méthode ne semble meilleure que les autres. Par contre, les essais en traction de la norme AITC 200 ne

semblent pas appropriés pour la certification et le contrôle de la qualité du bois abouté de bas grade. En effet, ils ont obtenus plusieurs ruptures du mode 6 (Tableau 4), soient des ruptures complètement dans le bois et en dehors de la zone du joint. Les modes de rupture 1 à 2 sont liés à un problème de performance de l'adhésif (collage), alors que les modes de ruptures 3 à 6 indiquent une rupture au niveau du bois, donc un collage adéquat. Lors de l'analyse, il est recommandé de ne pas considérer les ruptures du mode 6 lors de l'évaluation de la performance mécanique des joints (Bustos 2003). En effet, ce mode de rupture est plutôt un signe de défaut majeur dans le bois et la rupture n'est donc pas contrôlée par le joint en soi.

Kent & Leitchi (2005) mentionnent qu'étant donné que le bois de bas grade n'est généralement pas utilisé dans les zones fortement sollicitées en traction (comme les lamelles externes d'un lamellé-collé et les semelles de poutrelles en I ou ajourées), des essais en flexion sont plus appropriés afin de simuler les contraintes rencontrées lors de la mise en service du bois abouté. Des essais de traction sont plus appropriés pour des bois de haut grade qui seront utilisés dans les zones fortement sollicitées en traction. Strickler (1980) renchérit en mentionnant que les essais de traction non-destructifs sont plus adéquats que les essais de flexion dans le cadre d'un contrôle de la qualité (*proofloading*). Ce type d'essai permet d'assurer le client, l'agence d'accréditation, et même un tribunal dans l'éventualité d'une poursuite judiciaire, que toutes les pièces aboutées sont suffisamment fortes pour servir adéquatement selon la classe de résistance prévue des pièces.

Finalement, la norme canadienne NLGA SPS-1 s'applique à toutes les essences ou groupe d'essences de bois prescrites par les règles de la NLGA. Les essences de bois ne peuvent toutefois pas être combinées dans une pièce et le produit fini doit être classé visuellement conformément aux Règles de Classification pour le Bois d'œuvre, indépendamment de la présence de joints à entures multiples (NLGA 2003a, 2003c).

Tableau 4 : Modes de rupture (adapté de NLGA 2003a)

Mode	Description	Exemple
1	Rupture présente surtout le long des surfaces du plan de colle sur le profil du joint avec mauvaise rupture du bois de tout type (rupture du bois < 70%).	
2	Rupture présente surtout le long des surfaces du plan de colle sur le profil du joint avec rupture de cisaillement nette (rupture du bois > 70%).	
3	Rupture présente surtout le long du profil du joint mais avec quelques ruptures à la racine des entures. De façon globale, rupture du bois nette avec cisaillement le long des surfaces du profil du joint.	
4	Surtout rupture du bois en traction à la racine des entures et avec, de façon globale, une forte présence de rupture sur le bois. Faible rupture de tout type le long du profil du joint.	
5	Rupture commençant au joint et progressant en s'éloignant du joint. Essentiellement rupture du bois à 100%.	
6	Rupture présente loin du joint (non influencée par le joint). Toute rupture du bois.	

2.3 Les essences de bois

Il existe au Québec une cinquantaine d'essences d'arbres distribués géographiquement selon leur adaptation aux conditions climatiques (MRNQ 2005). Ces arbres se divisent en deux grandes classes : les feuillus (*hardwoods* ou bois « durs ») et les résineux (*softwoods* ou bois « mous »). Ces noms (surtout l'appellation anglaise) peuvent porter à confusion étant donné que certains bois de résineux (dits « mous ») sont en réalité plus durs que certains bois de feuillus (dits « durs ») et vice-versa (FPL 1999). À titre d'exemple, les bois de pin jaune et de sapin-douglas (des résineux) sont plus durs que ceux du tilleul et du peuplier (des feuillus). La distribution des arbres dans la forêt québécoise se fait selon trois types de zones et selon six types de sous-zones, tel que montrée dans le Tableau 5.

Tableau 5 : Forêts québécoises et leurs principales essences d'arbre (MRNQ 2005)

Zones	Sous-zones	Essences d'arbres
Tempérée nordique	Forêt décidue	Érable à sucre (<i>Acer saccharum</i>)
		Bouleau jaune (<i>Betula alleghaniensis</i>)
		Tilleul (<i>Tilia americana</i>)
		Caryer cordiforme (<i>Carya cordiformis</i>)
Boréale	Forêt mélangée	Bouleau jaune (<i>Betula alleghaniensis</i>)
		Sapin baumier (<i>Abies balsamea</i>) Épinette blanche (<i>Picea glauca</i>)
	Forêt boréale	Épinette noire (<i>Picea mariana</i>)
		Peuplier faux-tremble (<i>Populus tremuloides</i>) Bouleau blanc (<i>Betula papyrifera</i>) Pin gris (<i>Pinus banksiana</i>) Sapin baumier (<i>Abies balsamea</i>)
Taïga		Épinette noire (<i>Picea mariana</i>) Pin gris (<i>Pinus banksiana</i>) Sapin baumier (<i>Abies balsamea</i>)
Arctique	Toundra forestière	Épinette noire (<i>Picea mariana</i>)
	Bas-arctique	Aucun arbre

D'un point de vue anatomique, les bois de résineux sont plus uniformes que les bois de feuillus. En effet, les bois de résineux sont principalement constitués d'un seul type de cellule (les trachéides) reliées entre elles par des ponctuations permettant le passage d'un liquide ou de l'air. La structure anatomique d'un bois de feuillus est plus complexe. Elle est principalement constituée de deux types de cellules (les fibres et les vaisseaux). Les fibres sont généralement courtes, ont des parois cellulaires épaisses et sont fermées aux extrémités. En réalité, les fibres ont de très petites ouvertures et une membrane rigide ne permettant pas le passage d'un liquide ou de l'air. Par opposition à un bois de résineux, il n'y a pas de mouvement entre les fibres d'un bois de feuillus, ce qui rend la pénétration de l'adhésif par cette voie très difficile, voire impossible. Les vaisseaux laissent pénétrer la colle très rapidement mais ils peuvent assécher le joint en laissant trop de colle pénétrer, trop rapidement. Il a été rappelé que l'anatomie du bois, la densité, et la quantité d'extractibles affectent également l'habileté au collage du bois (Labosky Jr. *et al.* 1993).

2.3.1 Les bois de résineux

Les bois de résineux ont démontré depuis des années leur versatilité en servant en tant que ressource première pour la construction (FPL 1999). Les bois de résineux se retrouvent dans une vaste gamme de produits provenant de diverses essences. Pour leur utilisation sur le marché, les bois de résineux sont classés selon la méthode de fabrication, selon l'essence et selon l'utilisation (structurale ou d'apparence).

Au Canada, les différentes normes de la Commission Nationale de Classification des Sciages (NLGA) prescrivent les propriétés mécaniques du bois classé visuellement, classé par contrainte mécanique (MSR) ou par résistance mécanique (MEL) et le bois abouté par entures multiples (NLGA 2003a, 2003b, 2003c). La norme CSA O86-01, *Règles de Calcul des Charpentes en Bois*, régit toutes les conceptions de charpente en bois au Canada (CSA 2002). Le Tableau 6 décrit les combinaisons d'essences normalisées dans cette norme canadienne.

Tableau 6 : Combinaison des essences normalisées canadiennes (CSA 2002)

Désignation Commerciale	Identification par estampille	Essences comprises dans la combinaison
Douglas-mélèze	Douglas-mélèze (N)	Douglas, mélèze occidental
Pruche-sapin	Pruche-sapin (N)	Pruche occidentale, sapin gracieux
Épinette-pin-sapin	EPS	Épinette (toutes les essences, sauf épinette de Sitka), pin gris, pin tordu, sapin baumier et sapin alpin
Essences nordiques	Northern Species	Toute essence canadienne classée selon les règles NLGA

On remarque que le groupe EPS est un mélange d'épinette, de pin et de sapin dans des proportions indéterminées. D'après le Québec Wood Export Bureau, le bois québécois estampillé EPS est le plus utilisé en construction au Canada étant donné la très grande force de résistance qui lui est conférée par sa lente croissance (QWEB 2005). Il est important de rappeler que la réduction de coupe de 20% du rapport de la Commission Coulombe touche directement ce groupe d'essences, ainsi que la dernière révision du Forestier en Chef du Québec demandant une réduction de 23.8% (Bureau du Forestier en Chef 2006, Commission d'étude sur la gestion de la forêt publique québécoise 2004). De plus, St-Pierre (2003) rappelait que 85% de l'approvisionnement en bois dans la fabrication de semelles de poutrelles en I est de l'épinette noire, un bois dense très répandu dans le nord du Québec. Le Tableau 7 énumère les principales utilisations des bois estampillé EPS.

Tableau 7 : Principales utilisations des bois de résineux (QWEB 2005)

▪ Bois de structure	▪ Marchés du bricoleur
▪ Planchers	▪ Palettes
▪ Bois de structure destinés aux montants de charpente	▪ Coffrages
▪ Lambris	▪ Rénovation et constructions secondaires
▪ Menuiserie	▪ Etc.

2.3.2 Les bois de feuillus

L'usage principal des bois de feuillus est pour la fabrication de meubles, d'ébénisterie et de palettes ou d'usage direct pour les revêtements de plancher, les boiseries, les moulures et les travaux usinés (FPL 1999).

Le climat du Québec favorise une lente croissance des arbres et il en résulte un bois d'une très grande densité avec des couleurs recherchées par les connaisseurs (QWEB 2005). Les bois de feuillus du Québec entrent en majorité dans la fabrication d'une foule de produits de haute qualité. Le Tableau 8 énumère les principales utilisations des bois de feuillus.

Tableau 8 : Principales utilisations des bois de feuillus (QWEB 2005)

▪ Armoires de cuisine	▪ Moulures
▪ Articles de sport	▪ Panneaux
▪ Cadres	▪ Poignées d'outils
▪ Cercueils	▪ Planchers de bois francs
▪ Garnitures décoratives	▪ Sculptures
▪ Jouets	▪ Stores vénitiens
▪ Menuiserie architecturale	▪ Tournage
▪ Meubles	▪ Etc.

Par ailleurs, une agence américaine de classification des sciages, la *Northeastern Lumber Manufacturers Association (NELMA)*, classe certaines essences de bois de feuillus pouvant être vendues et utilisées en tant que bois de charpente. L'érable rouge, l'érable à sucre, le hêtre, le bouleau jaune, le caryer cordiforme, le chêne rouge et le chêne blanc ne sont que certaines essences de bois de feuillus faisant partie de la catégorie du bois de charpente américains (NELMA 2005a, 2005b).

Quant à elle, la norme CSA-O141 (CSA 1992), qui s'applique au bois débité de résineux, ne spécifie évidemment aucune essence de bois de feuillus, mais mentionne qu'elle peut s'appliquer dans le cas du bois débité de feuillus entrant dans la construction d'ouvrages pour lesquels des essences résineuses sont généralement utilisées. De plus, cette norme réfère à la norme CSA-O86-01 pour les résistances et d'autres propriétés lorsque le bois débité au Canada est utilisé aux fins de conception.

A cet effet, une étude réalisée par Jessome (1977) dresse la liste des propriétés mécaniques des bois indigènes au Canada. Il est important de mentionner que ces valeurs sont pour des échantillons de bois clairs de défauts conditionnés à une teneur en humidité de 12%. Le Tableau 9 résume les propriétés mécaniques de certaines essences de bois étudiées par Jessome (1977). Certaines de ces essences sont présentement normalisées dans la norme CSA-O86-01 (CSA 2002).

Tableau 9 : Propriétés mécaniques de bois indigènes au Canada (Jessome 1977)

	Essences	Densité anhydre (kg/m ³)	Retrait Volumique (%)	Module d'élasticité MOE (MPa)	Module de rupture MOR (MPa)
Résineux	Mélèze occidental	640	8,0	14 300	107,0
	Douglas	510	7,0	13 500	88,6
	Pruche occidentale	470	8,1	12 300	81,1
	Sapin gracieux	412	7,5	11 400	68,9
	Pin tordu	455	6,6	10 900	76,0
	Épinette noire	445	6,5	10 400	78,3
	Pin gris	454	5,7	10 200	77,9
	Sapin baumier	367	5,7	9 650	58,3
Feuillus	Ostryer de Virginie	786	12,4	15 800	135,0
	Chêne blanc	775	9,6	15 500	121,0
	Érable à sucre	702	9,3	14 100	115,0
	Bouleau jaune	649	9,9	14 100	106,0
	Hêtre à grandes feuilles	705	11,7	14 000	116,0
	Chêne rouge	655	6,9	11 900	98,7
	Peuplier faux-tremble	424	8,3	11 200	67,6
	Érable rouge	586	8,2	11 100	97,6
	Orme d'Amérique	617	9,4	10 400	86,3
	Tilleul d'Amérique	423	13,4	9 450	60,8

Un regard rapide de ces résultats permet de constater que certaines essences de bois de feuillus ont des propriétés mécaniques semblables (souvent supérieures) aux essences présentement énumérées dans la norme CSA-O86-01. De plus, certains bois de feuillus possèdent de fortes propriétés mécaniques (MOE et MOR) et pourraient produire des produits de bois d'ingénierie de haut grade. Ces derniers pourraient permettre à l'industrie d'attaquer le marché non-résidentiel de la construction (Chui & Delahunty 2005). A titre d'exemple, certains fabricants de poutrelles en I utilisent présentement des semelles en bois de charpente composites (LSL et LVL) afin de développer de grandes capacités mécaniques (CCMC 2005a, 2005b). Par contre, Chui & Delahunty (2005) mentionnent qu'étant donné le prix élevé du SCL et que les constructeurs préfèrent utiliser du bois de sciage, les

fabricants canadiens de produits de bois d'ingénierie ne sont pas souvent enclins à substituer le bois de sciage pour du SCL.

Dans le but de trouver une nouvelle source d'approvisionnement en bois, un groupe de chercheurs américains s'est penché sur la possibilité de l'utilisation de certains bois de feuillus dans la fabrication de lamellé-collé (Janowiak *et al.* 1997, Janowiak *et al.* 1995, Manbeck *et al.* 1996, Moody *et al.* 1993, Shedlauskas *et al.* 1996). En outre, une étude sur le tulipier mentionne que cette essence n'est présentement pas utilisée dans la fabrication de lamellé-collé, mais que ses propriétés mécaniques suggèrent qu'elle serait adéquate (Moody *et al.* 1993). Les essences étudiées furent le tulipier, l'érable rouge et le chêne rouge. Les résultats de ces trois études sur le comportement en flexion de lamellés-collés produits à partir de bois de feuillus démontrent qu'il est possible de fabriquer un lamellé-collé ayant une résistance en flexion de 16,5 MPa (2 400 lb/po²) et un module d'élasticité de 12,4 GPa (1,8x10⁶ lb/po²) (Manbeck *et al.* 1996). On remarque donc que l'industrie du lamellé-collé a déjà pensé à élargir son approvisionnement en bois.

L'industrie de la poutrelle en I s'est elle aussi questionnée quant à l'utilisation de bois de feuillus. En effet, Brashaw & Vatalaro (2000) ont étudié la faisabilité de produire des poutrelles en I en utilisant l'érable à sucre, le bouleau jaune, l'érable rouge et le peuplier faux-tremble. L'utilisation des cœurs de bois franc (le bouleau blanc, le bouleau jaune et l'érable à sucre) dans les poutrelles en I fut également étudiée (Verreault 2000). Plus récemment, Chui & Delahunty (2005) ont étudié la faisabilité de produire des poutrelles en I et des lamellés-collés à partir d'érable rouge. Des problèmes de collage au niveau du joint furent par contre fréquemment rencontrés. Les auteurs se questionnent à savoir si les adhésifs structuraux présentement utilisés pour les bois de résineux sont adéquats pour une utilisation avec des bois de feuillus.

2.3.3 Les essences de bois spécifiées dans les normes

Dans le domaine du lamellé-collé, le *Wood Handbook* (FPL 1999) mentionne que les classes de bois couramment utilisées dans la fabrication de lamellé-collé sont le Sapin Douglas-Mélèze (*Douglas Fir-Larch*), le Pin du Sud (*Southern Pine*), la Pruche-Sapin (*Hem-Fir*) et l'Épinette-Pin-Sapin (EPS ou *SPF* en anglais), soit tous des bois de résineux. Bustos (2003) renchérit en mentionnant qu'au Canada, les fabricants de produits de bois d'ingénierie, ou de composantes, utilisent principalement la classe EPS. Plus précisément au Québec, l'épinette noire est l'essence privilégiée à cause de sa densité et de ses bonnes propriétés mécaniques (Mohammad 2002). À ce jour, les bois de feuillus sont peu utilisés dans la fabrication de produits de bois d'ingénierie structuraux canadiens, à l'exception de quelques fabricants qui utilisent le peuplier, le tremble, le bouleau et l'érable rouge (CCMC 2002a, 2002b).

Par ailleurs, tel qu'indiqué dans le *Wood Handbook* (FPL 1999), pratiquement toutes les essences de bois peuvent être utilisées dans la fabrication de produits de bois d'ingénierie, en autant que ses propriétés mécaniques et physiques sont adéquates et qu'elles peuvent être convenablement collées. Par ailleurs, Morasse (1980) mentionne que la fabrication de lamellé-collé nécessite un bois pouvant offrir de bonnes aptitudes au séchage, au collage, au sciage, au rabotage et ponçage et possédant de bonnes résistances mécaniques. Or, si les bois de feuillus rencontrent ces exigences, ils pourraient donc être aptes à la fabrication de produits de bois d'ingénierie.

À cet effet, les normes de l'industrie du lamellé-collé couvrent plusieurs essences de bois de résineux et de feuillus. Il existe deux normes américaines de fabrication publiées par l'*American Institute of Timber Construction (AITC)* régissant l'utilisation des bois de résineux et de feuillus dans la fabrication d'un lamellé-collé (AITC 1993, 1996). Tout d'abord, la norme AITC-117 prescrit les lignes directrices et les propriétés mécaniques d'un lamellé-collé fabriqué à partir de combinaisons d'essences de bois de résineux, alors que la norme AITC-119 concerne l'utilisation des bois de feuillus. Il est pertinent de

mentionner que les normes canadiennes CSA-O86-01 et CSA-O122-M89 ne présentent aucune directive précise quant à l'utilisation de bois de feuillus dans la conception d'éléments de charpente en bois y compris le lamellé-collé. (CSA 1990, 2002). La norme américaine ASTM-D3737 (ASTM 2005c) explique la méthodologie pour dériver les propriétés mécaniques d'un lamellé-collé selon l'utilisation de bois classés visuellement ou classés par contraintes mécaniques (essais non destructifs de type *E-rated* ou MSR) ou lors d'un mélange des deux classes de bois.

