

BENOIT BELLEVILLE

SOUDAGE DE BOIS FEUILLUS PAR FRICTION ROTATIONNELLE

Thèse présentée
à la Faculté des études supérieures et postdoctorales de l'Université Laval
dans le cadre du programme de doctorat en Sciences du bois
pour l'obtention du grade de Philosophiae Doctor (Ph.D.)

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

2012

Résumé

Les différentes colles utilisées actuellement par l'industrie du meuble au Canada nécessitent des temps de polymérisation constituant un goulot dans la production des meubles et limitant l'atteinte de la production unitaire. Ces adhésifs synthétiques généralement issus de la pétrochimie nécessitent énormément d'énergie lors de leur confection. L'utilisation de connecteurs métalliques ou plastiques, quant à elle, limite les phases de découpage et sablage subséquentes. La présence d'adhésifs et connecteurs, considérés comme une source de contamination tant dans des procédés de valorisation par la filière énergétique que dans les procédés existants de recyclage des produits du bois, limite la recyclabilité du produit rendant sa gestion en fin de vie utile très difficile. L'assemblage de composants en bois par la technique de soudage par friction rotationnelle est une alternative intéressante aux colles et connecteurs métalliques dans l'industrie du meuble. Le soudage du bois permet d'offrir un produit minimisant l'impact environnemental d'une entreprise alors que ce mode d'assemblage ne constitue pas une contrainte à la gestion en fin de vie du produit. La recyclabilité ou revalorisation des assemblages soudés permet d'offrir un produit en mesure de séquestrer du carbone plus longtemps ou encore de ralentir la réémission de celui-ci dans l'atmosphère.

Le présent projet de recherche visait à évaluer l'aptitude du soudage par friction rotationnelle pour la fabrication de panneaux lamellés-soudés à usage intérieur. L'objectif était de concevoir des panneaux aussi performants que leur équivalent collé tout en réduisant les coûts de conception en éliminant l'utilisation d'adhésifs synthétiques, conférant du même coup un aspect écologique et durable au produit. Les objectifs spécifiques du projet étaient: de déterminer les paramètres optimaux variables du soudage rotationnel pour deux essences feuillues canadiennes soit l'érable à sucre et le bouleau jaune; de caractériser les propriétés mécaniques des joints soudés ainsi que la stabilité dimensionnelle de panneaux lamellés-soudés; de procéder à la caractérisation de la zone de fusion afin de comprendre les phénomènes physico-chimiques en cause afin de les mettre en relation avec les performances mécaniques des assemblages; d'analyser les émanations volatiles produites lors du soudage afin d'évaluer l'impact environnemental de ce procédé.

Ce projet de recherche a fait l'objet d'une collaboration avec FPInnovations, EQMBO-Entreprises et le Centre de recherche industrielle du Québec (CRIQ) qui a conçu et assemblé un banc d'essai spécifiquement pour le panneautage par le procédé de soudage rotationnel. Considérant cette collaboration, une tangente industrielle a été donnée à la méthodologie employée afin de répondre aux objectifs des partenaires. Le banc d'essai a d'ailleurs fait l'objet d'ajustements et d'améliorations tout au long du projet en vue de son optimisation pour un transfert de cette technologie en milieu industriel. Le matériel utilisé pour cette étude visait également à refléter la matière première utilisée chez les fabricants de produits d'apparence en bois.

Le banc d'essai conçu par le Centre de recherche industrielle du Québec (CRIQ) a permis d'étudier l'effet de différents paramètres sur la qualité de soudage pour l'érable à sucre (*Acer saccharum*) et le bouleau jaune (*Betula alleghaniensis*). Les facteurs à l'étude étaient: l'essence (érable à sucre et bouleau jaune), la vitesse de rotation du goujon (1000 tours min⁻¹, 1500 tours min⁻¹ et 2500 tours min⁻¹), la vitesse d'insertion du goujon (12,5 mm s⁻¹, 16,7 mm s⁻¹ et 25,0 mm s⁻¹) et enfin l'angle d'insertion par rapport au fil du bois (insertion tangentielle à 0° par rapport au fil du bois et insertion radiale à 90° par rapport au fil du bois) pour un total de 36 combinaisons de facteurs. Dix répétitions pour chacune des combinaisons ont été effectuées pour un total de 360 soudages. Des essais mécaniques de traction appliqués à la zone de soudage ont permis de connaître les paramètres d'assemblage optimaux pour les deux essences considérées. Des mesures de température effectuées au moyen d'un système d'acquisition munis de thermocouples ont également été effectuées.

Les résultats obtenus démontrent une interaction significative entre l'essence, la vitesse de rotation et la vitesse d'insertion. L'érable à sucre a permis de produire les joints soudés ayant les meilleures propriétés mécaniques en traction. Les meilleurs résultats ont été obtenus avec une vitesse rotationnelle de 1000 tours min⁻¹ tant pour l'érable à sucre que le bouleau jaune. Une vitesse d'insertion de 25,0 mm s⁻¹ s'est avérée optimale pour le soudage de l'érable à sucre. Dans le cas du bouleau jaune, une vitesse d'insertion de 16 mm s⁻¹ a permis de produire les joints soudés les plus solides pour cette essence. L'angle d'insertion par rapport au fil du bois n'a pas eu d'effet significatif sur les essais mécaniques en

traction. L'essence et la vitesse rotationnelle ont eu un effet significatif sur la température maximale à l'interface lors du soudage. Des températures maximales à l'insertion de 244 °C et 282 °C ont été mesurées pour l'érable à sucre et le bouleau jaune à partir des paramètres des soudages optimaux pour chaque essence, respectivement.