En ce qui concerne les poutrelles en I, la norme américaine ASTM-D5055 mentionne uniquement que le bois utilisé pour la fabrication des semelles doit être conforme aux règles de classification de l'*American Lumber Standards Committee (ALSC)* ou la *Canadian Lumber Standards Accreditation Board (CLSAB)* (ASTM 2005d). Les autres essences de bois peuvent être utilisées selon qu'elles suivent les lignes directrices décrites dans la norme. Nous ne retrouvons aucune contre-indication quant à l'utilisation des bois de feuillus pour les semelles de poutrelles en I dans cette norme américaine, ni dans les normes canadiennes (CCMC 2003, NLGA 2003a, 2003c). Tel que mentionné précédemment, ces dernières mentionnent qu'elles s'appliquent à toutes les essences ou groupe d'essences de bois prescrites par les règles de la NLGA.

Finalement, compte tenu que les normes canadiennes n'indiquent aucune restriction claire quant à l'utilisation de bois de feuillus d'haute densité dans la fabrication de produits de bois d'ingénierie et que présentement, les bois de résineux sont majoritairement utilisés (Bustos 2003, FPL 1999, Mohammad 2002, St-Pierre 2003), nous considérons que les bois de feuillus semblent une bonne alternative pour la fabrication de bois de charpente à plus haute performance. De surcroît, suivant la conclusion de l'analyse annuelle de la CEE-ONU (2004), la clé du succès du lamellé-collé réside dans la construction non résidentielle, ce qui explique la recherche des fortes propriétés mécaniques des bois de feuillus.

Chapitre 3 - Matériel et méthode

3.1 Le modèle conceptuel

Tout d'abord, il est important de définir nos paramètres à étudier. Dans le cadre de ce travail, nous étudierons l'effet de la vitesse de coupe ainsi que l'avance par couteau sur la résistance en traction parallèle au fil. Tel que mentionné auparavant, ces paramètres influencent la résistance d'un joint par entures multiples et doivent donc être optimisés.

3.1.1 Les paramètres indépendants

La plupart des paramètres d'usinage présentés au Tableau 10 proviennent des travaux de Bustos (2003) et St-Pierre (2003) et sont les paramètres usuels rencontrés en industrie.

La teneur en humidité et la température du bois

Le bois utilisé fut du bois d'érable à sucre de dimension nominale de 2x4 pouces (38 x 89 mm) conditionné à une teneur en humidité de 12% à une température ambiante de 20°C et une humidité relative de 65%. Ces conditions sont optimales pour l'épinette noire (2002) et le pin du sud (FPL 1999), ce qui nous permet de croire qu'elles sont les meilleures pour les expériences avec l'érable à sucre et nous donnent des résultats pour une comparaison équitable.

Tableau 10: Caractéristiques d'usinage

Caractéristiques d'usinage pour l'aboutage à entures multiples	
Vitesse(s) de rotation des têtes porte-outils	Voir section 3.1.3
Vitesse(s) d'avance des blocs à l'usinage	Voir section 3.1.3
Angle d'attaque des couteaux	20°
Nombre de boulons par tête profileuse	6
Pression longitudinale	6,89 MPa
Pression latérale	0,28 MPa
Temps de pression	7 à 20 secondes
Temps de durcissement	24 heures
Température de cuisson	Température ambiante (~20°C)
Humidité relative de cuisson	Humidité relative ambiante (~65%)
Quantité d'adhésif appliqué)	180 à 250 g/m ² par enture, 1 côté seulement
Viscosité de la résine UX-200	3420 cP
Viscosité du durcisseur WD3-A200	1300 cP

L'adhésif

L'aboutage par entures multiples pour la fabrication de produits de bois d'ingénierie nécessite de grandes vitesses de transformation. A cet effet, les adhésifs utilisés pour ce genre de transformation doivent être caractérisés par une vitesse de durcissement rapide et une grande résistance afin de maintenir les pièces jointes ensemble pour de plus amples transformations (King & Chen 2001).

Le bois étant un matériau poreux, il est essentiel que l'adhésif pénètre bien dans le bois afin de bien coller. King & Chen (2001) mentionnent que les adhésifs à base d'eau sont généralement plus désirables pour coller du bois puisque le bois est capable d'absorber une grande quantité d'eau dans les cellules de lumens et entre les parois cellulaires. Les adhésifs de type polyuréthane sont un choix judicieux compte tenu qu'ils réagissent bien avec l'eau lors de la réticulation.

Il a été décidé d'utiliser l'adhésif Isofet® UX-200/WD3-A200, un adhésif contenant un polymère en émulsion aqueuse combiné à un polyuréthane. Cet adhésif est un système à deux composants, soit une base de polymère émulsifié (le WD3-A200) et un prépolymère polyuréthane (le UX-200). Ce produit peut servir d'adhésif pour les éléments structuraux en bois entrant dans la fabrication des produits en bois d'ingénierie là où une résistance élevée à l'humidité est requise (CCMC 2002c). De plus, cet adhésif produit d'excellentes propriétés en cisaillement et en traction, ainsi qu'au fluage (ASCC 2005). King & Chen (2001) ont étudié la performance d'un adhésif similaire (le Isofet® UX-100) lors de l'aboutage de bois de placages stratifiés (LVL), de sapin-douglas, de pin jaune du sud, d'épinette noire et lors de l'assemblage de poutrelles en I. Ils conclurent que ce type d'adhésif possède une excellente résistance et une excellente durabilité pour des applications extérieures, ainsi que pour l'assemblage de poutrelles en I. Ces deux types d'adhésifs (UX-100 et UX-200) sont reconnus par le Centre Canadien des Matériaux de Construction (CCMC) et peuvent servir d'adhésif pour les éléments structuraux en bois entrant dans la fabrication de produits de bois d'ingénierie là où une résistance élevée à l'humidité est requise, conformément à l'esprit du Code National du Bâtiment du Canada 1995 (CCMC 2002c).

La géométrie du joint

Dans le cadre de ce travail, nous avons opté pour un type de joint sans épaulement compte tenu de la bonne performance mécanique que ce joint procure (Bustos 2003, Mohammad 2002). De plus, étant donné que nous visons l'utilisation de l'érable à sucre dans les semelles des poutrelles en I et ajourées ainsi que pour les lamelles externes de lamellés-collés, tous des éléments sujets à des efforts principalement en traction lors de leur mise en service, nous avons opté pour des joints horizontaux permettant une plus grande surface de collage (Bustos 2003). Ce type de joint est également le plus couramment utilisé en Amérique du Nord.

Pour des raisons pratiques et industrielles, nous avons opté pour un profil géométrique classique, soit celui illustré à la Figure 15.

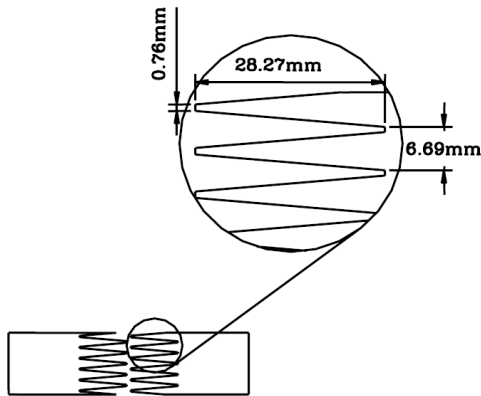


Figure 15 : Profil géométrique du joint par entures multiples (Bustos 2003)

La pression d'assemblage

La norme canadienne SPS-1 mentionne que la pression d'assemblage appliquée lors de l'aboutage et lors du durcissement du plan de colle doit être conforme à la taille de la pièce de bois, à son essence, au profil du joint et au procédé utilisé (NLGA 2003a). De plus, il est important d'appliquer une pression adéquate afin que les pièces soient bien agencées, mais il ne faut pas que cette pression soit trop grande afin de ne pas endommager les pointes des entures (Fisette & Rice 1988). Les bois plus forts, plus rigides et plus denses requièrent une plus grande pression d'assemblage afin de fournir un bon contact entre les surfaces de collage et l'adhésif (FPL 1999).

La pression longitudinale d'assemblage fut fixée à 6,89 MPa (1000 psi). L'équipement utilisé ne nous permettait pas de modifier ce paramètre. Cependant, cette pression fut

utilisée par Verreault (2000) sur les cœurs de bois franc (le bouleau blanc, le bouleau jaune et l'érable à sucre) et a procuré des résultats satisfaisants.

3.1.2 Les paramètres dépendants

Les études réalisées sur des bois comportant une densité semblable à celle de l'érable à sucre, autour de 700 kg/m^3 , nous ont permis d'effectuer un tri préliminaire quant à nos intervalles d'études pour les vitesses de coupe et les vitesses d'avance par couteaux.

Les paramètres d'usinage sont des éléments clé affectant le procédé d'aboutage et conséquemment, la performance du produit fini. Bien que nous ayons mentionné précédemment à la section 2.2.1 que nos paramètres allaient être déterminés en fonction d'une densité voisine à celle de l'érable à sucre, le nombre limité d'informations sur ce type d'étude ne nous permet pas de conclure convenablement un intervalle d'avances par couteau. Cependant, les avances par couteau recensées varient entre 0,64 et 1,14 mm. Nous nous baserons donc sur cet intervalle pour nous fixer trois avances par couteau, soit 0,60, 0,70 et 0,80 mm en faisant varier la vitesse de coupe et la vitesse d'avance.

3.1.3 Dispositif expérimental

Selon les paramètres dépendants déterminés précédemment, nous obtenons les combinaisons d'aboutage montrées au Tableau 11. Nous obtenons neuf vitesses d'avance en variant la vitesse de coupe et l'avance par couteau. Ces diverses combinaisons couvrent les paramètres optimaux rencontrés dans la littérature et ceux utilisés en industrie. De plus, des essais préliminaires d'usinage ont été effectués et une analyse visuelle des surfaces nous a permis de constater que ces paramètres génèrent des surfaces qui semblent de bonne qualité dans l'érable à sucre (Lefèbre 2006).

Tableau 11 : Dispositif expérimental

Avance par couteau (mm)	Vitesse de coupe (m/min)	Vitesse de rotation (RPM)	Vitesse d'avance résultante (m/min)	Nombre d'essais (quantité cible)
0,60	2097	2500	9,0	28
	2726	3250	11,7	28
	3355	4000	14,4	28
0,70	2097	2500	10,5	28
	2726	3250	13,7	28
	3355	4000	16,8	28
0,80	2097	2500	12,0	28
	2726	3250	15,6	28
	3355	4000	19,2	28

Des essais de traction parallèle au fil, sur une série de contrôle de pièces de 2,4 m (96 po) non aboutées, seront également effectués selon la norme ASTM-D198 (ASTM 2005b) afin de comparer le rendement des capacités des pièces aboutées vis-à-vis celles des pièces non-aboutées.

3.2 Le modèle opératoire

Avant d'entreprendre les essais mécaniques du bois abouté, diverses étapes de préparation et de conditionnement du bois sont nécessaires.

3.2.1 Préparation des échantillons de bois

Le bois utilisé dans le cadre de ce projet de mémoire consiste en des blocs de 4x6 pouces de cœur d'érable à sucre destinés à la fabrication de palettes. Le bois a été fourni par la compagnie Gestofor Inc de St-Raymond, Québec. Nous avons obtenu un total de 4192 pmp de blocs de 4x6 pouces (102 x 152 mm) en longueurs variant de 2,4 à 3,6 m (8 à 12 pi). Ce

grade de bois se vend beaucoup moins cher par rapport aux autres grades puisque qu'il est disqualifié pour l'industrie du meuble et du plancher à cause d'une coloration plus brunâtre que les autres. Toutefois, ses propriétés mécaniques ne sont pas affectées. Les étiquettes des paquets sont présentées à l'Annexe I.



Figure 16 : Blocs de 4x6 d'érable à sucre

Les cœurs de bois francs ont été sciés en planches de dimensions initiales de 45 x 100 mm afin de tenir compte du retrait volumique lors du séchage des pièces. La détermination de la teneur en humidité initiale des pièces fut obtenue à partir des masses anhydre et humide de trois pièces de bois et une densité basale de 600 kg/m³. Il en résulta que les blocs de cœur avaient une teneur en humidité de 50%, c'est-à-dire qu'ils étaient à l'état vert. Les résultats de teneur en humidité et les équations sont présentés à l'Annexe II.

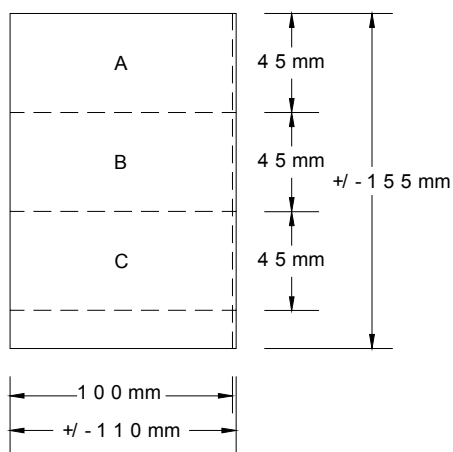


Figure 17 : Coupe des blocs de 4x6

Toutes les pièces sciées furent immédiatement placées au congélateur (à une température de -8°C) afin de conserver leur teneur en humidité et par conséquent leur dimension initiale. Les pièces furent ensuite placées dans un séchoir conventionnel jusqu'à une teneur en humidité de 15% selon une planification de séchage accéléré (Simpson & Wang 2005). Finalement, elles furent rabotées en pièces se rapprochant des dimensions usuelles de 2x4 pouces, soit 38 x 89 mm.

Par la suite, un éboutage complet des pièces séchées fut effectué basé sur un classement visuel. Cette étape consiste à retirer les défauts des pièces de bois afin de produire des blocs de 15 à 244 cm (6 à 96 po) rencontrant les critères de qualité de la norme SPS-1 (NLGA 2003a) pour du bois de qualité No.1 et 2. Cette étape permet également d'améliorer la qualité du produit fini. À cet effet, la norme SPS-1 requiert que les joints à entures multiples soient formés dans du bois sain qui est autrement conforme aux exigences de déviation de fil et autres exigences visuelles et qui satisfait aux exigences de la qualité No.2 ou Standard. La déviation de fil doit être inférieure à 1 dans 8 et le déplacement des nœuds ne doit pas excéder 10% de la section s'ils sont situés au joint. La flache ne doit pas excéder plus que la moitié de l'épaisseur et dans la mesure du possible, la flache des deux pièces formant le joint devrait être placée dans le même coin.

À la suite du séchage et de l'éboutage, nous avons obtenu 1428 pmp de bois sain (conforme à SPS-1) pour effectuer notre expérimentation. Le deux-tiers du volume de bois initial (4192 pmp) fut rejeté suite au séchage (pièces tordues et/ou fendues) et à l'éboutage.

3.2.2 Procédé d'aboutage

Suite à la préparation des échantillons de bois, les blocs de 15 à 244cm (6 à 96po) furent acheminés dans la jointeuse de Conception RP 2000 à alimentation latérale où les entures horizontales furent produites aux extrémités des blocs selon les paramètres d'usinage étudiés et la géométrie montrée à la Figure 15. Compte tenu que l'usinage des pièces a duré un peu plus de quatre heures et que les quatre premières heures d'opération n'ont pas d'effets significatifs sur la qualité des joints (Reeb *et al.* 1998), l'usure des couteaux fut négligée.

Ensuite, les blocs furent retirés de la ligne de production afin d'appliquer manuellement l'adhésif de type Isoset® UX-200/WD3-A200. La Figure 18 montre le système d'application consistant en deux tubes cylindriques contenant le prépolymère polyuréthane UX-200 et la base de polymère émulsifié WD3-A200 permettant un mélange des deux composantes dans un ratio 4:1 par volume. La Figure 19 montre un dispositif d'encollage manuel, quoique légèrement différent de celui utilisé dans le cadre de ce projet. Une quantité d'adhésif de 180 à 250 g/m² fut appliquée sur une extrémité des blocs selon les recommandations du fabricant (Martineau 2006).

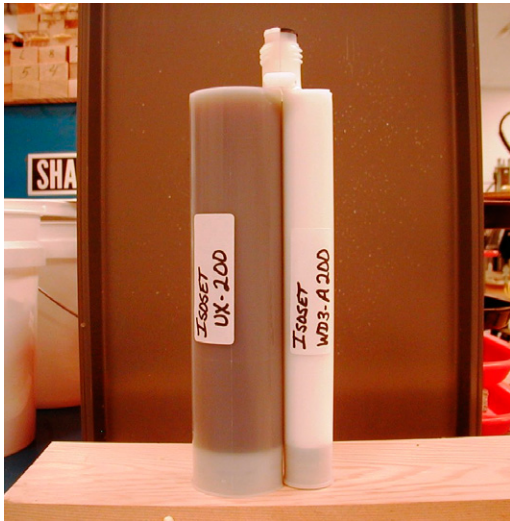


Figure 18 : Tubes d'adhésif UX-200/WD3-A200 (Martineau 2006)

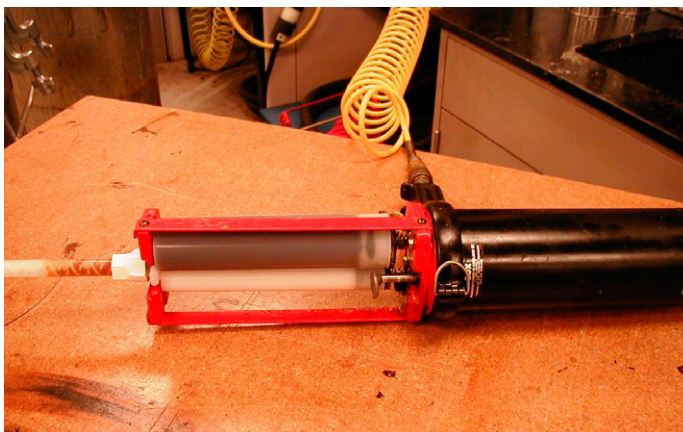


Figure 19 : Dispositif d'encollage manuel (Martineau 2006)

Les blocs encollés furent par la suite remis sur la ligne de production afin de les abouter. Ils entrent l'un dans l'autre de façon continue dans le couloir d'accélération et une pression longitudinale de 6,89 MPa (1000 psi) et une pression latérale de 0,28 MPa (40 psi) ont été appliquées pendant une période de 7 à 20 secondes. Lors de l'application de la pression d'assemblage (longitudinale et latérale), la distance entre l'extrémité d'une enture quelconque et la base de la rainure correspondante ne doit pas excéder 1,6 mm (1/16 po) et

le décalage entre les surfaces du bois de part et d'autre du joint, dans la direction verticale ou latérale, ne doit pas dépasser 1,6 mm (1/16 po) (NLGA 2003a).