Cette étude a également examiné la faisabilité du panneautage pour des applications d'apparence intérieures à partir de la technologie de soudage du bois par friction rotationnelle. Pour chacune des essences étudiées, douze panneaux lamellés-soudés de 30 mm x 225 mm x 300 mm ont été fabriqués. Six panneaux lamellés-collés de mêmes dimensions, assemblés avec une émulsion de type acétate de polyvinyle (PVA), ont été assemblés pour chaque essence étudiée pour fins de comparaison. Des essais de flexion statique en trois points ont été effectués afin d'adresser la performance mécanique des assemblages. Des essais non destructifs sous caisson climatiseur ont également été effectués afin de comprendre le comportement d'un panneautage lamellé-soudé sous atmosphère alternativement humide (20 °C et 80 % d'humidité relative) correspondant aux conditions estivales et sec (20 °C et 20 % d'humidité relative) pour des conditions hivernales afin d'observer les déformations ou délaminations possibles pouvant se produire sur les panneautages.

Des forces maximales à la rupture en flexion de 1,79 kN et 1,70 kN ont été obtenues pour les panneaux lamellés-soudés de bouleau jaune et d'érable à sucre, respectivement. La fracture se produisait généralement dans la section transversale du goujon. Aucun déplacement des goujons n'a été observé à l'interface de soudage. De la délamination dans les panneautages a été constatée au terme des cycles à atmosphère variable autant pour les constructions soudées que collées. Toutefois, celle-ci n'a pas affecté les propriétés en flexion des panneaux lamellés-soudés. Les résultats confirment le potentiel du soudage par friction rotationnelle pour la production de panneaux lamellés-soudés à partir d'essences feuillues canadiennes.

La caractérisation de la ligne de soudage a permis de saisir certains aspects fondamentaux liés au soudage du bois par friction rotationnelle. Grâce aux méthodes de pyrolyse couplée à un chromatographe en phase gazeuse et un spectromètre de masse (Py-GC/MS), de spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier sur un montage de réflexion totale

atténuée (ATR-FTIR) et de spectrométrie de photoélectrons induits par rayon-X (XPS), il a été possible d'évaluer les changements thermochimiques durant le soudage par friction rotationnelle chez l'érable à sucre et le bouleau jaune. Le matériel ligneux de référence et le matériel à l'interface de soudage de deux pièces de bois, un goujon et un substrat, ont été comparés dans le but d'expliquer les différences de propriétés mécaniques entre les essences. Les émissions volatiles libérées durant le procédé de soudage ont été analysées en reproduisant le traitement thermique par Py-GC/MS de même qu'avec un chromatographe en phase gazeuse avec détection de conductivité thermique et d'ionisation de la flamme (GC/TCD-FID) afin d'analyser les émanations captées lors du soudage.

Les résultats démontrent que le procédé thermique lié au soudage du bouleau jaune et de l'érable à sucre dégrade les hémicelluloses et affecte les polymères de la lignine via une dépolymérisation. L'efficacité du procédé de soudage est ainsi directement liée aux propriétés initiales des constituants du bois, essentiellement la lignine et les glucides. Les changements liés à la lignine à l'interface de soudage ont été plus nombreux chez l'érable à sucre que le bouleau jaune corroborant les résultats obtenus lors des essais mécaniques. Les proportions d'émission volatile ont été similaires pour nos deux essences. L'analyse des composés organiques volatils a permis de conclure que les émanations produites lors du soudage sont négligeables et ne présentent pas de risque pour la santé humaine ou pour l'environnement.

Abstract

Gluing is a valid and extensively used alternative to paneling in the furniture industry. However, adhesives, which are generally produced by the petrochemical industry, require curing times (up to 24 h) and multiple handling, which limits the production flow and flexibility required for customized production. Moreover, they are generally derived from non-renewable fossil resources, making the end product expensive from both an ecological and economic standpoint. They also pose a recovery problem, as they are considered a source of contamination in biomass energy methods and wooden waste recycling.

Wood welding can shorten the production cycle and reduce dependence on the petrochemical industry. By replacing synthetic resins with the intrinsic lignin binders present in lignocellulosic fibre materials, the depletion of fossil resources could be abated. Wood, which is a renewable, CO₂ neutral raw material, can play a key role in sustainable development and have a significant impact on responsible residual waste management.

This study examines the suitability of wood welding technology for producing composite panels for furniture applications with two Canadian hardwood species, sugar maple (*Acer saccharum*) and yellow birch (*Betula alleghaniensis*). The specific objectives of the present study were: to define optimal wood-dowel welding parameters for two North American hardwood species frequently used for indoor appearance products: sugar maple and yellow birch; to produce wood-welded panels made from sugar maple and yellow birch using a specifically designed panelling machine; to assess the flexural properties of the wood-welded panels, considering the required load-bearing capacity for a typical standard panel used for furniture components; to assess the performance of the wood-welded panels at standard moisture conditions and after humidity cycling; to investigate chemical changes occurring at the welding interface; and to determine the gases released during welding under conditions of optimised welding parameters.

High-speed rotation-induced mechanical friction wood-dowel welding was performed using a panelling machine specifically designed at the Centre de Recherche Industrielle du Québec. A comparative analysis of wood-dowel welding parameters was performed. The investigated parameters for both species were grain orientation (tangential or radial),

rotational speed (1000 rpm, 1500 rpm, and 2500 rpm) and insertion speed (12.5 mm s^{-1} , 16.7 mm s^{-1} , and 25.0 mm s^{-1}) for 36 possible combinations. Ten samples were prepared for a total of 360 wood welded specimens. Optimal welding mechanical properties were determined from the dowel withdrawal strength using a standard tensile strength test. Temperature profile measurements at the interface during rotational wood-dowel welding were also carried out.

Results revealed a significant interaction between species, rotational speed, and insertion speed. Sugar maple produced wood joints with higher withdrawal strength than yellow birch. The best results for sugar maple and yellow birch were obtained with a rotational speed of 1000 rpm. A 25 mm s^{-1} insertion speed produced significantly stronger welded joints in sugar maple than at 12.5 mm s^{-1} . For yellow birch, a 16.7 mm s^{-1} insertion speed provided the best results. Both species and rotational speed had a significant effect on peak temperature at the interface during welding. Peak welding temperatures with optimal parameters were 244°C and 282°C for sugar maple and yellow birch, respectively.

This study examined the suitability of wood welding technology for producing composite panels for furniture applications with sugar maple and yellow birch. For each species, twelve $30 \text{ mm} \times 225 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$ panels were manufactured using a panelling machine specifically designed for rotational wood-dowel welding with optimized parameters. Six edge-glued panels of the same size were manufactured from each species using a non-structural polyvinyl acetate (PVA) adhesive and tested for comparative purposes. The experimental program included three-point bending at 255-mm span and visual inspection of the panels to assess performance at standard moisture conditions and after an aging cycle with variable relative humidity. Cycling conditions were 20°C and 80% relative humidity (RH) and 20°C and 20% RH.

Wood-welded panel bending properties were not affected by wood species, with average load at break of 1.79 kN and 1.70 kN for yellow birch and sugar maple, respectively. Fractures consistently occurred in the dowels as splintering tension, and no slippage was observed along the welded interface. No distortion was observed in wood-welded panels following humidity cycling. The cycling did not negatively affect the panel's bending properties. Edge splitting was observed in both wood-welded and glued panels due to wood

slat shrinkage in response to dry conditions. The results confirm that wood-dowel welding could be suitable for producing panels from certain North American species.

Thermochemical changes during wood-dowel welding were investigated. The original reference wood sample and the welded interface between two bonded wood pieces, a dowel and a substrate, were compared to explain differences in mechanical properties between species. Pyrolysis gas chromatography - mass spectrometry (Py-GC/MS), attenuated total reflection Fourier transform infrared spectroscopy (ATR-FTIR), and X-ray photoelectron spectroscopy (XPS) were used. The gases emitted during wood welding were determined by Py-GC/MS and gas chromatography coupled with a thermal conductivity detector and a flame ionization detector (GC-TCD/FID).

The results of this investigation showed that thermal treatment of birch and maple wood degrades hemicelluloses through acid hydrolysis and dehydration mechanism and affects lignin polymer through depolymerisation reactions. The gas emission results show similar proportions of non-condensable gases for the two studied species. Most of the volatile compounds identified during pyrolysis were non-toxic products derived from degradation of wood polymers. No carbon monoxide was produced during welding, and only traces of hydrogen and carbon dioxide were present. The proportion of detected volatile organic compounds was relatively low and below the lower exposure limits. Hence, wood welding appears to be an ecological technique for assembling furniture components and other applications, and is not harmful for human health.

Avant-Propos

Ce document est présenté sous la forme d'une thèse avec chapitres sous forme de publication. Celle-ci a été conçue selon les critères de présentation adoptés par le comité de programme de 2e et 3e cycle en sciences du bois de l'Université Laval. Les articles suivants, rédigés en langue anglaise, sont inclus dans cet ouvrage.

- Chapitre 3: Belleville B, Stevanovic T, Pizzi A, Cloutier A, Blanchet P (2012) *Determination of optimal wood-dowel welding parameters for two North American hardwood species*. Journal of Adhesion Science and Technology (Article publié, DOI:10.1080/01694243.2012.687596).
- Chapitre 4: Belleville B, Stevanovic T, Cloutier A, Salenikovitch A, Pizzi A, Blanchet P (2012) *Production and properties of wood-welded panels made from two Canadian hardwoods*. Wood Science and Technology (Article accepté).
- Chapitre 5: Belleville B, Stevanovic T, Cloutier A, Pizzi A, Prado M, Erakovic S, Diouf P, Royer M (2012) *An investigation of thermochemical changes in Canadian hardwood species during wood welding*. European Journal of Wood and Wood Products (Article accepté).

En tant que candidat au doctorat et premier auteur de ces articles, j'ai effectué la revue de littérature sur le sujet de recherche, la planification du travail, la préparation des échantillons, les essais de laboratoire, l'analyse statistique des données ainsi que la rédaction des différentes publications. Les professeurs Tatjana Stevanovic, Alain Cloutier et Antonio Pizzi, respectivement directrice, co-directeur et co-directeur de ce projet de doctorat et co-auteurs des articles, m'ont conseillé judicieusement durant tout mon cheminement et ont corrigé les articles scientifiques.