Finalement, une scie ébouteuse coupa les pièces à une longueur préliminaire de 1,8 m (72 po) et les pièces reposèrent pendant une période d'au moins 24 heures afin de compléter le durcissement de l'adhésif dans les conditions ambiantes du laboratoire.

Il est important de mentionner que toutes les pièces aboutées furent examinées visuellement afin de satisfaire aux exigences de la norme SPS-1 (NLGA 2003a) avant d'entreprendre les essais mécaniques de traction.

3.2.3 Contrainte d'épreuve en traction

Pour les raisons énumérées à la section 2.2.2 , des essais de traction parallèle au fil furent effectués selon les normes SPS-1 (NLGA 2003a) et ASTM-D198 (ASTM 2005b) afin d'évaluer la performance des joints par entures multiples par rapport aux diverses variables étudiées (vitesse de coupe et avance par couteau). Bien que la norme SPS-1 exige que des essais de flexion soient également effectués sur la rive et sur la face des pièces, nous ne nous attarderons pas à ces essais dans le cadre de ce travail en se basant sur les conclusions de Kent & Leichti (2005).

Le principe de ces essais est d'appliquer uniformément une contrainte de traction longitudinale à la section transversale des pièces de bois aboutées à l'aide d'une machine Metriguard (modèle 412). La résistance ultime en traction (ou *UTS - Ultimate Tensile Strength*) est alors obtenue à partir de l'équation 4 suivante :

$$UTS(MPa) = \frac{P}{bh} \quad (4)$$

Où P est la force appliquée (N), b est la dimension de la face étroite et h est la dimension de la face large. La vitesse de la charge ne doit pas provoquer un taux d'augmentation de contrainte dépassant 14,9 MPa/seconde (130 000 psi/min) (NLGA 2003a).

Étant donné que les pièces aboutées ont été rabotées, afin d'éviter des glissements dans les sabots de la machine de traction, les dimensions finales des pièces étaient donc toutes inférieures à 38 x 89 mm. Par ailleurs, si les dimensions transversales (b et h) sont moindres que les dimensions prescrites par la norme SPS 1, une dimension transversale de 38 x 89 mm doit être utilisée lors du calcul de la contrainte en traction.

Tout d'abord, une série de contrôle effectuée sur des échantillons de bois de pleine longueur (non-aboutés) fut effectuée afin de fixer un aperçu de la résistance de notre bois. La portée libre des essais (entre les sabots) fut de 1219 mm (48 po). La série de contrôle comporte 28 échantillons d'une longueur totale de 2438 mm (96 po). Quatre échantillons furent rejetés de l'analyse à cause de nœuds ne rencontrant pas les exigences de SPS-1 (NLGA 2003a). Les résultats obtenus pour cette série sont présentés à l'Annexe III.

Puis, des essais de traction furent effectués sur des échantillons d'une longueur totale de 1828 mm (72 po). La portée libre des essais fut de 610 mm (24 po) et tous les échantillons comportaient au moins un joint dans cette portée libre. L'échantillonnage des neuf séries aboutées varie entre treize et vingt-six à cause de nombreuses ruptures dans les sabots ou de modes de rupture hors de l'enture (mode #6). Les résultats obtenus pour ces séries sont présentés à l'Annexe IV.

Pour tous les essais, les modes de rupture (se référer au Tableau 4) furent enregistrés et la teneur en humidité des pièces fut prise de part et d'autre de l'emplacement de la rupture. Des exemples de ruptures rencontrées lors de l'expérimentation sont présentés à l'Annexe V.

Chapitre 4 - Influence of Machining Parameters on the Tensile Strength of Finger-Jointed Sugar Maple Lumber

4.1 Abstract

Presently, finger-jointed softwood lumber is used in manufacturing of structural engineered wood products such as glued laminated (glulam) beams and prefabricated wood I-joists. However, the use of high-density hardwoods appears to be an attractive alternative material to achieve a higher performance of these products. Certain machining parameters have to be controlled in order to produce suitable gluing surfaces and to optimize the finger-jointing process. The main objective of this study was to evaluate the effect of machining parameters on the ultimate tensile strength parallel to grain (UTS) of finger-jointed sugar maple dimension lumber. Three different chip-loads and three cutting speeds were used as variables. Based on test results, the cutting speed appeared to influence the UTS the most. The best average UTS (47.1 MPa) of finger-jointed sugar maple specimens were achieved with a chip-load of 0.60 mm and a cutting speed of 2726 m/min (rotation speed of 3250 RPM and feed speed of 11.7 m/min).

Keywords: finger-jointed lumber, machining, engineered wood products, sugar maple, hardwood.

4.2 Introduction and Background

Finger-jointing allows using low-grade dimension lumber to obtain high quality structural products with enhanced resistance and visual appearance by removing undesirable defects and producing lumber stock of greater lengths than common sawn timber. Finger-jointed lumber is mainly used in manufacturing of structural engineered wood products (EWP) such as glued laminated (glulam) beams and wood I-joists. The success of the EWP relies on a more intelligent use of wood fiber, which allows reaching higher strength, dimensional stability and reduced variability of the end product.

The manufacturing process of glulam and I-joists requires a constant feed of high quality finger-jointed stock. With the increasing demand forecast for EWP over the next 5 years (APA 2006), the declining wood fiber availability on North American landscapes since 1990 (Schuler *et al.* 2001) and Quebec Chief Forester's decision to reduce harvesting woods of the spruce-pine-fir (SPF) group by 23% beginning in 2008 (Bureau du Forestier en Chef 2006), one can foresee the increasing gap between demand for EWP and the softwood fiber supply. In order to reduce the deficit, some studies have already been conducted looking at the use of hardwood species (Chui & Delahunty 2005, Manbeck *et al.* 1996, Verreault 2000), structural composite lumber or fiber-reinforced polymers in EWP (Hernandez *et al.* 1997, Pelvris & Triantafillou 1992, Spaun 1981).

Quality and volume of lumber as well as its machining parameters are important elements of the manufacturing process in order to achieve the maximum capacity of the engineered product. Numerous studies have been conducted on finger-jointed lumber of softwood species that are commonly approved in North American construction standards, but few are those relating to the machining parameters and finger-jointing of hardwoods. However, the use of high-density hardwoods appears to be an attractive alternative material for the EWP due to their outstanding strength properties. In order to provide a high-performance glued joint, a smooth and undamaged contact surface is required (Sellers Jr. *et al.* 1988). Poor machining practices damage the wood fibers and generate rough surfaces, which impair full

contact, restrain the adhesive flow and increase the required amount of adhesive for wetting the gluing surface properly. To ensure quality of the finger-jointing process, the gluing surfaces should be machined with well-sharpened tools under prescribed machining parameters, such as chip-load, rotation speed of the cutting heads, feed speed and cutting speed (Mohammad 2002).

The chip-load is defined as the amount of material removed by each revolution of the spindle, and this parameter should be adequate to prevent the cutting tools from burning and to provide a nice finish to the contact surface. An increase in chip-load creates an increase in the applied pressure by the cutting tools, causing an excessive heat on the wood surface and wood tear-out (Bustos 2003). On the other hand, a too low chip-load implies that the cutting tools will rub the wood and will not produce an adequate cut, because the gluing surfaces are negatively affected by the heat created by the friction (Hernández & Naderi 2001, Hernández & Rojas 2002). Hernández & Naderi (2001) mention that the sugar maple gluing capability decreases with an increase of the cutting tool width. Furthermore, a better shear resistance along the glue lines has been observed when using knives with a smaller rake angle (angle of attack).

There is a significant effect of the knives wear on the sugar maple gluing capability (Hernández & Rojas 2002). In regards to this effect, Reeb *et al.* (1998) evaluated the finger-joints quality after 4, 6 and 32 hours of knife wear. Test results on finger-jointed Ponderosa Pine showed a direct relation between the damaged cells depth and the knife wear. The gluing surface becomes rough and irregular with a prolonged use of knives. It has been concluded that knives maintenance is a crucial factor in manufacturing high-quality gluing surfaces.

Bustos *et al.* (2004) studied the influence of machining parameters on the ultimate tensile strength (UTS) of finger-joints made of black spruce lumber using three chip-loads and

three cutting speeds. In most cases, results showed lower UTS for all three chip-loads when using high cutting speeds. It has been concluded that cutting speeds greater than 2932 m/min are not advisable and a speed in the range of 1676 and 2932 m/min appears to produce satisfactory results for the three studied chip-loads. The best results have been obtained at a cutting speed of 1676 m/min and a chip-load of 0.86 mm. It remains unclear if cutting speeds lower than 1676 m/min would produce better results as it was the lowest speed studied. The adhesive used by Bustos *et al.* (2004) was a two-component system consisting of an Isoset® UX-100 polyurethane prepolymer mixed with an Isoset® WD3-A322 emulsion polymer, a water-based adhesive of the polyurethane family. Wood is a porous material and it is capable of absorbing a high quantity of water and forming a strong bond. Therefore, water-based adhesives seem to be a logical choice for wood bonding (King & Chen 2001). In this study, an Isoset® UX-200/WD3-A200 adhesive from the same family of polyurethanes was used for finger jointing, because it is currently used by a number of EWP producers.

The main objective of the present study was to evaluate the effect of machining parameters on the finger-jointing process of sugar maple using an Isoset® UX-200/WD3-A200 adhesive, in an attempt to define an operating envelope where appropriate finger-jointed product performance could be achieved. Specifically, the ultimate tensile strength parallel to grain of finger-jointed sugar maple lumber was studied by varying the chip-load and the cutting speed of the cutting heads and compared with SPS-1 and SPS-4 special products standards requirements (NLGA 2003a, 2003b) for finger-jointed softwood lumber and results obtained by Bustos *et al.* (2004) for finger-jointed black spruce with a similar adhesive.

4.3 Materials and Methods

The raw materials used for this project were 102 x 152 mm (4 x 6 in.) blocks of unseasoned sugar maple heartwood harvested in St-Raymond (Quebec, Canada) and intended for the

manufacturing of pallets. A total volume of 22.3 m³ (4192 pmp) in lengths ranging from 2.4 to 3.6 m (8 to 12 ft) was obtained for this study. The initial moisture content of wood was approximately 50% determined using oven-dry weight method on three random samples. The blocks were sawn to initial dimensions of 45 x 100 mm and were stored in a freezer at a temperature of - 8°C (18°F) in order to maintain their initial moisture content and dimensions before kiln-drying. Then, the lumber was dried in a conventional kiln-dryer to a nominal equilibrium moisture content of approximately 15%. The drying schedule was based on the drying method for maple lumber of structural uses described by Simpson & Wang (2005). After drying, the lumber was machined to final dimensions nearest to a nominal 2 x 4 in. (38 x 89 mm). Next, based on visual inspection, defects were removed from the dried specimens to generate pieces from 15 to 244 cm (6 to 96 in.) in length meeting the visual grading requirements of SPS-1 (NLGA 2003a) for No.2 lumber grade with respect to knots, wane, slope of grain, warp, splits, etc. A total volume of 7.6 m³ (1428 pmp) of sound wood meeting the SPS-1 requirements was obtained for finger-jointing, therefore, yielding one third of the initial unseasoned wood volume (34% out of 22.3 m³) after drying, planing grading and defecting.

The pieces were then forwarded to a Canadian Conception RP 2000 fingerjointing machine, provided with a lateral feed system, where the horizontal finger-joint profile (machined across the width) of the feather type was machined at both ends. The geometry and dimensions of the finger profile are shown in Figure 20. Table 1 shows the machining parameter combinations used to produce the finger joints in this study. Chip-load and cutting speed combinations were chosen with consideration to previous studies by Bustos (2003) and Verreault (2000). Various feed speeds were achieved by varying the chip-load, while keeping the cutting and rotation speed of the cutting heads constant. The feed speed ranged from 9.0 to 19.2 m/min (29 to 63 ft/min). Six sets of knives per tool were used for each chip-load and cutting speed conditions. The cutting speeds were determined from the outermost position (tip) of the knives (267 mm diameter). Knife wear was neglected assuming that the first four hours of operation would not significantly affect the joint quality (Reeb *et al.* 1998).

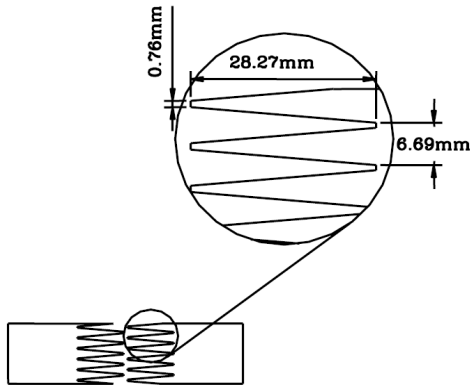


Figure 20: Finger-joint profile (Bustos 2003)

Table 1: Machining parameters studied in the experiment

Chip-load (mm)	Feed Speed (m/min) / Cutting Speed (m/min)		
	Rotation Speed (RPM)		
	2500	3250	4000
0.60	9.00 / 2097	11.70 / 2726	14.40 / 3355
0.70	10.50 / 2097	13.65 / 2726	16.80 / 3355
0.80	12.00 / 2097	15.60 / 2726	19.20 / 3355

After the machining of finger profiles, the pieces were removed from the production line in order to manually apply the polyurethane adhesive (an Isoset® UX-200/WD3-A200). The gluing system consisted of two tubes with the polyurethane prepolymer (UX-200) and the emulsion polymer (WD3-A200) permitting to mix and apply both components at a 4:1 ratio in volume. Between 2.5 and 3.5 grams of mixed glue were spread on one end of the joint following the adhesive manufacturer's recommendations. The glued pieces were then returned to the production line to complete the finger-jointing process. The assembled joints were pressed with a constant end pressure of 6.89 MPa (1000 psi) for 20 seconds at 20°C in accordance with results reported by Verreault (2000). The jointed pieces were then cut to produce 1.8-m (72-in.) long specimens for tensile tests, which were conducted after

24-h curing in room conditions. Sample size for each test series varied from 23 to 32 replicates.

The tensile tests were performed in accordance with ASTM D-198 (ASTM 2005) and SPS-1 (NLGA 2003a) standards using a Metriguard model 412 machine at Forintek Canada Corp. Eastern Laboratory. Results were evaluated according to SPS-1 (NLGA 2003a) specification for structural finger-jointed lumber. The UTS was calculated based on the actual cross-section area or 38 x 89 mm when the actual cross section was less than the SPS-1 requirement. Failure modes were examined at joint locations and classified per SPS-4 standard (NLGA 2003b). Data points with failures outside the finger joint were removed from the statistical analysis. Fifth percentile values were determined, with 75% confidence, assuming a 2-parameter Weibull statistic distribution as per ASTM D5457 (ASTM 2004).

4.4 Results and Discussion

Table 2 shows mean values and fifth percentiles of the UTS obtained for each chip-load and cutting speed after adjustment to 15% moisture content per ASTM-D1990 (ASTM 2000). All fifth percentile values were at least twice the tensile strength requirements of SPS-1 (NLGA 2003a) for 2x4 No.2 SPF grade. Also, all 9 series obtained higher fifth percentiles than SPS-4 (NLGA 2003b) requirements for FS-1.8E finger-jointed flange stock lumber (requiring 22.8 MPa). Furthermore, all series machined at 2726 m/min passed the FS-2.0E requirement of a fifth percentile UTS of 27.9 MPa.

Table 3 shows the statistics calculated from the study by Bustos *et al.* (2004) on finger jointed black spruce. When comparing the results in Table 2 and Table 3, one can see that only one series from Bustos *et al.* (2004) showed higher UTS values than the minimum values obtained in our study. It gives evidence that the use of sugar maple can be a good

alternative to softwood currently used in the manufacturing of structural engineered wood products.

ANOVA statistical tests indicated that the chip-load did not have a strong effect on the UTS ($p = 0.1484$), but cutting speed did have a significant effect ($p = 0.0008$). These tests also indicated a strong interaction between the two variables on the UTS values ($p = 0.0010$).

Table 2: UTS (MPa) of finger-jointed sugar maple machined with three chip-loads and three cutting speeds ^{a, b, c}

Chip-load (mm)	Cutting Speed (m/min)			SPS-1 Tensile Strength
	2097	2726	3355	
0.60	35.3 (23.3)	47.1 (32.2)	40.3 (31.0)	10.7
0.70	39.2 (26.9)	42.0 (30.1)	39.1 (27.6)	
0.80	40.4 (23.4)	41.4 (31.0)	45.7 (27.5)	

^(a) Number of replicates varied from 13 to 26.

^(b) Numbers in parentheses are the 5th percentile values based on a 2-parameter Weibull distribution.

^(c) Wood moisture content at the time of test ranged from 9% to 12%. UTS values adjusted to a 15% MC.

Table 3: UTS (MPa) of finger-jointed black spruce from Bustos *et al.* (2004) ^{a, b, c}

Chip-load (mm)	Cutting Speed (m/min)		
	1676	2932	3770
0.64	34.1	36.7	31.1
0.86	37.4	33.6	31.1
1.14	34.4	34.5	30.7

^(a) Number of replicates varied from 25 to 34.

^(b) Numbers are the mean values of UTS.

^(c) Wood moisture content at the time of test ranged from 10% to 12%. UTS values adjusted to a 15% MC.

The multiple comparisons showed significant differences between the three chip-loads for each cutting speed (Figure 21). The UTS values showed a tendency to decrease with a lower cutting speed with maximum values when machined with the intermediate cutting speed of 2726 m/min. It is likely that at low cutting speed, the wood surface is damaged due to rubbing. On the other hand, at 2726 m/min, the UTS reach a minimum at the intermediate chip-load, with the opposite effect at the 2097 m/min cutting speed where the maximum value was achieved at a chip-load of 0.70 mm. It can be explained by the damage of the wood surface due to an increased pressure or the heat applied to the wood surface if the chip-load was too high for sugar maple. The maximum UTS value was obtained with a chip-load of 0.60 mm at a cutting speed of 2726 m/min. The 2nd order polynomial trend line from the influence of the feed speed on the UTS predicted an optimum fifth percentile UTS value of 30.1 MPa at a feed speed of 15.0 m/min (Figure 22).