Les résultats exposés dans ces chapitres ont également été présentés lors des congrès suivants:

- Belleville B, Stevanovic T, Cloutier A, Pizzi A (2011) *Production and properties of sustainable wood-welded panels from North American species*. 65^e Convention Internationale, Forest Products Society, 19-21 Juin, Portland, OR, États-Unis.
- Belleville B, Cloutier A, Pizzi A, Stevanovic T (2010) *Éco-conception automatisée de panneaux lamellés-soudés à base de bois par friction rotationnelle*. Journée du Centre de recherche sur le bois, 26 Novembre, Université Laval, Québec, Québec, Canada.
- Belleville B, Hotte D, Dessureault Y, Pizzi A, Cloutier A, Stevanovic T (2010) *Éco-conception automatisée de panneaux lamellés-soudés à base de bois par friction rotationnelle*. Matériaux 2010, Fédération Française des Matériaux, 18-22 Octobre, Nantes, France.
- Belleville B, Stevanovic T, Cloutier A, Pizzi A (2010) *Conception of sustainable wood-welded panels*. 64^e Convention internationale, Forest Products Society, 20-22 Juin, Madison, WI, États-Unis.
- Belleville B, Stevanovic T, Cloutier A, Pizzi A (2010) *Détermination des paramètres optimaux pour le soudage rotationnel d'essences canadiennes*. 78^e Convention de l'ACFAS, 10-14 Mai, Montréal, Québec, Canada.

De plus, il est à noter que ces travaux ont été présentés sous forme d'affiche scientifique lors des congrès suivants:

- Belleville B, Cloutier A, Pizzi A, Stevanovic T (2011) *Le soudage du bois: Une transformation du bois durable*. Journée du Centre de recherche sur le bois, 25 Novembre, Université Laval, Québec, Québec, Canada.
- Belleville B, Prado M, Royer M, Cloutier A, Pizzi A, Stevanovic T (2011) *Wood bonding without adhesives: a wood chemistry contribution*. Italic 6, 5-8 Septembre, Université Tuscia, Viterbo, Italie.

Ce projet de recherche a été financé par le Fonds Québécois de la Recherche sur la Nature et les Technologies (FQRNT), le Conseil de Recherches en Sciences Naturelles et en Génie du Canada et FPInnovations via le programme BMPInnovation. Je tiens à remercier ces organismes pour leur confiance et leur appui.

J'aimerais remercier ma directrice, Tatjana Stevanovic, et mes co-directeurs, Alain Cloutier et Antonio Pizzi, de m'avoir donné la chance de travailler sur ce projet et de m'avoir guidé au cours des dernières années. Travailler avec vous a été non seulement un plaisir mais également un privilège. Mes remerciements s'étendent à Pierre Blanchet et à Alexander Salenikovich pour leur implication à différentes étapes du projet. Merci à vous tous pour vos conseils judicieux et votre passion envers votre profession. Je tiens également à remercier Marie-Laure Dano, Bernard Riedl et Jean-Michel Leban pour avoir accepté d'être membres du jury.

Remerciements spéciaux à Denis Hotte, Jean-Yves Métivier et Yves Dessureault du Centre de recherche industrielle du Québec, et à André Toupin et Roger Ducharme de EQMBO-Entreprises, pour le support technique et matériel apporté durant le projet. Merci aussi à tous les membres du Centre de recherche sur le bois de l'Université Laval qui ont participé de près ou de loin à ce projet. Merci spécialement à Sylvain Auger, Yves Bédard, Guylaine Bélanger, Daniel Bourgault, Luc Germain, Louise Joannette, Colette Bourcier, David Lagueux, Éric Rousseau, Benoît Saint-Pierre, Maria Rosa Prado, Sanja Erakovic, Papa Niokhor Diouf, Mariana Royer, Gabriel Dubé et Gina Rodriguez.

J'ai eu la chance de faire un séjour en Europe lors de la deuxième année de mon projet de recherche. J'aimerais remercier Antonio Pizzi de m'avoir permis de travailler pendant trois mois à l'École Nationale Supérieure des Technologies et Industries du Bois (ENSTIB) d'Épinal, en France. J'aimerais remercier les gens de l'ENSTIB pour leur accueil chaleureux. Merci à César, Andrzej, Rami et Gisèle pour les beaux moments passés en votre compagnie. Enfin, un gros merci à ma conjointe Dominique, à ma famille et à mes amis qui m'ont toujours soutenu et appuyé dans cette aventure.

À Dominique, ma meilleure moitié.

Table des matières

Résumé.....	i
Abstract.....	v
Avant-Propos.....	viii
Table des matières.....	xii
Liste des tableaux.....	xv
Liste des figures.....	xvii
Introduction.....	1
Chapitre 1 Revue de littérature.....	3
1.1 Portrait forestier québécois.....	3
1.2 Matériau bois et ses propriétés.....	4
1.2.1 Relations entre l'eau et le bois.....	7
1.2.2 Masse volumique.....	7
1.2.3 Considérations techniques mécaniques.....	9
1.2.4 Propriétés thermiques.....	17
1.3 Anatomie et composition chimique du bois.....	18
1.3.1 Cellulose.....	21
1.3.2 Hemicelluloses.....	24
1.3.3 Lignine.....	25
1.3.4 Extractibles.....	26
1.4 Comportement du matériau bois lors d'un traitement thermique.....	27
1.4.1 Voies de transformation thermochimique.....	27
1.4.2 Réactions chimiques des constituants polymères du bois.....	34
1.4.3 Température de transition vitreuse.....	41
1.5 Le soudage du bois.....	42
1.5.1 Soudage linéaire.....	43
1.5.2 Soudage rotationnel.....	45
1.5.3 Paramètres influents lors du soudage.....	46
1.5.4 Soudage du bois et qualité de l'air.....	57
1.5.5 Aspects chimiques en lien avec le soudage du bois.....	58
1.6 Objectifs de recherche.....	60
Chapitre 2 Rétrospective méthodologique.....	62
2.1 Érable à sucre.....	63
2.2 Bouleau jaune.....	64
2.3 Préparation du matériel.....	66
2.4 Détermination de la masse volumique.....	66
2.5 Équipement pour le soudage par friction rotationnelle.....	67
2.6 Détermination des paramètres optimaux de soudage.....	68
2.6.1 Essais préliminaires.....	68
2.6.2 Détermination des paramètres de soudage optimaux.....	73
2.6.3 Mesure de la température à l'interface de soudage.....	74
2.7 Conception et fabrication de panneau lamellé-soudé.....	76
2.7.1 Étude préliminaire.....	76
2.7.2 Fabrication des panneaux lamellés-soudés.....	87
2.7.3 Fabrication des panneaux lamellés-collés.....	89