Test results indicated that satisfactory finger-jointing can be achieved in the range of 2726 to 3355 m/min cutting speeds with a chip-load between 0.60 and 0.70 mm. An ANOVA statistical test (using Bonferroni adjustment for multiple comparisons method) performed on the effect of cutting speed on the UTS showed little differences between the UTS of joints obtained at 2726 and 3355 m/min ($p = 0.6438$). However, the fifth percentile values appeared to be higher for all chip loads with the cutting speed of 2726 m/min. Therefore, based on the three cutting speeds and chip loads studied, it can be concluded that 2726 m/min would be the optimum cutting speed to obtain the highest UTS of the finger-joint in sugar maple. In addition, at this speed, less knife wear is expected than at 3355 m/min. Similar statistical tests were performed on the effect of the chip-load. Results indicated that the chip-loads did not produce statistically significant differences (p -values varied between 0.18 and 1.00).

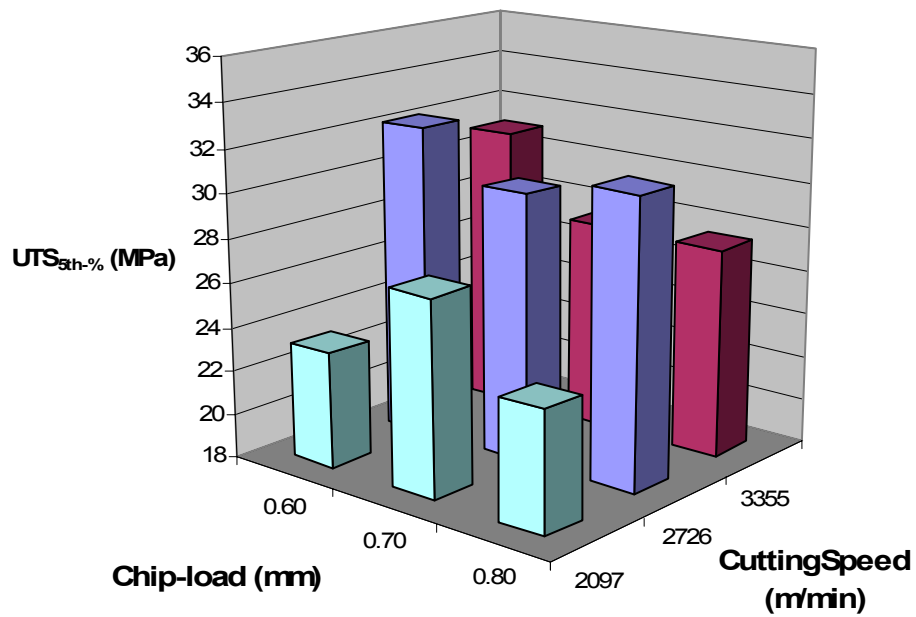


Figure 21: Influence of chip-load and cutting speed on the UTS (5th percentile) of finger-jointed sugar maple

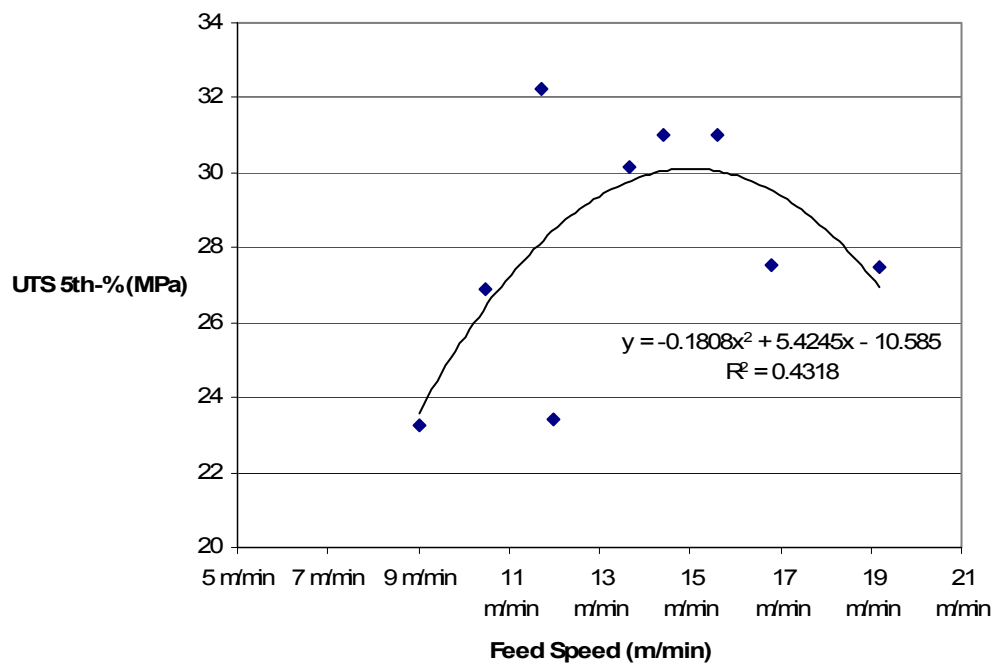


Figure 22: Influence of feed speed on the UTS (5th percentile) of finger-jointed sugar maple

Failures that occur in finger-jointed wood can be classified in 6 classes per SPS-4 standard (NLGA 2003b). Failure modes 1 and 2 are related to glue bond failures indicating a poor bonding and modes 3 to 5 are related to wood failures indicating a good bonding. Failure mode 6 is a 100% wood failure outside the finger-joint; therefore, such specimens are removed from the analysis. Wood failures (modes 3 to 5) were ranging from 41% to 85% for the tested machining conditions (Table 4). Four series out of nine could pass ANSI/AITC A190.1 (ANSI 2002) requirements to have at least 60% of wood failures for adhesives used with dense hardwoods. All series machined at a 2726 m/min cutting speed passed the 60% requirement. The lowest ratio of wood failures was found for a chip-load of 0.70 mm and a cutting speed of 2097 m/min. This result indicates that the machining was not done properly in this case because the glue application was identical for all series.

Table 4: Wood failure of finger-jointed sugar maple machined with three chip-loads and three rotation speeds

Chip-load (mm)	Cutting Speed (m/min)			ANSI/AITC A190.1 Requirement
	2097	2726	3355	
0.60	59%	62%	47%	60%
0.70	41%	83%	46%	
0.80	85%	60%	50%	

Finally, the fifth percentile UTS of the finger-jointed series developed 47 to 66% of the fifth percentile UTS value of the control non-jointed specimens. The lowest ratios (47% and 48%) were obtained from the series machined at 2097 m/min and a chip-load of 0.60 mm and 0.80 mm. The highest strength ratio (66%) was obtained for the series machined at 2726 m/min and a chip-load of 0.60 mm.

4.5 Conclusion

Comparison with SPS-1 and SPS-4 special products standards requirements (NLGA 2003a, 2003b) for finger-jointed softwood lumber and with results obtained by Bustos *et al.* (2004) for finger-jointed black spruce with a similar adhesive shows that finger-jointed sugar maple has a good potential for structural applications in engineered wood products provided that the machining parameters are properly controlled. Among two studied variables, the chip load and cutting speed, the latter appeared to have the greatest influence on the tensile strength of finger-jointed sugar maple. In this study, all samples manufactured with various chip-loads and cutting speeds met SPS-1 tensile strength requirement for No.2 SPF 2x4 lumber and SPS-4 FS-1.8E flange stock. Four series out of nine passed ANSI/AITC A190.1 requirement for adhesives used with dense hardwoods, which is to have at least 60% of wood failures. Results indicated that satisfactory finger-jointing can be achieved in the range of 2726 and 3355 m/min with a chip-load between 0.60 and 0.70 mm. The highest UTS and, therefore, the highest strength ratio (66%) were achieved with a chip-load of 0.60 mm at a cutting speed of 2726 m/min. The lowest strength ratios (47 and 48%) were obtained from two series machined with a chip-load of 0.60 and 0.80 mm and a cutting speed of 2097 m/min. The 2nd order polynomial trend line from the influence of the feed speed on the UTS predicted an optimum fifth percentile UTS value of 30.1 MPa at a feed speed of 15.0 m/min.

4.6 References

- AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE (ANSI). 2002. American National Standard for Wood Products - Structural Glued Laminated Timber ANSI/AITC A190.1. American National Standards Institute, sponsored by the American Institute of Timber Construction, Vancouver, WA.
- AMERICAN PLYWOOD ASSOCIATION (APA). 2006. Market Outlook 2006-2011. Paper presented at the 2006 Annual Meeting, St-Antonio, TX. American Plywood Association, Tacoma, WA.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). 2000. Standard Practice for Establishing Allowable Properties for Visually-Graded Dimension Lumber from In-

- Grade Tests of Full-Size Specimens. D1990. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.
- _____. 2004. Standard Specification for Computing the Reference Resistance of Wood-Based Materials and Structural Connections for Load and Resistance Factor Design. D5457. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.
- _____. 2005. Static Tests of Timbers in Structural Sizes. D198. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.
- BUREAU DU FORESTIER EN CHEF. 2006. *Possibilité forestière 2008-2013 - Résultats Provinciaux*, from <http://www.forestierenchef.gouv.qc.ca/document/resultats-provinciaux.pdf>. (June 11, 2007).
- BUSTOS, C. 2003. Optimisation du procédé d'aboutage par entures multiples du bois d'épinette noire. PhD Thesis. Université Laval, Québec.
- _____, HERNÁNDEZ, R. E., BEAUREGARD, R., & MOHAMMAD, M. 2004. Influence of machining parameters on the structural performance of finger-jointed black spruce. *Forest Prod. J.* 36(3): 359-367.
- CHUI, Y. H., & DELAHUNTY, S. 2005. Glued Engineered Products Made of Red Maple. NRCan Value to Wood project UNB6. University of New Brunswick, Wood Science and Technology Center, Fredericton, N.B.
- HERNANDEZ, R., DAVALOS, J. F., SONTI, S. S., KIM, Y., & MOODY, R. C. 1997. Strength and Stiffness of Reinforced Yellow-Poplar Glued-Laminated Beams (Research Paper FPL-RP-554). *Forest Prod. Lab., Madison, WI.*
- HERNÁNDEZ, R. E., & NADERI, N. 2001. Effects of Knife Jointing on the Gluing Properties of Wood. *Wood and Fiber Sci.*, 33(2): 292-301.
- _____, & ROJAS, G. 2002. Effects of Knife Jointing and Wear on the Planed Surface Quality of Sugar Maple. *Wood and Fiber Sci.*, 34(2): 293-305.
- KING, T. A., & CHEN, G.-F. 2001. Adhesive and Wood. *Specialty Wood Journal*, 4(6): 12-18.
- MANBECK, H. B., JANOWIACK, J. J., BLANKENHORN, P. R., LABOSKY, P., MOODY, R. C., & HERNANDEZ, R. 1996. Efficient Hardwood Glued-Laminated Beams. 1-283-290. Paper presented at the International Wood Engineering Conference, Louisiana State University.
- MOHAMMAD, M. 2002. Finger-joint Process Optimization for Structural Applications (Project No. 2739). Forintek Canada Corp., Sainte-Foy, Québec.

- NATIONAL LUMBER GRADES AUTHORITY (NLGA). 2003a. Normes de produits spéciaux pour le bois de charpente jointé SPS 1. National Lumber Grades Authority, New Westminster, BC.
- _____. 2003b. Normes de produits spéciaux pour la semelle de bois jointé. SPS 4. National Lumber Grades Authority, New Westminster, BC.
- PELVIRIS, N., & TRIANTAFILLOU, T. C. 1992. GFRP-Reinforced Wood as Structural Material. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 4(3): 300-317.
- REEB, J. E., KARCHESY, J. J., FOSTER, J. R., & KRAHMER, R. L. 1998. Finger-Joint Quality After 4, 6 and 32 Hours of Knife Wear: Preliminary Results. *Forest Products Journal*, 48(7/8): 33-36.
- SCHULER, A., ADAIR, C., & ELIAS, E. 2001. Engineered lumber products: Taking their place in the global market. *Journal of Forestry*, 99(12): 28-35.
- SELLERS JR., T., MCSWEEN, J. R., & NEARN, W. T. 1988. Gluing of Eastern Hardwoods: A Review (General Technical Report SO-71). US Department of Agriculture, Forest Service, New Orleans, LA.
- SIMPSON, W. T., & WANG, X. 2005. Drying and Heat Sterilization of Maple Lumber for Structural Uses. In *Undervalued Harwoods for Engineered Materials and Components*: 51-63. Forest Product Society, Madison, WI.
- SPAUN, F. D. 1981. Reinforcement of Wood with Fiberglass. *Forest Products Journal*, 31(4): 26-33.
- VERREAULT, C. 2000. Utilisation des coeurs de bois franc dans des bois d'ingénierie à usage structural (Projet 1949). Forintek Canada Corp., Sainte-Foy, Qc.

Chapitre 5 - Conclusion Générale

La présente étude nous a permis dans un premier temps de définir les concepts de produits de bois d'ingénierie structuraux auxquels pourrait potentiellement être destiné le bois abouté d'érable à sucre. Dans un deuxième temps, nous avons défini les concepts portant sur l'aboutage par entures multiples dont les différents paramètres influençant cette deuxième transformation du bois ainsi que les normes régissant ce procédé de transformation. Puis, nous avons décrit les deux grandes classes de bois, soit les résineux et les feuillus, ainsi que les classes de bois prescrites dans les normes nord américaines de construction en ossature de bois.

L'objectif de cette étude consistait à évaluer l'effet de la vitesse de coupe et de l'avance par couteau sur la résistance en traction parallèle au fil des joints par entures multiples fabriqués en érable à sucre. Des discussions auprès de partenaires indiquaient que l'usinage de bois de feuillus semblait être un facteur important quant à l'aboutage structural de ce type de bois (bois de feuillus de densité élevée). Trois avances par couteau (*chip-load*) et trois vitesses de coupe furent ciblés et près de 1400 pmp furent usinés selon ces paramètres (66% du volume initial fut rejeté suite au séchage et à l'éboutage). Les pièces aboutées furent ensuite soumises à des essais de traction parallèle au fil afin de déterminer le rendement de chaque série vis-à-vis la résistance en traction de pièces non-aboutées d'érable à sucre. Le 5^e centile de toutes les séries aboutées selon les diverses vitesses de coupe et les diverses avances par couteau rencontrent l'exigence de contrainte en traction de la norme SPS-1 ainsi que celle pour la qualité de bois FS-1.8E de la norme SPS-4 (NLGA 2003a, 2003c). Les analyses statistiques des 5^e centiles, selon une distribution

Weibull, sont présentées à l'Annexe VII. Entre les deux variables étudiées, la vitesse de coupe semble être la variable influençant le plus la résistance en traction de l'éérable à sucre abouté par entures multiples.

La meilleure résistance en traction parallèle au fil fut atteinte suite à un usinage avec une avance par couteau de 0,60 mm et une vitesse de coupe de 2726 m/min. Une régression polynomiale du second degré de l'influence de la vitesse d'avance sur la résistance en traction parallèle au fil prédit une résistance maximale de 30,1 MPa à une vitesse d'avance de 15,0 m/min. Les résultats indiquent qu'un aboutage satisfaisant peut être atteint lorsque les entures sont usinées à partir de vitesses de coupe comprises entre 2726 et 3355 m/min et des avances par couteau allant de 0,60 à 0,70mm. Il est à noter que tous les résultats obtenus à partir de la vitesse de coupe de 2726 m/min sont de très bons résultats. Une analyse statistique de type ANOVA indique qu'il existe très peu de différences entre les résultats obtenus à 2726 et à 3355 m/min, ce qui nous laisse croire que l'utilisation d'une vitesse de coupe de 2726 m/min serait la meilleure à utiliser (moins d'usure des couteaux et meilleurs résultats de valeurs en traction). Les résultats de l'analyse ANOVA sont présentés à l'Annexe VI. De plus, quatre séries aboutées sur neuf passent les exigences de la norme ANSI/AITC A190.1 demandant un minimum de 60% de rupture dans le bois (modes 3 à 5) pour des adhésifs utilisés avec des bois de feuillus denses (ANSI 2002). Toutes les séries usinées à 2726 m/min ont passé cette exigence du 60%. Par ailleurs, les 5^e centiles des résistances en traction parallèle au fil des séries aboutées ont développé 47 à 66% de la valeur du 5^e centile des pièces pleines longueurs d'éérable à sucre (non-aboutées). Les plus bas rapports (47 et 48%) furent obtenus à partir de deux séries usinées à une vitesse de coupe de 2097 m/min et des avances par couteau de 0,60 et 0,80mm. Le rapport le plus élevé fut obtenu à partir de la série usinée à une vitesse de coupe de 2726 m/min et une avance par couteau de 0,60mm.

Les résultats obtenus nous permettent de croire que l'éérable à sucre abouté possède un bon potentiel pour des applications structurales dont la fabrication de produits de bois

d'ingénierie structureaux. L'utilisation de bois de feuillus, dont l'érable à sucre, est faisable lorsque les paramètres d'usinage sont adéquatement contrôlés. En effet, si on compare les résultats obtenus par Bustos *et al.* (2004), qui ont étudié des joints horizontaux sur l'épinette noire, seulement une série a obtenue une résistance en traction (UTS) supérieure à notre plus basse moyenne.

La teneur en humidité moyenne des échantillons était de 10%, ce qui est passablement faible. Une teneur en humidité comprise entre 12 et 16% aurait mieux reflété ce qui se fait en industrie. De plus amples études quant à l'effet de la teneur en humidité sur les propriétés de collage de l'érable à sucre devraient être effectuées. Par ailleurs, le système manuel d'application de la colle ne nous permet pas de garantir que la quantité de colle d'un échantillon à un autre était exactement la même et qu'elle était étendue correctement dans les entures. Ce système manuel peut influencer la quantité des modes de rupture (bois/colle) compte tenu que les entures ne possédaient pas toutes la même quantité de colle. Une quantité adéquate de colle pourrait certes produire une meilleure performance du joint de colle en permettant à plus de colle de pénétrer dans les cellules du bois, sans produire un joint trop épais. Qui plus est, l'adhésif de type polyuréthane utilisé est développé, et habituellement utilisé, pour l'aboutage de bois résineux. Or, FPL (1999) mentionne que l'adhésif utilisé devrait être spécifiquement conçu pour les résineux ou les feuillus. Des études ultérieures sur le type d'adhésif utilisé pour l'aboutage de l'érable à sucre devraient être effectuées.