2.7.4 Essai de flexion statique en 3 points.....	91
2.7.5 Cycle de conditionnement	92
2.8 Caractérisation de l'interface de soudage	93
2.8.1 Pyrolyse analytique par chromatographie gazeuse et spectroscopie de masse (Py-GC/MS).....	93
2.8.2 Spectrométrie de photoélectrons induits par rayons-X (XPS).....	100
2.8.3 Spectroscopie infrarouge par transformé de Fourier de type réflexion totale atténué (ATR-FTIR)	103
2.9 Analyse des émanations volatiles produites lors du soudage	106
2.9.1 Étude préliminaire.....	106
2.9.2 Pyrolyse analytique par chromatographie gazeuse et spectroscopie de masse (Py-GC/MS).....	111
2.9.3 Chromatographie en phase gazeuse avec détection de conductivité thermique et d'ionisation de la flamme (GC/TCD-FID)	112
2.10 Analyse statistique	113
Chapitre 3 Détermination des paramètres optimaux de soudage du bois par friction rotationnelle pour deux essences nord-américaines.....	114
3.1 Résumé.....	114
3.2 Abstract.....	115
3.3 Introduction.....	115
3.4 Materials and methods.....	118
3.4.1 Welding conditions	118
3.4.2 Mechanical properties determination.....	119
3.4.3 Welding interface temperature measurement	120
3.4.4 Species combinations.....	121
3.5 Results and discussion	122
3.5.1 Welding performance	122
3.5.2 Temperature measurement at the interface during welding.....	125
3.5.3 Species combinations.....	127
3.6 Conclusion	128
Chapitre 4 Fabrication et propriétés de panneaux lamellés-soudés conçus à partir d'essences feuillues canadiennes.	130
4.1 Résumé.....	130
4.2 Abstract.....	131
4.3 Introduction.....	131
4.4 Material and methods.....	132
4.4.1 Test specimen preparation	132
4.4.2 Wood welding parameters	133
4.4.3 Edge-glued panels.....	134
4.4.4 Three-point bending tests.....	134
4.4.5 Humidity cycle.....	140
4.5 Results and discussion	141
4.5.1 Three-point bending tests.....	141
4.5.2 Panel appearance after humidity cycling	147
4.6 Conclusions.....	150
Chapitre 5 Étude des changements thermochimiques dans le bois d'essences feuillues canadiennes durant le soudage.....	152

5.1 Résumé.....	152
5.2 Abstract.....	153
5.3 Introduction.....	153
5.4 Material and methods.....	155
5.4.1 Sample preparation	155
5.4.2 Thermochemical changes analysis at the welded interface	156
5.4.3 Characterisation of gas emissions.....	158
5.5 Results and discussion	159
5.5.1 Thermochemical changes at the welded interface	159
5.5.2 Gases analysis	175
5.6 Conclusions.....	179
Conclusion générale.....	182
Bibliographie	188
Annexe 1 Conception d'un lit pour bébé par soudage rotationnel.	197
Annexe 2 Résultats des essais de détermination de la masse volumique basale.	202
Annexe 3 Résultats des essais de détermination de la température à l'interface de soudage.	203
Annexe 4 Résultats des essais préliminaires de traction sur des assemblages soudés.....	208
Annexe 5 Résultats des essais de caractérisation de l'interface de soudage.....	211