Finalement, l'utilisation de bois de feuillus dans la fabrication de produits de bois d'ingénierie structureaux semble une bonne alternative à un approvisionnement de bois décroissant de résineux et peut théoriquement produire un produit plus fort que lorsqu'on utilise la plupart des bois de résineux. Cependant, est-ce que l'augmentation des propriétés mécaniques du produit fini peut réellement justifier l'utilisation de feuillus ? Pour répondre à cette question, il faut considérer plusieurs facteurs : le poids de produits finis, le coût de fabrication et du transport, etc. Certains facteurs influencent l'importance commerciale

d'un bois. La taille des arbres, la qualité du bois pour un usage commercial (résistance mécanique, durabilité, stabilité dimensionnelle et aptitude au façonnage), son accessibilité (infrastructures disponibles et relief du terrain), les volumes disponibles (doivent être suffisants pour justifier le développement d'infrastructures, au besoin) et évidemment les connaissances technologiques face à ce bois (Cloutier 2005). Il serait intéressant de vérifier les implications économiques de la fabrication de produits de bois d'ingénierie faits de résineux à comparer à ceux faits de feuillus ainsi que les aptitudes à la commercialisation de l'érable à sucre pour le domaine de la construction à ossature en bois.

Bibliographie

- ADAIR, C. (2004). *Regional Production and Market Outlook for Structural Panels and Engineered Wood Products 2004-2009*. Tacoma, WA: APA Economics Report E170.
- AITC. (1992). *Manufacturing Quality Control Systems Manual AITC 200*. Englewood, CO: American Institute of Timber Construction.
- AITC. (1993). *Manufacturing Standard Specifications for Structural Glued Laminated Timber of Softwood Species AITC 117*. Englewood, CO: American Institute of Timber Construction.
- AITC. (1996). *Standard Specifications for Hardwood Glued Laminated Timber AITC 119*. Englewood, CO: American Institute of Timber Construction.
- ANSI. (2002). *American National Standard for Wood Products - Structural Glued Laminated Timber ANSI/AITC A190.1*: American National Standards Institute.
- APA. (2005). site web <http://www.apawood.org/>: APA-The Engineered Wood Association.
- APA. (2006). *Market Outlook 2006-2011*. Paper presented at the 2006 Annual Meeting, St-Antonio, TX.
- ASCC. (2005). site web <http://www.ashchem.com/>: ASHLAND SPECIALTY CHEMICAL COMPANY.
- ASTM. (2005a). *Standard Test Method for Mechanical Properties of Lumber and Wood-Base Structural Material ASTM D4761*. West Conshohocken, PA: AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS.
- ASTM. (2005b). *Static Tests of Timbers in Structural Sizes ASTM D198*. West Conshohocken, PA: AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS.
- ASTM. (2005c). *Standard Practice for Establishing Allowable Properties for Structural Glued Laminated Timber (Glulam) ASTM D3737*. West Conshohocken, PA: AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS.

- ASTM. (2005d). *Standard Specification for Establishing and Monitoring Structural Capacities of Prefabricated Wood I-Joists ASTM D5055*. West Conshohocken, PA: AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS.
- AYARKWA, J., HIRASHIMA, Y., & SASAKI, Y. (2000a). *Effect of finger geometry and end pressure on the flexural properties of finger-jointed tropical African hardwoods*. *Forest Products Journal*, 50(11/12), 53-63.
- AYARKWA, J., HIRASHIMA, Y., SASAKI, Y., & ANDO, K. (2000b). *Effect of glue type on the flexural and tensile properties of finger-jointed tropical African hardwoods*. *Forest Products Journal*, 50(10), 59-68.
- BRASHAW, B. K., & VATALARO, R. J. (2000). *Hardwood I-Joist Manufacturing and Feasibility Trials* (Project No. 187-6346). Duluth, MN: University of Minnesota Duluth.
- BUREAU DU FORESTIER EN CHEF. (2006). *Possibilité forestière 2008-2013 - Résultats Provinciaux*, from <http://www.forestierenchef.gouv.qc.ca/document/resultats-provinciaux.pdf>
- BUSTOS, C. (2003). *Optimisation du procédé d'aboutage par entures multiples du bois d'épinette noire*. Thèse de Doctorat, Université Laval, Québec.
- BUSTOS, C., BEAUREGARD, R., MOHAMMAD, M., & HERNANDEZ, R. E. (2003a). *Structural performance of finger-jointed black spruce lumber with different joint configurations*. *Forest Products Journal*, 53(9), 72.
- BUSTOS, C., HERNANDEZ, R. E., BEAUREGARD, R., & MOHAMMAD, M. (2004). *Influence of machining parameters on the structural performance of finger-jointed black spruce*. *Forest Products Journal*, 36(3), 359-367.
- BUSTOS, C., MOHAMMAD, M., HERNANDEZ, R. E., & BEAUREGARD, R. (2003b). *Effects of curing time and end pressure on the tensile strength of finger-jointed black spruce lumber*. *Forest Products Journal*, 53(11/12), 85.
- CCB. (2001). *Manuel de Calcul des Charpentes en Bois 2001*. Ottawa, Ontario: Conseil Canadien du Bois.
- CCMC. (2002a). *Selectem LVL (Mixed Birch/Aspen)* (Rapport d'évaluation CCMC-12719-R). Ottawa, On.: Centre Canadien de Matériaux de Construction.
- CCMC. (2002b). *Parallam PSL* (Rapport d'évaluation CCMC-11161-R). Ottawa, On.: Centre Canadien de Matériaux de Construction.
- CCMC. (2002c). *Isoset PEP Adhesives-UX100/WD3-322 & UX200/WD3-A200* (Rapport d'évaluation CCMC-12905-R). Ottawa, On.: Centre Canadien de Matériaux de Construction.

- CCMC. (2003). *Technical Guide for Prefabricated Wood I-Joists, Masterformat section 06171*. Ottawa, On.: Canadian Construction Materials Center.
- CCMC. (2005a). *TJI Series* (Rapport d'évaluation CCMC-13132-R). Ottawa, On.: Centre Canadien de Matériaux de Construction.
- CCMC. (2005b). *LPI et TLI Series Joists* (Rapport d'évaluation CCMC-11094-R). Ottawa, On.: Centre Canadien de Matériaux de Construction.
- CEE/ONU. (2004). *Produits Forestiers : Analyse Annuelle du Marché 2002-2004*. Genève, Suisse: Commission Économique pour l'Europe/Office des Nations Unies.
- CHUI, Y. H., & DELAHUNTY, S. (2005). *Glued Engineered Products Made of Red Maple* (NRCan Value to Wood project UNB6). Fredericton, N.B.: Wood Science and Technology Center, University of New Brunswick.
- CLOUTIER, A. (2005). *Notes de cours: Anatomie du Bois Avancée (SBO-63955)*. Sainte-Foy: Université Laval, Département des Sciences du Bois et de la Forêt.
- COMMISSION D'ÉTUDE SUR LA GESTION DE LA FORÊT PUBLIQUE QUÉBÉCOISE. (2004). *Rapport final de la Commission d'étude sur la gestion de la forêt publique québécoise*.
- COSSETTE, D. (2005). *Personal communication*. Chibougamau, Qc: Nordic EWP (Les Chantiers Chibougamau).
- CSA. (1990). *Éléments de Charpente en Bois Lamellé-Collé CAN/CSA-O122-M89*. Etobicoke, Ontario: Association Canadienne de Normalisation.
- CSA. (1992). *Bois débité des résineux CAN/CSA-O141-91*. Etobicoke, Ontario: Association Canadienne de Normalisation.
- CSA. (2002). *Règles de calcul des charpentes en bois CAN/CSA-O86-01*. Etobicoke, Ontario: Association Canadienne de Normalisation.
- DESJARDINS, R., & GRANDMONT, J.-F. (2004). *Suitability of fingerjoined lumber used in parallel-chord wood trusses*. Paper presented at the World Conference on Timber Engineering, Lahti, Finlande.
- FISSETTE, P. R., & RICE, W. W. (1988). *An analysis of structural finger-joints made from two northeastern species*. *Forest Products Journal*, 38(9), 40-44.
- FPL. (1999). *Wood Handbook: Wood as an Engineering Material*. Madison, WI: US Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory.
- GUSS, L. M. (1995). *Engineered Wood Products: The Future is Bright*. *Forest Products Journal*, 45(7), 17-25.

- HERNANDEZ, R. (1998). *Analysis of strain in finger-jointed lumber*. Paper presented at the 5th World Conference on Timber Engineering, Montreux, Suisse.
- HERNANDEZ, R., DAVALOS, J. F., SONTI, S. S., KIM, Y., & MOODY, R. C. (1997). *Strength and Stiffness of Reinforced Yellow-Poplar Glued-Laminated Beams* (Research Paper FPL-RP-554). Madison, WI: US Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory.
- HERNÁNDEZ, R. E., & NADERI, N. (2001). *Effects of Knife Jointing on the Gluing Properties of Wood*. *Wood and Fiber Science*, 33(2), 292-301.
- HERNÁNDEZ, R. E., & ROJAS, G. (2002). *Effects of Knife Jointing and Wear on the Planed Surface Quality of Sugar Maple*. *Wood and Fiber Science*, 34(2), 293-305.
- ICC. (2003). *2003 International Building Code*. Falls Church, VA: International Code Council.
- JANOWIAK, J. J., LABOSKY JR., P., BLANKENHORN, P. R., & MANBECK, H. B. (1993). *Finger-joint strength evaluations of three Northeastern hardwoods*. *Forest Products Journal*, 43(9), 23-28.
- JANOWIAK, J. J., MANBECK, H. B., HERNANDEZ, R., & MOODY, R. C. (1997). *Red maple lumber resources for glued-laminated timber beams*. *Forest Products Journal*, 47(4), 55-64.
- JANOWIAK, J. J., MANBECK, H. B., HERNANDEZ, R., MOODY, R. C., BLANKENHORN, P. R., & LABOSKY, P. (1995). *Efficient Utilization of Red Maple Lumber in Glued-Laminated Timber Beams* (Research Paper FPL-RP-541). Madison, WI: US Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory.
- JBS. (2005). site web <http://www.jbsquebec.com/>: Les Systèmes de Construction Jager.
- JESSOME, A. P. (1977). *Résistance et Propriété Connexes des Bois Indigènes au Canada* (Publication SP-514F). Sainte-Foy, Québec: Forintek Canada Corp.
- JOKERST, R. W. (1981). *Finger-jointed Wood Products* (Research Paper FPL-382). Madison, WI: US Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory.
- KENT, S. M., & LEICHTI, R. J. (2005). *An assessment of common test methods to evaluate the mechanical properties of structural end-jointed lumber*. *Forest Products Journal*, 55(3), 32-39.
- KING, T. A., & CHEN, G.-F. (2001). *Adhesive and Wood*. *Specialty Wood Journal*, 4(6), 12-18.

- LABOSKY JR., P., BLANKENHORN, P. R., JANOWIAK, J. J., & MANBECK, H. B. (1993). *Bond strength of resorcinolic adhesives on northeastern hardwoods*. Forest Products Journal, 43(2), 19-22.
- LEFÈBVRE, M. (2006). *Personal communication*. Québec, Qc: Forintek Canada Corp.
- MALGREN, J. (1999). *Engineered Wood: the latest product offerings*. Award Magazine; Architecture, Construction, Interior Design, 13(4), 59.
- MANBECK, H. B., JANOWIAK, J. J., BLANKENHORN, P. R., LABOSKY, P., MOODY, R. C., & HERNANDEZ, R. (1996). *Efficient Hardwood Glued-Laminated Beams*. Paper presented at the International Wood Engineering Conference, Louisiana State University.
- MARTINEAU, P. (2006). *Personal communication*. Montréal, Qc: Ashland Specialty Chemical Company.
- MCKEEVER, D. (1997). *Engineered Wood Products: A response to the changing timber resource*: Pacific Rim Wood Market Report 123;5,15.
- MOHAMMAD, M. (2002). *Finger-joint Process Optimization for Structural Applications* (Project No. 2739). Sainte-Foy, Québec: Forintek Canada Corp.
- MOODY, R. C., HERNANDEZ, R., DAVALOS, J. F., & SONTI, S. S. (1993). *Yellow Poplar Glulam Timber Beam Performance* (Research Paper FPL-RP-520). Madison, WI: US Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory.
- MORASSE, J. M. G. (1980). *Étude Préliminaire sur les Possibilités d'Approvisionnement en Pin Gris de Bonne Qualité en vue d'Être Utilisé dans la Fabrication du Bois Lamellé*. Mémoire de fin d'études, Université Laval, Québec.
- MRNQ. (2005). site web <http://www.mrn.gouv.qc.ca/forets/echo-foret/octobre2000/savoir/arbres.htm>: Ministère des Ressources Naturelles du Québec.
- NELMA. (2005a). *Species Groups, Grademarks, Tally and Sizes Glued Products*. Cumberland, ME: Northeastern Lumber Manufacturers Association.
- NELMA. (2005b). *Timbers-Beams & Stringers, Posts & Timbers*. Cumberland, ME: Northeastern Lumber Manufacturers Association.
- NLGA. (2003a). *Normes de produits spéciaux pour le bois de charpente jointé SPS 1-2003*. New Westminster, BC: Commission Nationale de Classification des Sciages.
- NLGA. (2003b). *Règles de classification pour le bois d'oeuvre canadien*. New Westminster, BC: Commission Nationale de Classification des Sciages.

- NLGA. (2003c). *Normes de produits spéciaux pour la semelle de bois jointé SPS 4-2003*. New Westminster, BC: Commission Nationale de Classification des Sciages.
- NORDIC EWP. (2005). site web <http://www.nordicewp.com/>: Bois d'Ingénierie Nordic (Les Chantiers Chibougamau).
- PELLICANE, P. J., STANFILL-MCMILLAN, K., & TICHY, R. J. (1987). *Effects of knots near the finger of finger-jointed dimension lumber*. *Forest Products Journal*, 37(5), 13-16.
- PELVIRIS, N., & TRIANTAFILLOU, T. C. (1992). *GFRP-Reinforced Wood as Structural Material*. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 4(3), 300-317.
- QWEB. (2005). site web <http://www.quebecwoodexport.com/>: QUEBEC WOOD EXPORT BUREAU.
- REEB, J. E., KARCHESY, J. J., FOSTER, J. R., & KRAHMER, R. L. (1998). *Finger-Joint Quality After 4, 6 and 32 Hours of Knife Wear: Preliminary Results*. *Forest Products Journal*, 48(7/8), 33-36.
- SCHULER, A., ADAIR, C., & ELIAS, E. (2001). *Engineered lumber products: Taking their place in the global market*. *Journal of Forestry*, 99(12), 28-35.
- SELBO, M. L. (1963). *Effect of joint geometry on tensile strength of finger-joints*. *Forest Products Journal*, 13(9), 390-400.
- SELLERS JR., T., MCSWEEN, J. R., & NEARN, W. T. (1988). *Gluing of Eastern Hardwoods: A Review* (General Technical Report SO-71). New Orleans, LA: US Department of Agriculture, Forest Service.
- SHEDLAUSKAS, J. P., MANBECK, H. B., JANOWIAK, J. J., HERNANDEZ, R., MOODY, R. C., LABOSKY JR, P., & BLANKENHORN, P. R. (1996). *Efficient use of red oak for glued-laminated beams*. *American Society of Agricultural Engineers*, 39(1), 203-209.
- SIMPSON, W. T., & WANG, X. (2005). *Drying and Heat Sterilization of Maple Lumber for Structural Uses*. In *Undervalued Hardwoods for Engineered Materials and Components* (pp. 51-63). Madison, WI: Forest Product Society.
- SPAUN, F. D. (1981). *Reinforcement of Wood with Fiberglass*. *Forest Products Journal*, 31(4), 26-33.
- SPIB. (2000). *Glued Lumber Procedures Manual 1025*. Pensacola, FL: Southern Pine Inspection Bureau.
- ST-PIERRE, B. (2003). *Effet de la teneur en humidité et de la température sur la performance mécanique des joints à entures multiples*. Mémoire de fin d'études, Université Laval, Québec.

- STRICKLER, M. D. (1980). *Finger-Jointed Dimension Lumber - Past, Present, and Future*. Forest Products Journal, 30(9), 51-56.
- THEAKSTON, F. H. (1965). *A Feasibility Study for Strengthening Timber Beams with Fiberglass*. Canadian Agriculture Engineering, Janvier, 17-19.
- TPIC. (1996). *Truss Design Procedures and Specifications for Light Metal Plate Connected Wood Trusses*. Ontario, Canada: Truss Plate Institute of Canada.
- VERREAULT, C. (2000). *Utilisation des coeurs de bois franc dans des bois d'ingénierie à usage structural (Projet 1949)*. Sainte-Foy, Qc: Forintek Canada Corp.
- VRAZEL, M., & SELLERS JR., T. (2004). *The effects of species, adhesive type, and cure temperature on the strength and durability of a structural finger-joint*. Forest Products Journal, 54(3), 66-75.
- WTCA. (2005). site web <http://www.woodtruss.com/index.php>: Wood Truss Council of America.
- YOUNGS, R. L., & HAMMETT, A. L. (2001). *Diversity, Productivity, Profitability, Sustainability, and the Tao of Underutilized Species*. Forest Products Journal, 51(1), 29-34.