Liste des tableaux

Tableau 1.1 Différentes masses volumiques pour l'érable à sucre et le bouleau jaune (Jessome 2000).	9
Tableau 1.2 Composition chimique (%) des espèces étudiées (Timell 1967)	27
Tableau 1.3 Composition en principaux composés organiques du goudron obtenus par une gazéification du bois à 750 et 900 °C (g kg^{-1} de bois sec).	30
Tableau 1.4 Composition du bois et des constituants de la paroi cellulaire (% sur une base sèche) après pyrolyse à température de gazéification (800 °C) (Hosaya et al. 2007).	33
Tableau 1.5 Composition de la surface (%) à l'interface de soudage et pour l'érable à sucre et le bouleau jaune par analyse XPS (Sun et al 2010).	59
Tableau 2.1 Composition volumétrique pour le bouleau jaune et l'érable à sucre (Pashin et De Zeeuw 1980).	64
Tableau 2.2 Plan d'expérience préliminaire d'essai en traction d'assemblages soudés.	80
Tableau 2.3 Chargement maximale en traction (kN) pour les assemblages soudés en fonction de l'essence et du sens d'insertion des goujons.	84
Tableau 2.4 ANOVA de l'effet de l'essence et du sens d'insertion des goujons sur les propriétés mécaniques d'assemblages soudés en arrachement.	85
Tableau 2.5 Contrainte à l'arrachement (MPa) en traction linéaire d'assemblages soudés en fonction de l'essence et du sens d'insertion des goujons.	86
Tableau 2.6 Différentes méthodes pyrolytiques et leurs caractéristiques variables (Mohan 2006).	95
Tableau 2.7 Proportion massique (%) des produits formés suite à la pyrolyse flash de bois en fonction de la température (Horne et Williams 1996).	96
Tableau 2.8 Proportion massique (%) des gaz provenant de la pyrolyse flash du bois en fonction de la température (Horne et Williams 1996).	96
Tableau 2.9 Composition massique élémentaire (%) des produits issues de la pyrolyse flash du bois (Horne et Williams 1996).	97
Tableau 2.10 Concentration (ppm) des composés aromatiques présents dans les huiles issues de la pyrolyse à différentes températures (Horne et Williams 1996).	98
Tableau 2.11 Proportion (%) de lignine et de produits glucosiques obtenus pour le bois de référence et lors du soudage chez le bouleau jaune et l'érable à sucre par pyrolyse GC/MS (Sun et al. 2010).	99
Tableau 2.12 Type de liaisons en fonction de la région d'adsorption (Silverstein et al. 1998).	104
Table 3.1 Test design summary for species combinations.	121
Table 3.2 Analysis of variance (F-values) results for wood-dowel bonded specimens mechanical properties as a function of welding parameters.	122
Table 3.3 Average and individual maximal withdrawal strengths obtained for each set of welding parameters for sugar maple and yellow birch.	124
Table 3.4 Statistical analysis of variance results for the effect of welding parameters on peak temperature at the interface.	126
Table 3.5 Experimental results for peak temperature (T) during rotational wood-dowel welding.	126
Table 4.1 Load at break (P_{max}) and slope of the straight line portion of the load deflection curve ($\Delta F/\Delta \delta$) during three-point bending testing for sugar maple and yellow birch	

wood-welded or edge glued panels under constant or varying hygrometric conditions.	142
Table 5.1 Percentages of lignin and carbohydrate-related products released from reference wood (<i>Ref</i>) and welded material (<i>WM</i>) of sugar maple and yellow birch.	161
Table 5.2 Lignin-related pyrolysis products (%) from sugar maple and yellow birch reference wood (<i>Ref</i>) and welded material (<i>WM</i>).	163
Table 5.3 Carbohydrate-related pyrolysis products (in %) from reference wood (<i>Ref</i>) and welded material (<i>WM</i>).	166
Table 5.4 Sample surface analysis of reference wood (<i>Ref</i>) and welded material (<i>WM</i>) for sugar maple and yellow birch obtained by XPS: a) Atomic percentages and oxygen/carbon ratios (O/C); b) Distribution (Area %) of carbon components (C1s).	173
Table 5.5 Volatile organic compounds of yellow birch identified by Py-GC/MS.	175
Table 5.6 Volatile organic compounds of sugar maple identified by Py-GC/MS.	176
Table 5.7 Volume of non-condensable gases produced during wood-dowel welding determined by GC-TCD and GC-FID.	179

Liste des figures

Figure 1.1 Industries desservies pour les composants en bois (MRNFQ 2008).....	4
Figure 1.2 Représentation schématique de la section transversale d'un arbre (adapté de Hoadley 1990).....	6
Figure 1.3 Schéma de trois états de l'eau dans le bois: a) au-dessus du point de saturation des fibres (<i>PSF</i>); b) au <i>PSF</i> ; c) sous le <i>PSF</i> (Navi et Heger 2005).	8
Figure 1.4 Trois axes principaux du bois en fonction du fil du bois et des cernes annuels (adapté de Bodig et Jayne 1993).....	10
Figure 1.5 Schéma de la géométrie d'un assemblage goujonné collé avec les conditions aux frontières en traction simple dont la ligne d'action passe par l'axe du cylindre. <i>P</i> : forces colinéaires de valeur égale mais de signe contraire.	12
Figure 1.6 Énergie de fracture (<i>G_f</i>): déplacement relatif (δ) entre le goujon et la surface du trou dans le membre de bois en fonction de la force de cisaillement de l'interface (<i>f_v</i>). Γ : Facteur de rigidité (Jensen et al. 2001).....	14
Figure 1.7 Modes de rupture du bois en traction suite à une sollicitation axiale au fil du bois: a) éclatement; b) traction et cisaillement; c) cisaillement; d) traction fragile (Bodig et Jayne (1993).....	15
Figure 1.8 Profils de rupture en traction axiale au fil du bois: pour le bois final (a); pour le bois initial (b) (Bodig et Jayne (1993).	16
Figure 1.9 Modes de rupture en traction transversale perpendiculaire au fil du bois : a) traction dans le bois initial; b) cisaillement le long des cernes annuels; c) traction dans les rayons (Bodig et Jayne (1993).....	17
Figure 1.10 Schéma illustrant la composition de la paroi cellulaire d'une cellule (Pavi et Heger 2005).	19
Figure 1.11 Distribution (%) de la cellulose, de la ligne et des hémicelluloses à l'intérieur de la paroi cellulaire. M: lamelle moyenne; P: paroi primaire; S _i : couche 1, 2 ou 3 de la paroi secondaire (adapté de Panshin et de Zeeuw 1980).	20
Figure 1.12 Méthode de détermination de l'angle d'une microfibrille.....	22
Figure 1.13 Schéma d'une section longitudinale d'une fibrille : régions cristallines et amorphes (Navi et Heger 2005).....	22
Figure 1.14 Représentation de la structure moléculaire de la cellulose (Stevanovic et Perrin 2009).	24
Figure 1.15 Hémicelluloses du bois : pentoses, hexoses, acides uroniques et désoxyaldoses (Stevanovic et Perrin 2009).	25
Figure 1.16 Nomenclature chimique de la lignine.....	26
Figure 1.17 Principales voies de transformation thermo-chimique de la biomasse forestière en fonction de l'apport en oxygène.....	28
Figure 1.18 Proportion de goudron et de charbon produite lors de la pyrolyse de la cellulose en fonction de la température (adapté de Shafizadeh 1984).	32
Figure 1.19 Réaction de déshydratation et réarrangement de la cellulose suite à un traitement thermique (adapté de Arseneau 1971).	36
Figure 1.20 Schéma de la pyrolyse et combustion de la cellulose (adapté de Shafizadeh 1984).	37
Figure 1.21 Produits de déshydratation des monosaccharides par hydrolyse acide lors d'une transformation destructive de la cellulose (Stevanovic et Perrin 2009).	39