Annexe I Étiquettes de livraison des blocs de 4x6

Gestofor Inc 14

468-024 4BLOC

Essence:	ERABLE	Grade:	PMP:
Empilement:	3	BLOC 3COM	1040
Epaisseur:	4BLOC	Pieces:	63
Largeur:	6BLOC		0
Longueur:	8-12		0
		Total	1040

Gestofor Inc 14

468-021 4BLOC

Essence:	ERABLE	Grade:	PMP:
Empilement:	3	BLOC 3COM	1024
Epaisseur:	4BLOC	Pieces:	63
Largeur:	6BLOC		0
Longueur:	8-12		0
		Total	1024

Gestofor Inc 14

468-019 4BLOC

Essence:	ERABLE	Grade:	PMP:
Empilement:	3	BLOC 3COM	1088
Epaisseur:	4BLOC	Pieces:	63
Largeur:	6BLOC		0
Longueur:	8-12		0
		Total	1088

Gestofor Inc 14

468-020 4BLOC

Essence:	ERABLE	Grade:	PMP:
Empilement:	3	BLOC 3COM	1040
Epaisseur:	4BLOC	Pieces:	63
Largeur:	6BLOC		0
Longueur:	8-12		0
		Total	1040

Annexe II Teneur en humidité initiale des blocs de 4x6



Aboutage de l'Érable à Sucre
pour la Fabrication de
Produits de Bois d'Ingénierie Structuraux

Détermination de la teneur en humidité d'un bloc de 4x6

Pièce	Largeur (mm)	Épaisseur (mm)	Longueur (mm)	Volume Humide (cm ³)	Densité Basale * (kg/m ³)	Masse Anhydre (kg)	Masse Humide (kg)	Humidité	Humidité
1	96.62	40.64	2471	9975	600	5.985	9.542	59%	44%
	97.18	42.38							
	96.67	42.06							
	96.82	41.69							
2	96.04	47.37	2471	11235	600	6.741	10.326	53%	48%
	96.88	47.31							
	95.49	47.21							
	96.14	47.30							
3	97.82	46.18	2471	11216	600	6.729	10.675	59%	43%
	97.07	47.33							
	96.36	46.75							
	97.08	46.75							

* La densité basale utilisée est de 600 kg/m³ (Fortin, 2006)

Rappel: Densité Basale = $\frac{\text{Masse Anhydre}}{\text{Volume Saturé}}$

TH (%) = $\frac{\text{Masse Humide} - \text{Masse Anhydre}}{\text{Masse Anhydre}} \times 100$

Annexe III Résultats expérimentaux (Série de contrôle)



Aboutage de l'Érable à Sucre
pour la Fabrication de
Produits de Bois d'Ingénierie Structuraux

ÉCHANTILLONS DE BOIS NON-ABOUTÉ

Essai de traction selon SPS-1 2003
Portée d'essai: 4kpo

Date: 24 avr. 2006

#Pièces	Dimensions		Humidité (%)	P _{ult} ^{me} (kips)	P _{ult} ^{me} (kN)	T _{emps} (sec)	UTS (MPa)	UTS @ 10% TH (MPa)	Commentaire
	base (mm)	largeur (mm)							
1	86.19	38.52	10.3	55.9	249	105	72.38	68.96	
2	86.02	38.40	10.8	72.2	321	148	93.95	88.52	
3	86.90	38.35	10.4	41.1	183	83	63.62	61.52	
4	86.80	38.45	12.3	27.5	122	52	35.83	35.26	Rejet: nœud douteux
5	86.75	38.32	12.4	65.2	290	113	85.28	82.83	
6	86.55	38.21	9.4	13.2	59	27	17.35	17.35	Rejet: nœud douteux + rupture
7	86.01	38.41	10.6	44.6	198	78	58.03	56.73	
8	86.84	38.37	9.0	59.4	264	95	77.51	72.76	
9	86.68	38.48	10.3	62.4	278	102	81.34	77.32	
10	86.36	38.42	11.8	55.4	246	90	72.59	70.20	
11	86.13	38.35	9.9	83.9	373	141	108.16	102.79	
12	87.33	38.12	12.7	51.6	230	81	68.95	67.33	
13	86.28	38.02	11.4	63.0	280	95	83.49	80.21	
14	87.59	38.70	8.9	53.6	238	85	70.34	66.17	
15	86.20	38.16	12.4	81.7	363	136	107.98	104.60	
16	86.87	38.41	9.7	87.6	380	143	114.15	107.19	
17	86.67	38.34	13.0	57.9	258	94	75.76	74.15	
18	86.11	38.31	8.8	69.8	310	111	94.12	87.81	
19	86.78	38.38	9.2	25.7	114	59	33.55	32.57	Rejet: nœud douteux
20	87.87	38.07	12.1	52.0	231	84	68.15	67.12	
21	86.75	38.24	9.5	49.3	219	76	64.62	61.27	
22	87.89	38.25	13.2	62.1	276	96	82.17	80.50	
23	86.62	38.35	10.0	63.0	280	105	82.46	78.12	
24	86.02	38.01	10.5	48.3	215	75	64.22	61.47	
25	86.11	38.39	11.4	65.1	290	97	84.65	81.35	
26	86.33	38.45	10.7	63.8	284	100	83.54	79.70	
27	86.39	38.07	10.0	29.5	131	50	39.00	37.75	Rejet: nœud douteux
28	87.97	38.09	11.5	37.4	166	57	49.65	48.20	

#Echantillons 24
Moyenne 75.70
Minimum 49.65
5^e centile (Normale) 52.15
5^e centile (Weibull) 49.02
P-Value 0.052

Annexe IV Résultats expérimentaux (Séries aboutées)



Atoutage de l'étable à sucre pour la fabrication de Produits de bois d'ingénierie Structuraux

BOIS JOINTÉ: SÉRIE B

Essai de traction selon SP9-1 2003
 Pontie d'essai: 24po

Vitesse de rotation: 2500 RPM
 Vitesse d'avance, A: 10.5 mm/min
 Avance par outillage: 0.70 mm

Date: 27 avr. 2006

# Pièces	# Joints dans 24"	Dimensions base (mm)		Humidité (%)	Pression (kPa)		Temps (sec)	UTS (MPa)	UTS @ 15%TH (MPa)	Mode de Rupture	Commentaire
		base	largeur		(kPa)	(kN)					
19	2	85.9	38.1	11.4	26.9	129		37.95	37.10	1	
28	1	85.9	38.1	13.8	29.3	130		38.48	38.18	1	
30	2	85.9	38.1	10.5	41.4	184		54.37	52.20	3	
49	1	85.9	38.1	10.6	21.9	97		28.76	28.31	1	
50	1	85.9	38.1	10.0	34.3	153		45.65	43.38	6	Rejet: Rupture dans clampe
66	1	85.9	38.1	12.0	27.3	121		35.65	35.22	1	Rejet: Rupture dans clampe
78	1	85.9	38.1	10.7	31.6	141		41.50	40.27	1	
80	1	85.9	38.1	10.0	21.1	84		27.71	27.28	2	
96	3	85.9	38.1	9.0	24.6	109		32.31	31.41	1	Rejet: Rupture dans clampe
108	2	85.9	38.1	9.3	36.3	170		50.30	47.58	2	
118	2	85.9	38.1	11.1	22.7	101		28.81	28.35	5	
128	1	85.9	38.1	13.0	33.9	151		44.52	43.52	2	Rejet: Teste 4 fois (glissement dans clampe)
130	2	85.9	38.1	11.8	30.8	151	90	44.52	43.45	5	
148	1	85.9	38.1	10.0	37.0	137		46.58	39.23	1	
158	2	85.9	38.1	10.6	24.6	165		48.59	46.89	1	
169	1	85.9	38.1	8.5	26.5	109		32.31	31.34	3	
178	1	85.9	38.1	10.9	30.0	118		34.80	34.03	3	Rejet: Teste 2 fois (glissement dans clampe)
180	2	85.9	38.1	8.7	13.8	133		38.40	38.07	1	Rejet: Rupture dans clampe
198	1	85.9	38.1	0.0	28.2	125		37.03	34.16	1	Rejet: Teste 2 fois (glissement+rupture dans clampe)
208	3	85.9	38.1	10.3	29.4	131		38.61	37.46	1	
218	2	85.9	38.1	0.0	41.4	184		54.37	48.26	3	Rejet: Teste 2 fois (glissement dans clampe)
228	3	85.9	38.1	8.7	28.7	128		37.60	36.28	5	
238	1	85.9	38.1	8.4	31.2	138		40.97	39.43	4	
248	1	85.9	38.1	11.1	25.6	158		46.75	45.34	3	Rejet: Teste 2 fois (glissement dans clampe)
258	2	85.9	38.1	10.6	31.3	139		41.11	38.68	1	Rejet: Rupture dans clampe
268	2	85.9	38.1	11.0	30.3	161		47.67	46.44	1	
278	1	85.9	38.1	13.5	27.2	121		35.72	35.40	1	
280	2	85.9	38.1	10.5	30.6	149		44.13	42.68	4	
288	2	85.9	38.1	8.2	32.4	144		42.55	40.58	1	
308	2	85.9	38.1	10.2	25.2	112		33.09	32.30	1	
318	2	85.9	38.1	9.00.0%	34.3	153		45.05	43.24	4	
328	3	85.9	38.1	10.7	36.9	164		48.46	46.80	4	
Moyenne											
#Echantillons: 22											
Moyenne: 40.40											
Minimum: 27.71											
5* centile (Normal): 28.36											
5* centile (Weibull): 26.87											
P-Value: 0.894											
Modus #1 et #2 (collé): 59.1%											
Modus #3 et #5 (joint): 40.9%											
Modus #6 (bois): 0.0%											



Abouage de l'étable à Suare
pour la fabrication de
Produits de Bois d'Ingénierie Structurels

BOIS JOINTÉ : SÉRIE C

Essai de traction selon SF5-1 2003
Portée d'essai: 24po

Vitesse de rotation 2500 RPM
Vitesse d'avance, A 12,0 m/min
Avance par coté 0,60 mm

Date: 2 mai 2006

# Piles	# Joints dans 24"	Dimensions base (mm)	Dimensions largeur (mm)	Humidité (%)	P _{axe} (kg)	P _{axe} (lbf)	Temps (sec)	UTS (MPa)	UTS (ksi)	UTS @ 15%TH (MPa)	Mode de Rupture	Commentaire
1C	2	88.9	38.1	9.1	17.7	79	69	23.25	5.25	23.12	5	
2C	2	88.9	38.1	9.2	30.7	137	122	40.32	9.18	38.78	3	
3C	1	88.9	38.1	7.9	40.8	181	147	53.58	12.11	50.42	1	Rejet: Rupture dans dampe
4C	2	88.9	38.1	8.2	25.8	115	91	33.88	7.61	32.73	4	
5C	3	88.9	38.1	7.4	28.0	125	82	36.77	8.28	35.20	2	
6C	2	88.9	38.1	8.3	38.8	177	115	52.27	11.78	48.39	2	
7C	3	88.9	38.1	7.9	36.0	160	107	47.28	10.58	44.76	5	
8C	1	88.9	38.1	8.2	32.0	142	90	42.03	9.45	40.10	3	Rejet: Aucun joint dans le milieu
10C	1	88.9	38.1	8.4	34.6	154	87	45.44	10.13	43.25	3	Rejet: Aucun joint dans le milieu
11C	3	88.9	38.1	10.1	35.1	156	98	46.10	10.28	44.37	6	Rejet: Rupture#6
12C	2	88.9	38.1	9.8	39.7	176	105	49.14	10.98	44.29	3	Rejet: Rupture dans dampe
13C	2	88.9	38.1	9.8	32.1	142	84	52.14	11.63	49.78	5	
14C	4	88.9	38.1	8.9	35.3	157	90	42.16	9.45	40.66	6	Rejet: Rupture#6
15C	1	88.9	38.1	9.1	28.5	127	78	46.36	10.33	44.31	5	
16C	3	88.9	38.1	8.5	22.6	101	64	37.43	8.38	36.00	6	Rejet: Rupture dans dampe
17C	1	88.9	38.1	8.5	21.8	97	64	28.68	6.44	28.06	5	
18C	1	88.9	38.1	9.9	37.0	165	98	48.59	10.81	46.64	5	
19C	3	88.9	38.1	9.2	21.0	93	57	27.58	6.15	27.10	4	
20C	3	88.9	38.1	8.6	51.3	228	123	67.37	15.01	63.28	4	Rejet: Rupture dans dampe
21C	1	88.9	38.1	8.7	34.5	153	84	45.31	10.08	43.22	4	Rejet: Rupture dans dampe
22C	1	88.9	38.1	8.5	26.9	120	73	35.33	7.88	34.08	4	Rejet: Rupture dans dampe
23C	2	88.9	38.1	9.7	29.7	132	76	39.00	8.75	37.69	4	
24C	2	88.9	38.1	8.9	23.8	106	66	31.26	7.01	30.43	3	
25C	1	88.9	38.1	8.2	55.1	245	126	72.36	16.21	67.57	2	
26C	1	88.9	38.1	8.6	27.7	123	79	36.38	8.12	35.05	3	
27C	2	88.9	38.1	10.1	25.3	113	68	33.23	7.44	32.42	4	Rejet: Rupture dans dampe
28C	2	88.9	38.1	8.5	25.2	110	75	38.35	8.58	36.84	3	
29C	3	88.9	38.1	8.4	26.8	119	67	35.20	7.88	33.95	3	Rejet: Rupture dans dampe
30C	1	88.9	38.1	9.25.0%	43.1	192	111	56.60	12.58	53.77	3	
31C	1	88.9	38.1	9.3	33.5	149	87	44.00	9.89	42.20	3	
32C	2	88.9	38.1	8.9%								
Moyenne												
#Echantillons 20												
Moyenne 42.18												
Minimum 23.12												
5 ^e centile (Normale) 26.90												
5 ^e centile (Weibull) 25.43												
P-Value 0.998												
Modes #1 et #2 (bois) 50.0%												
Modes #3 et #6 (joint) 80.0%												
Mode #6 (bois) 0.0%												



Abouage de l'Érabie à Sucre
pour la Fabrication de
Produits de Bois d'Ingénierie Structuraux

BOIS JOINTÉ: SÉRIE D

Essai de traction selon SP8-1 2003
Portée d'essai: 24po

Vitesse de rotation 4000 RPM
Vitesse d'avance, A 14.4 m/min
Avance par copeau 0.60 mm

Date: 15 mai 2006

# Pièces	# Joints dans 24"	Dimensions (mm)		Humidité (%)	Flux (kN)	Temps (sec)	UTS (MPa)	UTS @ 15%TH (MPa)	Mode de Rupture	Commentaire
		base	largeur		(kN)		(MPa)	(MPa)		
10	2	88.9	38.1	10.7	30.7	77	40.32	39.16	5	
20	2	88.9	38.1	9.8	30.0	66	39.40	38.08	2	
30	3	88.9	38.1	9.3	28.3	73	37.17	35.02	1	
40	1	88.9	38.1	10.3	33.6	83	44.13	42.82	1	
50	1	88.9	38.1	9.7	28.6	72	38.14	37.81	3	
60	1	88.9	38.1	10.6	38.6	90	50.96	48.08	3	Rejet: Rupture dans clâme
70	2	88.9	38.1	8.7	34.4	84	45.18	43.10	3	
80	2	88.9	38.1	9.5	27.5	69	36.12	34.98	5	
90	1	88.9	38.1	8.8	37.5	88	49.25	46.85	6	Rejet: Rupture#6
100	1	88.9	38.1	8.6	44.0	100	57.78	54.55	5	
110	2	88.9	38.1	10.5	33.2	79	43.60	42.18	4	
120	2	88.9	38.1	10.8	27.6	68	36.25	35.36	4	
130	3	88.9	38.1	9.1	35.1	83	36.25	35.04	2	
140	2	88.9	38.1	9.8	29.7	72	48.10	44.39	1	
150	2	88.9	38.1	9.1	30.5	72	39.00	37.67	3	
160	2	88.9	38.1	10.7	27.2	69	40.06	38.91	5	
170	3	88.9	38.1	9.8	30.5	74	35.72	34.67	2	Prés du # de joints 2
180	2	88.9	38.1	10.0	27.4	66	40.06	38.73	3	
190	2	88.9	38.1	10.7	29.6	73	38.87	37.80	2	Rejet: Rupture dans clâme
200	2	88.9	38.1	10.2	28.3	72	37.17	36.10	4	
210	1	88.9	38.1	10.1	42.7	107	56.08	53.67	1	
220	1	88.9	38.1	7.6	36.3	89	47.67	45.00	1	
230	1	88.9	38.1	10.9	31.1	81	40.84	39.70	3	
240	2	88.9	38.1	10.1	31.4	85	41.24	39.85	2	
250	1	88.9	38.1	10.1	38.3	107	50.30	48.30	5	Rejet: Rupture dans clâme
260	2	88.9	38.1	10.4	26.5	75	34.80	33.84	5	
270	2	88.9	38.1	9.9	32.1	100	42.16	40.66	3	
280	2	88.9	38.1	9.6	35.7	113	46.88	44.95	2	
290	2	88.9	38.1	11.2	25.1	83	32.96	32.34	3	
300	1	88.9	38.1	12.4	38.0	126	49.90	48.82	3	
310	3	88.9	38.1	12.0.0%	15.4	60	20.22	20.22	3	Rejet: Rupture dans clâme
320	2	88.9	38.1	11.0	26.6	115	34.93	34.17	1	
Moyenne				10.0%						
					26	26			38.5%	Moins #1 et #2 (voies)
					41.74	40.29			61.5%	Moins #3 à #5 (joint)
					32.96	32.34			0.0%	Moins #6 (joint)
						33.99				
						31.02				
						0.354				

P-Value



Abouage de l'Etable à Suze
pour la Fabrication de
Produits de Bois d'ingénierie Structuraux

BOIS JOINTE: SÉRIE E

Essai de traction selon SPS-1 2003
Portée d'essai: 24po

Vitesse de rotation 4000 RPM
Vitesse d'avance, A 16.8 mm/min
Avance par coupeau 0.70 mm

Date: 15 mai 2006

# Pièces	# Joints dans 24"	Dimensions basse (mm)	Dimensions largeur (mm)	Humidité (%)	Passe (kip/s)	(RN)	Temps (sec)	UTS (MPa)	UTS @15%TH (MPa)	Mode de Rupture	Commentaire
1E	2	88.9	38.1	8.6	32.9	100	97	47.15	44.87	1	Rejet: Rupture dans clampe
2E	1	88.9	38.1	11.8	31.4	140	83	41.24	40.31	1	Rejet: Rupture dans clampe
3E	2	88.9	38.1	12.2	40.8	181	104	53.58	52.24	4	Rejet: Rupture dans clampe
4E	2	88.9	38.1	8.9	33.6	149	89	44.13	42.19	1	Rejet: Rupture dans clampe
5E	3	88.9	38.1	11.4	27.7	123	69	36.36	35.00	3	Rejet: Rupture dans clampe
6E	1	88.9	38.1	10.3	31.6	141	77	41.76	40.40	4	Rejet: Rupture dans clampe
7E	2	88.9	38.1	11.5	31.1	138	87	40.84	39.85	4	
8E	2	88.9	38.1	10.1	27.9	124	75	36.64	35.59	3	
9E	1	88.9	38.1	10.7	46.8	208	114	61.46	58.97	3	
10E	2	88.9	38.1	10.9	31.2	139	71	40.97	39.62	3	
11E	3	88.9	38.1	10.6	28.1	125	70	36.90	35.93	4	
12E	2	88.9	38.1	10.8	28.7	128	70	37.69	36.72	4	
13E	3	88.9	38.1	11.4	33.9	138	83	37.69	36.84	2	
14E	2	88.9	38.1	9.2	32.8	151	80	44.52	42.65	5	Rejet: Rupture dans clampe
15E	2	88.9	38.1	10.0	34.7	146	81	43.06	41.54	3	
16E	2	88.9	38.1	12.2	29.7	104	75	43.57	44.59	3	
17E	1	88.9	38.1	9.4	32.5	132	82	39.00	37.62	6	Rejet: Rupture #6
18E	3	88.9	38.1	11.8	23.6	145	57	42.68	41.68	3	
19E	3	88.9	38.1	9.8	30.0	133	31	39.40	38.09	2	
20E	2	88.9	38.1	10.1	27.3	121	67	35.85	34.86	1	
21E	1	88.9	38.1	9.9	38.3	170	91	50.30	48.20	3	
22E	2	88.9	38.1	8.6	28.9	133	67	39.27	37.68	3	
23E	2	88.9	38.1	11.0	31.4	140	72	41.24	40.09	4	
24E	2	88.9	38.1	8.4	26.2	112	62	33.09	32.04	4	
25E	1	88.9	38.1	10.9	28.3	126	67	37.17	36.24	3	
26E	1	88.9	38.1	11.2	34.7	154	65	46.57	44.84	3	Rejet: Rupture dans clampe
27E	2	88.9	38.1	9.3	33.2	148	79	43.60	41.62	4	
28E	2	88.9	38.1	13.0	17.2	77	45	22.99	22.96	4	
29E	2	88.9	38.1	8.5	28.0	125	63	36.77	35.39	4	
30E	1	88.9	38.1	11.9	27.6	123	67	36.25	35.58	4	
31E	3	88.9	38.1	9.60.0%	29.5	131	77	38.74	37.44	4	
32E	1	88.9	38.1	10.8	27.8	124	63	36.51	35.61	1	
Moyenne											
#Echantillons 24											
Moyenne 40.33											
Minimum 22.99											
5° centile (Normale) 32.46											
5° centile (Weibull) 27.56											
P-Value 0.375											

Abutage de l'Étable à Sucre
pour la Fabrication de
Produits de Bois d'Ingénierie Structuraux



BOIS JOINTÉ: SÉRIE G

Essai de traction selon SPS-1 2003
Profilé d'essai: 2x60

Vitesse de rotation: 3250 RPM
Vitesse d'avance: A 11.7 m/min
Avance par coupant: 0.60 mm

Date: 17 mai 2006

# Places	# Joints dans 24"	Dimensions base (mm) largeur (mm)	Humidité (%)	Passe (lps)	Flux (kN)	Temps (sec)	UTS (MPa)	UTS @15%TH (MPa)	Mode de Rupture	Commentaire
1G	2	88.9 38.1	10.2	44.6	188	185	58.57	56.01	2	
2G	2	88.9 38.1	9.7	35.2	157	120	46.23	44.36	4	Rejet: Rupture dans clame
3G	1	88.9 38.1	9.3	30.0	133	96	39.40	37.06	1	Rejet: Rupture dans clame
4G	3	88.9 38.1	10.2	44.7	199	145	58.70	56.14	2	
5G	2	88.9 38.1	9.0	45.8	204	132	60.15	56.90	3	
6G	2	88.9 38.1	10.0	42.6	188	117	55.85	53.50	2	
7G	3	88.9 38.1	9.7	31.7	141	94	41.63	40.12	3	
8G	2	88.9 38.1	9.3	37.2	165	103	48.85	46.65	1	Rejet: Rupture dans clame
9G	2	88.9 38.1	9.9	41.9	186	111	55.03	52.00	3	
10G	4	88.9 38.1	9.6	21.1	94	61	27.71	27.25	5	
11G	2	88.9 38.1	9.1	45.8	204	126	60.15	56.93	2	Rejet: Rupture dans clame
12G	2	88.9 38.1	9.7	40.0	178	105	52.53	50.21	2	
13G	3	88.9 38.1	9.0	35.6	178	102	52.53	49.83	1	
14G	2	88.9 38.1	8.5	34.6	158	87	46.75	44.48	1	
15G	2	88.9 38.1	9.4	37.6	154	99	45.44	43.56	3	
16G	3	88.9 38.1	8.8	37.7	167	96	48.38	46.95	3	
17G	1	88.9 38.1	9.5	33.7	166	90	48.51	47.34	3	Rejet: Rupture dans clame
18G	2	88.9 38.1	10.7	18.9	150	53	44.28	42.84	5	Rejet: Rupture dans clame
19G	2	88.9 38.1	8.7	39.5	176	102	51.87	49.21	5	
20G	2	88.9 38.1	8.7	30.7	137	76	40.32	38.67	3	
21G	1	88.9 38.1	10.9	42.1	187	101	55.29	53.30	5	Rejet: Rupture dans clame
22G	2	88.9 38.1	8.8	37.8	168	97	49.54	47.19	2	
23G	1	88.9 38.1	8.6	33.5	149	85	44.00	41.98	1	
24G	2	88.9 38.1	9.6	34.5	163	87	45.31	43.50	1	Rejet: Rupture dans clame
25G	2	88.9 38.1	9.0	36.4	162	83	47.80	45.60	1	
		Moyenne	9.4%			#Échantillons	17			Modes #1 et #2 (collé)
		Moyenne				Moyenne	49.29			Modes #3 et #4 (joint)
		Minimum				Minimum	27.71			Modes #5 (pois)
						σ* cartile (Normale)	27.25			
						σ* cartile (Weibull)	36.39			
						P-Value	32.22			
						P-Value	0.992			

Abutage de l'étable à Sucre
pour la Fabrication de
Produits de Bois d'Ingénierie Structuraux



BOIS JOINTÉ: SÉRIE H

Essai de traction selon SPS-1 2003
Pointe d'essai: 24po

Vitesse de rotation 3250 RPM
Vitesse d'avance: A 13.7 m/min
Avance par coup de scie 0.70 mm

Date: 17 mai 2006

# Pièces	# Joints dans 24"	Dimensions		Humidité (%)	Passe (kip/g)	Fibre (4K)	Temps (sec)	UTS (MPa)	UTS @15%TH (MPa)	Mode de Rupture	Commentaire
		épaisse (mm)	largeur (mm)								
1H	3	88.9	38.1	8.5	247	110	38	32.44	31.46	5	
2H	2	88.9	38.1	9.4	346	154	80	45.44	43.54	1	
3H	1	88.9	38.1	11.2	37.1	165	82	48.72	47.23	2	Rejet: Rupture dans dampe
4H	2	88.9	38.1	11.4	38.5	171	83	50.56	49.05	3	Rejet: Rupture dans dampe
5H	2	88.9	38.1	8.2	42.1	187	104	55.29	52.69	1	Rejet: Rupture dans dampe
6H	2	88.9	38.1	10.6	30.3	135	75	39.79	38.63	3	Rejet: Rupture dans dampe
7H	3	88.9	38.1	9.6	30.6	136	77	40.19	38.61	2	
8H	3	88.9	38.1	9.5	31.7	141	77	41.63	40.08	3	
9H	2	88.9	38.1	10.2	31.8	141	76	41.76	40.38	1	
10H	3	88.9	38.1	11.1	30.8	137	77	40.45	39.39	3	
11H	2	88.9	38.1	10.9	248	110	68	32.57	31.83	5	Rejet: Rupture dans dampe
12H	2	88.9	38.1	10.2	44.2	197	103	58.05	55.55	1	Rejet: Rupture dans dampe
13H	3	88.9	38.1	11.0	26.0	197	63	58.05	55.92	4	
14H	3	88.9	38.1	10.8	28.9	116	75	34.15	33.38	2	
15H	2	88.9	38.1	12.5	247	133	64	39.27	38.60	4	
16H	2	88.9	38.1	10.6	35.0	110	83	33.44	31.76	1	
17H	2	88.9	38.1	10.7	43.7	156	106	43.97	41.46	2	
18H	1	88.9	38.1	10.2	45.0	194	100	57.39	54.84	5	Rejet: Rupture dans dampe
19H	3	88.9	38.1	9.8	32.1	143	83	42.16	40.64	5	
20H	1	88.9	38.1	10.0	34.5	153	88	45.31	43.61	1	
21H	2	88.9	38.1	9.6	35.6	158	88	46.75	44.82	2	
22H	2	88.9	38.1	10.3	33.6	149	82	44.13	42.60	5	
23H	1	88.9	38.1	10.2	42.2	188	96	55.42	53.08	1	
Moyenne											
								13	53.6%	Mode #1 et #2 (joint)	
								Moyenne	43.44	46.2%	Mode #3,4,85 (joint)
								Minimum	32.44	0.0%	Mode #6 (joint)
								5 ^e centile (Normale)	32.61		
								5 ^e centile (Weibull)	30.14		
								F-Value	0.572		



Abouage de l'Érable à Sucre
pour la Fabrication de
Produits de Bois d'Ingénierie Structuraux

BOIS JOINTE: SÉRIE J

Essai de traction selon SPS-1 2003
Portée d'essai: 24po

Vitesse de rotation 3250 RPM
Vitesse d'avance: A 15.6 mm/min
Avance par coupéau 0.60 mm

Date: 17 mai 2006

# Pièces	# Joints dans 24"	Dimensions basse (mm)	largeur (mm)	Humidité (%)	Pièce (kg)	Force (kN)	Temps (sec)	UTS (MPa)	UTS @15%TH (MPa)	Mode de Rupture	Commentaire
21	1	88.9	38.1	10.1	30.2	134	70	39.06	38.39	3	
21	3	88.9	38.1	10.3	23.8	106	60	31.26	30.81	4	
31	2	88.9	38.1	10.7	38.3	170	87	50.30	48.53	3	
41	2	88.9	38.1	9.7	30.1	134	76	39.53	38.19	2	
51	2	88.9	38.1	10.5	35.6	159	82	47.02	45.36	5	
61	2	88.9	38.1	10.5	36.6	164	81	46.33	46.59	3	
71	2	88.9	38.1	9.6	33.5	149	82	44.00	42.27	1	
81	4	88.9	38.1	10.4	34.5	153	85	45.31	43.73	1	
91	2	88.9	38.1	10.8	31.0	141	73	41.50	40.29	6	Rejet: Rupte#6
101	3	88.9	38.1	8.9	34.1	152	77	44.78	42.79	2	
111	2	88.9	38.1	10.4	30.1	134	69	39.53	38.34	3	Rejet: Rupture dans clampe
121	3	88.9	38.1	9.4	37.5	167	87	49.25	47.05	2	
131	1	88.9	38.1	9.9	31.0	167	74	49.25	47.25	5	
141	1	88.9	38.1	10.3	28.7	138	74	40.71	39.42	1	Rejet: Rupture dans clampe
151	3	88.9	38.1	10.4	27.2	128	65	37.69	36.64	4	
161	2	88.9	38.1	10.5	35.9	121	81	35.72	34.81	2	
171	3	88.9	38.1	9.2	34.0	160	82	47.15	45.06	1	
181	3	88.9	38.1	8.8	28.5	155	63	45.70	43.93	3	
191	2	88.9	38.1	8.7	34.8	155	82	45.70	43.57	5	
201	3	88.9	38.1	12.7	36.4	162	82	47.80	46.91	5	
211	2	88.9	38.1	10.5	29.5	131	70	36.74	37.03	1	
221	3	88.9	38.1	10.2	24.9	111	59	32.70	31.94	1	
231	2	88.9	38.1	10.1	28.3	126	70	37.17	36.07	2	
Moyenne											
#Conditions											
								30	30	50.0%	Modes #1 et #2 (craie)
Moyenne								42.85	41.37	50.0%	Modes #3 à #5 (craie)
Minimum								31.26	30.61	0.0%	Mode #6 (craie)
5 ^e centile (Normale)								31.87	31.87		
5 ^e centile (Weibull)								31.03	31.03		
P-Value								0.868			

Annexe V Exemples de ruptures expérimentales

Mode de rupture 1



Mode de rupture 2



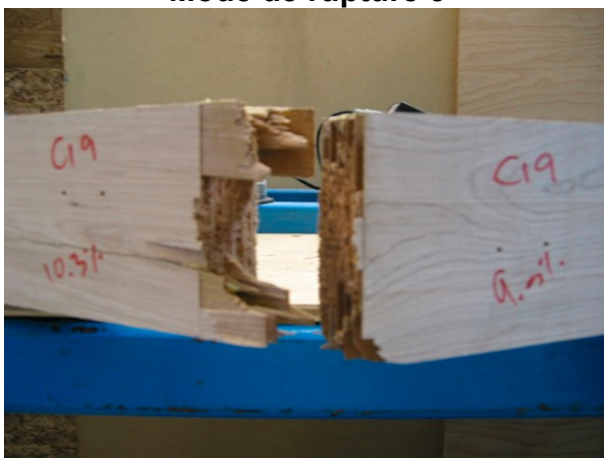
Mode de rupture 3



Mode de rupture 4



Mode de rupture 5



Mode de rupture 6



Annexe VI Résultats statistiques (ANOVA)

*The SAS System**The GLM Procedure*

Class Level Information		
Class	Levels	Values
vitesse	3	2097 2726 3355
avance	3	0.6 0.7 0.8

Number of Observations Read	184
Number of Observations Used	184

Dependent Variable: mor mor

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	8	2568.66756	321.08345	4.85	<.0001
Error	175	11590.65312	66.23230		
Corrected Total	183	14159.32069			

R-Square	Coeff Var	Root MSE	mor Mean
0.181412	19.22333	8.138323	42.33565

Source	DF	Type I SS	Mean Square	F Value	Pr > F
vitesse	2	997.462484	498.731242	7.53	0.0007
avance	2	285.378509	142.689254	2.15	0.1190
vitesse*avance	4	1285.826572	321.456643	4.85	0.0010

Source	DF	Type II SS	Mean Square	F Value	Pr > F
vitesse	2	930.948204	465.474102	7.03	0.0012
avance	2	285.378509	142.689254	2.15	0.1190
vitesse*avance	4	1285.826572	321.456643	4.85	0.0010

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
vitesse	2	983.189643	491.594821	7.42	0.0008
avance	2	255.521616	127.760808	1.93	0.1484
vitesse*avance	4	1285.826572	321.456643	4.85	0.0010

Source	DF	Type IV SS	Mean Square	F Value	Pr > F
vitesse	2	983.189643	491.594821	7.42	0.0008
avance	2	255.521616	127.760808	1.93	0.1484
vitesse*avance	4	1285.826572	321.456643	4.85	0.0010

Contrast	DF	Contrast SS	Mean Square	F Value	Pr > F
vitesse	1	904.1970559	904.1970559	13.65	0.0003

The GLM Procedure
Least Squares Means
Adjustment for Multiple Comparisons: Bonferroni

vitesse	mor LSMEAN	LSMEAN Number
2097	39.4668499	1
2726	45.1955410	2
3355	43.2964784	3

Least Squares Means for effect vitesse Pr > t for H0: LSMean(i)=LSMean(j)			
Dependent Variable: mor			
i/j	1	2	3
1		0.0009	0.0221
2	0.0009		0.6438
3	0.0221	0.6438	

avance	mor LSMEAN	LSMEAN Number
0.6	42.2849122	1
0.7	41.3899321	2
0.8	44.2840250	3

Least Squares Means for effect avance Pr > t for H0: LSMean(i)=LSMean(j)			
Dependent Variable: mor			
i/j	1	2	3
1		1.0000	0.5248
2	1.0000		0.1758
3	0.5248	0.1758	

vitesse	avance	mor LSMEAN	LSMEAN Number
2097	0.6	35.8228775	1
2097	0.7	40.4014722	2
2097	0.8	42.1762000	3
2726	0.6	49.2945998	4

vitesse	avance	mor LSMEAN	LSMEAN Number
2726	0.7	43.4394807	5
2726	0.8	42.8525426	6
3355	0.6	41.7372592	7
3355	0.7	40.3288435	8
3355	0.8	47.8233325	9

Least Squares Means for effect vitesse*avance Pr > t for H0: LSMean(i)=LSMean(j)									
Dependent Variable: mor									
i/j	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1		1.0000	0.4463	<.0001	0.2943	0.2072	0.4689	1.0000	0.0001
2	1.0000		1.0000	0.0317	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	0.1294
3	0.4463	1.0000		0.3150	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
4	<.0001	0.0317	0.3150		1.0000	0.6288	0.1196	0.0232	1.0000
5	0.2943	1.0000	1.0000	1.0000		1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
6	0.2072	1.0000	1.0000	0.6288	1.0000		1.0000	1.0000	1.0000
7	0.4689	1.0000	1.0000	0.1196	1.0000	1.0000		1.0000	0.4618
8	1.0000	1.0000	1.0000	0.0232	1.0000	1.0000	1.0000		0.0978
9	0.0001	0.1294	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	0.4618	0.0978	

Annexe VII Résultats statistiques (WEIBULL)

Weibull Analysis - Bois Clair

Data variable: Bois Clair

Estimation method: rank regression

Sample size = 24

Number of failures = 24

Estimated shape = 5,84528

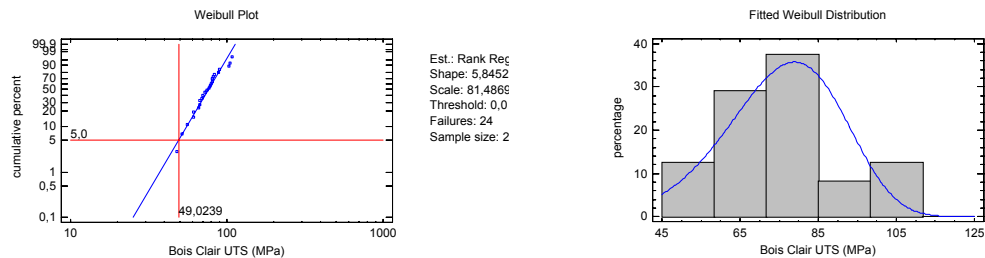
Estimated scale = 81,4869

Specified threshold = 0,0

The StatAdvisor

This table shows the results of fitting a Weibull distribution to the data values in Bois Clair. The shape and scale parameters were estimated using the rank regression method, which corresponds to fitting a straight line to the Weibull plot. The minimum value of the distribution was assumed to be located at 0,0. Of the 24 data values, 0 were treated as right-censored, meaning that the true values might be greater than was indicated.

Note: you may set the origin of the Weibull distribution to any number less than the minimum value in your data set using Analysis Options.