Figure 1.22 Exemple de réactions entre le furfural ou l'hydroxyméthylfurfural et les phénols (Stevanovic et Perrin 2009).....	40
Figure 1.23 Réactions de réticulations sur la lignine guaïacyl (adapté de Rousset et al. 2006).....	41
Figure 1.24 (a) Variation du module d'élasticité (E) en fonction de la température (T) pour un polymère amorphe. (b) Température de transition vitreuse (T_g) des constituants isolés en fonction de la teneur en eau (Navi et Heger 2005).....	42
Figure 1.25 Différentes formes de soudage par friction selon le type de mouvement frictionnel.....	44
Figure 1.26 Principe du soudage par friction linéaire: Force appliquée (F); déplacement de soudage (d_s); amplitude (a); surface de soudage (S); pression de soudage (P_s) = F/S ; force de friction (F_f) (Ganne-Chedeville 2008 tiré de Giese 1995).....	44
Figure 1.27 Image par tomodensitométrie (CT-scan) d'un assemblage composé de 2 baguettes et d'un goujon soudé. Rouge: zone de soudage fortement densifiée; Bleu: zone de référence correspondant à la densité du bois.....	45
Figure 1.28 Photos par rayon-X d'échantillons soudés par soudage linéaire. Les pixels plus foncés correspondent à des zones de faible densité et les pixels clairs des zones de haute densité. De haut en bas: Pin, chêne et hêtre) (Leban et al. 2005).....	47
Figure 1.29 Assemblages de type 2-blocs. Gauche : Assemblage ne traversant pas totalement le 2e élément. Droite : Assemblage traversant complètement les 2 éléments.....	48
Figure 1.30 Micrographie par rayon-X d'un goujon inséré dans deux pièces de hêtre (Ganne-Chedeville et al. 2005).....	48
Figure 1.31 Représentation schématique du type de force à laquelle le goujon est soumise en fonction de l'angle d'insertion dans le substrat; a: le goujon est sujet à du cisaillement pur et la force est perpendiculaire (90°) au goujon; b: le goujon est sujet à du cisaillement et de la tension et l'angle entre la surface et le goujon est inférieur à 90° et les surfaces du bois tendent à se séparer; c: le goujon est sujet à du cisaillement et de la compression et l'angle entre la surface et le goujon est inférieur à 90° et les surfaces du bois tendent à se rapprocher (Bocquet et al 2007).....	51
Figure 1.32 Assemblage soudé (gauche) et assemblage cloué (droite) en prévision d'essais en flexion (Bocquet et al. 2007).....	52
Figure 1.33 Assemblage goujonné-soudé à enture: à 45° par rapport à la surface du bois (a); à 90° par rapport à la surface du bois (b) (Segovia et Pizzi 2009).....	53
Figure 1.34 Poutre multicouche assemblée par soudage rotationnel (O'Loinsigh et al. 2012).....	56
Figure 2.1 Photomicrographies d'érable à sucre. De gauche à droite : plan de coupe RT, RL et LT (Grossissement de 40x) ©André Béliveau, Alain Cloutier et Université Laval. 63	63
Figure 2.2 Microscopie électronique à balayage pour le bouleau jaune. Plan de coupe (de haut en bas): RT, RL et LT (Grossissement de 40x).....	65
Figure 2.3 Banc d'essai et système pneumatique pour le soudage par friction rotationnelle.....	67
Figure 2.4: Porte-outil monté sur axe rotatif comprenant (de haut en bas) la mèche pour le perçage, le mandrin dans lequel le goujon est inséré pour le goujonnage et l'outil de nettoyage pour enlever l'excédent de goujon.....	68
Figure 2.5 Préparation des éprouvettes suite au soudage en prévision des essais en traction.....	69