Goodness-of-Fit Tests for Bois Clair

Kolmogorov-Smirnov Test

	<i>Weibull</i>
DPLUS	0,124344
DMINUS	0,104505
DN	0,124344
P-Value	0,851925

The StatAdvisor

This pane shows the results of tests run to determine whether Bois Clair can be adequately modeled by a Weibull distribution. Since the smallest P-value amongst the tests performed is greater than or equal to 0,05, we can not reject the idea that Bois Clair comes from a Weibull distribution with 95% confidence.

Weibull Analysis - Série A

Data variable: Série A

Estimation method: rank regression

Sample size = 22

Number of failures = 22

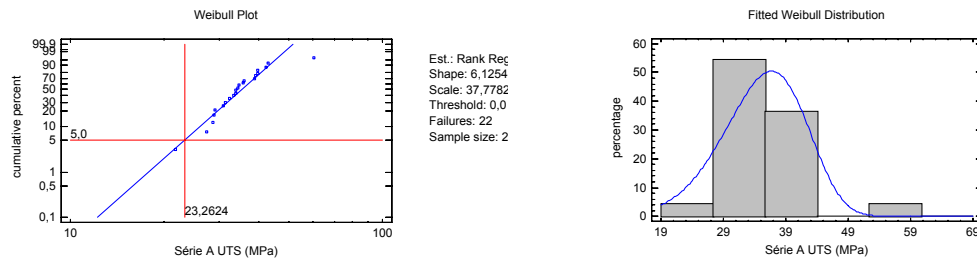
Estimated shape = 6,12545

Estimated scale = 37,7782

Specified threshold = 0,0

The StatAdvisor

This table shows the results of fitting a Weibull distribution to the data values in Série A. The shape and scale parameters were estimated using the rank regression method, which corresponds to fitting a straight line to the Weibull plot. The minimum value of the distribution was assumed to be located at 0,0. Of the 22 data values, 0 were treated as right-censored, meaning that the true values might be greater than was indicated. Note: you may set the origin of the Weibull distribution to any number less than the minimum value in your data set using Analysis Options.



Goodness-of-Fit Tests for Série A

Kolmogorov-Smirnov Test

	<i>Weibull</i>
DPLUS	0,1523
DMINUS	0,0856268
DN	0,1523
P-Value	0,687232

The StatAdvisor

This pane shows the results of tests run to determine whether Série A can be adequately modeled by a Weibull distribution. Since the smallest P-value amongst the tests performed is greater than or equal to 0,05, we can not reject the idea that Série A comes from a Weibull distribution with 95% confidence.

Weibull Analysis - Série B

Data variable: Série B

Estimation method: rank regression

Sample size = 22

Number of failures = 22

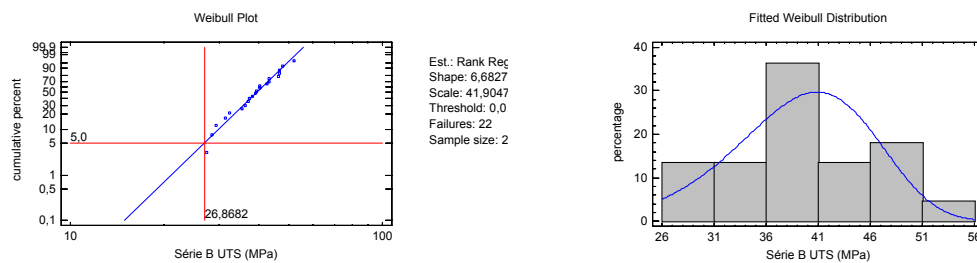
Estimated shape = 6,68277

Estimated scale = 41,9047

Specified threshold = 0,0

The StatAdvisor

This table shows the results of fitting a Weibull distribution to the data values in Série B. The shape and scale parameters were estimated using the rank regression method, which corresponds to fitting a straight line to the Weibull plot. The minimum value of the distribution was assumed to be located at 0,0. Of the 22 data values, 0 were treated as right-censored, meaning that the true values might be greater than was indicated. Note: you may set the origin of the Weibull distribution to any number less than the minimum value in your data set using Analysis Options.



Goodness-of-Fit Tests for Série B

Kolmogorov-Smirnov Test

	<i>Weibull</i>
DPLUS	0,0827924
DMINUS	0,0900552
DN	0,0900552
P-Value	0,994106

The StatAdvisor

This pane shows the results of tests run to determine whether Série B can be adequately modeled by a Weibull distribution. Since the smallest P-value amongst the tests performed is greater than or equal to 0,05, we can not reject the idea that Série B comes from a Weibull distribution with 95% confidence.

Weibull Analysis - Série C

Data variable: Série C

Estimation method: rank regression

Sample size = 20

Number of failures = 20

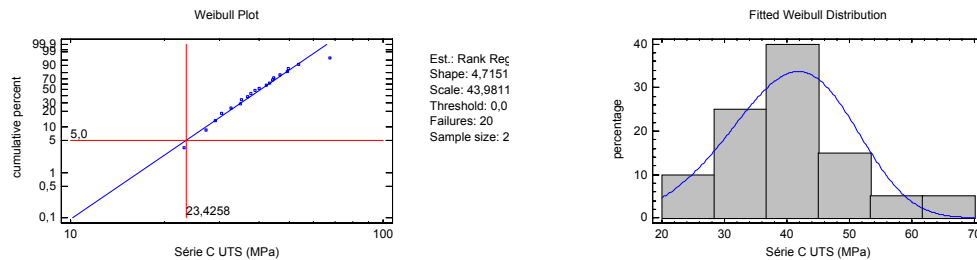
Estimated shape = 4,71519

Estimated scale = 43,9811

Specified threshold = 0,0

The StatAdvisor

This table shows the results of fitting a Weibull distribution to the data values in Série C. The shape and scale parameters were estimated using the rank regression method, which corresponds to fitting a straight line to the Weibull plot. The minimum value of the distribution was assumed to be located at 0,0. Of the 20 data values, 0 were treated as right-censored, meaning that the true values might be greater than was indicated. Note: you may set the origin of the Weibull distribution to any number less than the minimum value in your data set using Analysis Options.



Goodness-of-Fit Tests for Série C

Kolmogorov-Smirnov Test

	<i>Weibull</i>
DPLUS	0,0874259
DMINUS	0,0494852
DN	0,0874259
P-Value	0,997996

The StatAdvisor

This pane shows the results of tests run to determine whether Série C can be adequately modeled by a Weibull distribution. Since the smallest P-value amongst the tests performed is greater than or equal to 0,05, we can not reject the idea that Série C comes from a Weibull distribution with 95% confidence.

Weibull Analysis - Série D

Data variable: Série D

Estimation method: rank regression

Sample size = 26

Number of failures = 26

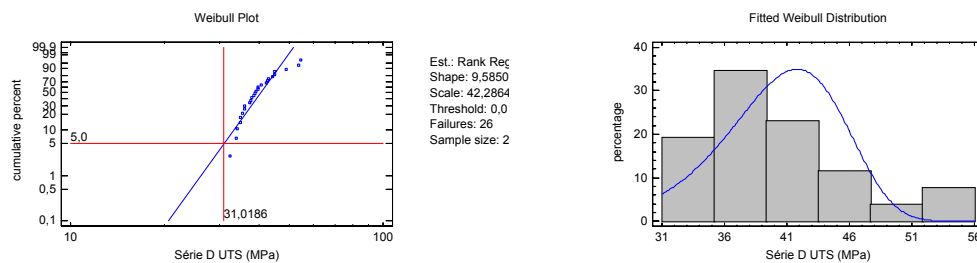
Estimated shape = 9,58502

Estimated scale = 42,2864

Specified threshold = 0,0

The StatAdvisor

This table shows the results of fitting a Weibull distribution to the data values in Série D. The shape and scale parameters were estimated using the rank regression method, which corresponds to fitting a straight line to the Weibull plot. The minimum value of the distribution was assumed to be located at 0,0. Of the 26 data values, 0 were treated as right-censored, meaning that the true values might be greater than was indicated. Note: you may set the origin of the Weibull distribution to any number less than the minimum value in your data set using Analysis Options.



Goodness-of-Fit Tests for Série D

Kolmogorov-Smirnov Test

	<i>Weibull</i>
DPLUS	0,1826
DMINUS	0,0963999
DN	0,1826
P-Value	0,354187

The StatAdvisor

This pane shows the results of tests run to determine whether Série D can be adequately modeled by a Weibull distribution. Since the smallest P-value amongst the tests performed is greater than or equal to 0,05, we can not reject the idea that Série D comes from a Weibull distribution with 95% confidence.

Weibull Analysis - Série E

Data variable: Série E

Estimation method: rank regression

Sample size = 24

Number of failures = 24

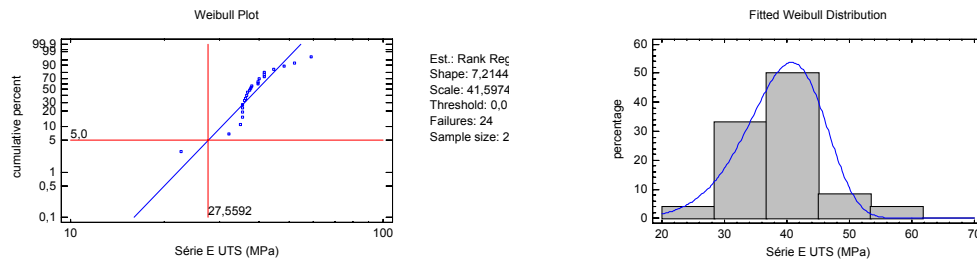
Estimated shape = 7,21442

Estimated scale = 41,5974

Specified threshold = 0,0

The StatAdvisor

This table shows the results of fitting a Weibull distribution to the data values in Série E. The shape and scale parameters were estimated using the rank regression method, which corresponds to fitting a straight line to the Weibull plot. The minimum value of the distribution was assumed to be located at 0,0. Of the 24 data values, 0 were treated as right-censored, meaning that the true values might be greater than was indicated. Note: you may set the origin of the Weibull distribution to any number less than the minimum value in your data set using Analysis Options.



Goodness-of-Fit Tests for Série E

Kolmogorov-Smirnov Test

	<i>Weibull</i>
DPLUS	0,186883
DMINUS	0,160584
DN	0,186883
P-Value	0,375309

The StatAdvisor

This pane shows the results of tests run to determine whether Série E can be adequately modeled by a Weibull distribution. Since the smallest P-value amongst the tests performed is greater than or equal to 0,05, we can not reject the idea that Série E comes from a Weibull distribution with 95% confidence.

Weibull Analysis - Série F

Data variable: Série F

Estimation method: rank regression

Sample size = 20

Number of failures = 20

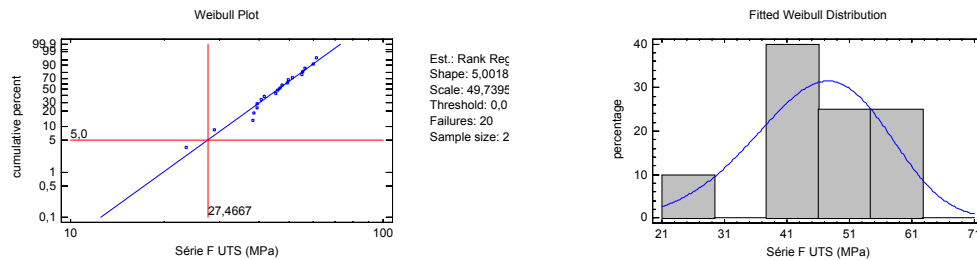
Estimated shape = 5,00181

Estimated scale = 49,7395

Specified threshold = 0,0

The StatAdvisor

This table shows the results of fitting a Weibull distribution to the data values in Série F. The shape and scale parameters were estimated using the rank regression method, which corresponds to fitting a straight line to the Weibull plot. The minimum value of the distribution was assumed to be located at 0,0. Of the 20 data values, 0 were treated as right-censored, meaning that the true values might be greater than was indicated. Note: you may set the origin of the Weibull distribution to any number less than the minimum value in your data set using Analysis Options.



Goodness-of-Fit Tests for Série F

Kolmogorov-Smirnov Test

	<i>Weibull</i>
DPLUS	0,0670104
DMINUS	0,141039
DN	0,141039
P-Value	0,821148

The StatAdvisor

This pane shows the results of tests run to determine whether Série F can be adequately modeled by a Weibull distribution. Since the smallest P-value amongst the tests performed is greater than or equal to 0,05, we can not reject the idea that Série F comes from a Weibull distribution with 95% confidence.

Weibull Analysis - Série G

Data variable: Série G

Estimation method: rank regression

Sample size = 17

Number of failures = 17

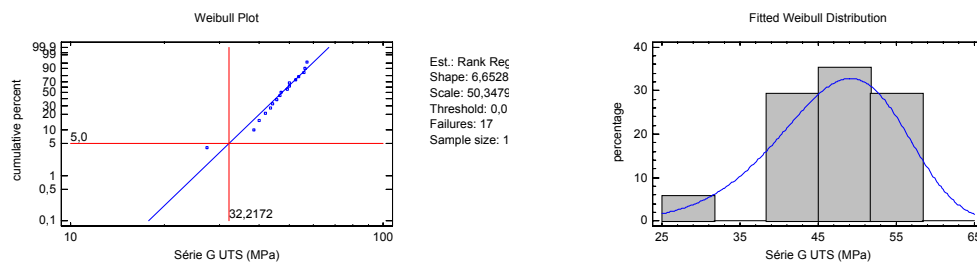
Estimated shape = 6,65285

Estimated scale = 50,3479

Specified threshold = 0,0

The StatAdvisor

This table shows the results of fitting a Weibull distribution to the data values in Série G. The shape and scale parameters were estimated using the rank regression method, which corresponds to fitting a straight line to the Weibull plot. The minimum value of the distribution was assumed to be located at 0,0. Of the 17 data values, 0 were treated as right-censored, meaning that the true values might be greater than was indicated. Note: you may set the origin of the Weibull distribution to any number less than the minimum value in your data set using Analysis Options.



Goodness-of-Fit Tests for Série G

Kolmogorov-Smirnov Test

	<i>Weibull</i>
DPLUS	0,104668
DMINUS	0,0999686
DN	0,104668
P-Value	0,992287

The StatAdvisor

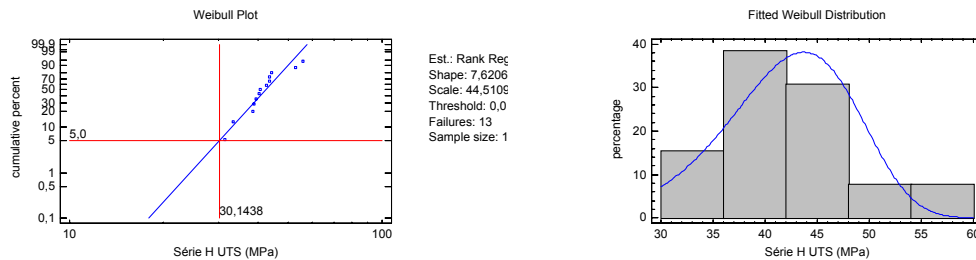
This pane shows the results of tests run to determine whether Série G can be adequately modeled by a Weibull distribution. Since the smallest P-value amongst the tests performed is greater than or equal to 0,05, we can not reject the idea that Série G comes from a Weibull distribution with 95% confidence.

Weibull Analysis - Série H

Data variable: Série H
 Estimation method: rank regression
 Sample size = 13
 Number of failures = 13
 Estimated shape = 7,62068
 Estimated scale = 44,5109
 Specified threshold = 0,0

The StatAdvisor

This table shows the results of fitting a Weibull distribution to the data values in Série H. The shape and scale parameters were estimated using the rank regression method, which corresponds to fitting a straight line to the Weibull plot. The minimum value of the distribution was assumed to be located at 0,0. Of the 13 data values, 0 were treated as right-censored, meaning that the true values might be greater than was indicated. Note: you may set the origin of the Weibull distribution to any number less than the minimum value in your data set using Analysis Options.



Goodness-of-Fit Tests for Série H

Kolmogorov-Smirnov Test

	<i>Weibull</i>
DPLUS	0,217179
DMINUS	0,132931
DN	0,217179
P-Value	0,57195

The StatAdvisor

This pane shows the results of tests run to determine whether Série H can be adequately modeled by a Weibull distribution. Since the smallest P-value amongst the tests performed is greater than or equal to 0,05, we can not reject the idea that Série H comes from a Weibull distribution with 95% confidence.

Weibull Analysis - Série I

Data variable: Série I

Estimation method: rank regression

Sample size = 20

Number of failures = 20

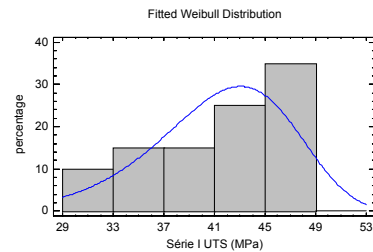
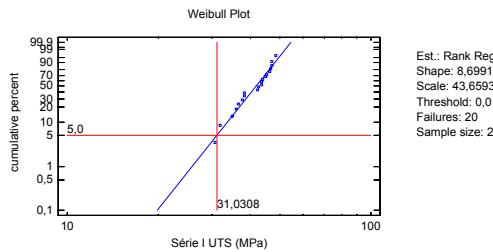
Estimated shape = 8,69915

Estimated scale = 43,6593

Specified threshold = 0,0

The StatAdvisor

This table shows the results of fitting a Weibull distribution to the data values in Série I. The shape and scale parameters were estimated using the rank regression method, which corresponds to fitting a straight line to the Weibull plot. The minimum value of the distribution was assumed to be located at 0,0. Of the 20 data values, 0 were treated as right-censored, meaning that the true values might be greater than was indicated. Note: you may set the origin of the Weibull distribution to any number less than the minimum value in your data set using Analysis Options.



Goodness-of-Fit Tests for Série I

Kolmogorov-Smirnov Test

	<i>Weibull</i>
DPLUS	0,121232
DMINUS	0,130036
DN	0,130036
P-Value	0,887745

The StatAdvisor

This pane shows the results of tests run to determine whether Série I can be adequately modeled by a Weibull distribution. Since the smallest P-value amongst the tests performed is greater than or equal to 0,05, we can not reject the idea that Série I comes from a Weibull distribution with 95% confidence.

Annexe VIII Images de l'expérimentation

**Scie à ruban pour découpe initiale des blocs de
4x6**



Coupe d'un 2x4 dans un bloc de 4x6



Pièces de 2x4 séchées pour l'éboutage final



Moulurière 5 axes pour dimensions finales



Pièces de 2x4 aboutées



Essai de traction parallèle au grain