Figure 2.6 Éprouvettes pour les essais préliminaires de traction.....	70
Figure 2.7 Montage pour les essais mécaniques préliminaires en traction linéaire.....	71
Figure 2.8 Éprouvette installée dans le montage pour les essais mécaniques préliminaires en traction linéaire.	71
Figure 2.9 Exemples de goujonage inadéquats: interface de soudage fortement carbonisée (goujon à l'extrême gauche); insertion incomplète en raison de paramètres de soudage inadéquats (2 ^e goujon en partant de la gauche).	72
Figure 2.10 Angle d'insertion des goujons par rapport aux cernes annuels du bois.	74
Figure 2.11 Montage pour les essais de détermination de la température à l'interface de soudage.	75
Figure 2.12 Schéma et dimensions d'assemblage soudé pour les essais en traction linéaire.	77
Figure 2.13 Schéma d'une insertion de type <i>zig zag</i>	77
Figure 2.14 Schéma illustrant le sens d'insertion des goujons (flèches bleues) dans les éprouvettes de type assemblage soudé: a) Insertion en alternance des goujons; b) Insertion unidirectionnelle des goujons.	78
Figure 2.15 Éprouvettes pour les essais en traction linéaire d'assemblages soudés.....	79
Figure 2.16 Montage pour les essais en traction linéaire d'assemblages soudés.	80
Figure 2.17 Assemblage soudé de bouleau jaune avec insertion unidirectionnelle des goujons suite à un essai en traction linéaire.....	81
Figure 2.18 Assemblage soudé de bouleau jaune avec insertion en alternance des goujons suite à un essai en traction linéaire.	82
Figure 2.19 Vue rapprochée d'une section d'assemblage soudé de bouleau jaune avec insertion unidirectionnelle des goujons suite à un essai en traction linéaire.	82
Figure 2.20 Arrachement de fibre sur un goujon suite à un essai en traction. Assemblage soudé d'érable à sucre avec insertion en alternance des goujons.	83
Figure 2.21 Déplacement d'un goujon soudé suite à un essai en traction sur une éprouvette d'érable à sucre.	83
Figure 2.22 Courbes typiques d'essai en traction linéaire d'assemblages soudés en fonction de l'essence et du sens d'insertion des goujons dans les éprouvettes lors du soudage. ES: érable à sucre; BJ: bouleau jaune; uni: insertion unidirectionnelle des goujons; alt: insertion en alternance des goujons.	84
Figure 2.23 Panneaux lamellés-soudés conçus à partir de la technique de soudage du bois par friction rotationnelle et agrandissement d'une vue de coupe d'un assemblage composé de deux baguettes soudées à l'aide d'un goujon.....	88
Figure 2.24 Étapes d'assemblage d'un panneau lamellé-soudé.	89
Figure 2.25 Insertion d'un panneau lamellé-collé dans une serre une fois l'application de l'adhésif effectuée.....	90
Figure 2.26 Serre de type araignée utilisée pour la préparation des panneaux lamellés-collés.	91
Figure 2.27 Pyrolyseur (photo du haut), chromatographe en phase gazeuse et spectromètre de masse (photo du bas) pour les analyses par Py-GC/MS.	100
Figure 2.28 Spectromètre AXIS-ULTRA (Kratos UK) pour l'analyse chimique XPS.....	102
Figure 2.29 Spectromètre Spectrum 400 (Perkin Elmer, Royaume-Uni) utilisé pour les analyses ATR-FTIR.....	105
Figure 2.30 Dispositif servant à capter les émissions volatiles produites lors du soudage.	107
Figure 2.31 Séquence de pré-perçage et chambre de captation des émissions volatiles.	108

Figure 2.32 Fin de la séquence de soudage et captation des émissions volatiles.	109
Figure 2.33 Chromatogramme des émissions volatiles pour le bouleau jaune lors du soudage par la méthode Py-GC/MS.....	110
Figure 2.34 Chromatogramme des émissions volatiles pour l'érable à sucre lors du soudage par la méthode Py-GC/MS.....	111
Figure 3.1 Tensile strength test setup.	120
Figure 3.2 Temperature measurement setup at the welded interface during rotational wood-dowel welding.....	121
Figure 4.1 Schematic view of a wood-welded panel.	133
Figure 4.2 Cross-cut wood dowel welded through two wood slats.	134
Figure 4.3 Schematic view and type of stress in a clear wood beam tested in three-point bending. P : load; σ : bending stress; L : span.	135
Figure 4.4 Schematic view and stress distribution in two wood slats held together by two wood-welded dowels ($D1$ and $D2$) tested in three-point bending. SI : substrate section between $D1$ and the panel's top surface (hatched); P : load; σ : bending stress; Z_i : distance between the central axis of an element and the neutral axis.....	137
Figure 4.5 Schematic view of two wood-welded dowels ($D1$ and $D2$) holding two wood slats together. Y_i : position along the Y axis on the section area in which the stress is calculated; SI : substrate section between $D1$ and the panel's top surface; A to E: Distance (mm) from surface (point A) of a specific point inside the wood-welded panel (A: 0; B: 6; C: 13.67; D: 16.33; E: 24).....	139
Figure 4.6 Three-point bending test.....	140
Figure 4.7 Relative humidity cycle used to force deformation of the wood-welded panels.	141
Figure 4.8 Failure of a wood-welded panel in the joints at the midspan or in the lamination next to it following bending tests.....	142
Figure 4.9 Fractured dowels with no slippage along the welded interface.....	143
Figure 4.10 Typical three-point bending test load-deformation curve for yellow birch wood-welded and edge-glued panels at equilibrium.	145
Figure 4.11 Edge separation along the length of a wood-welded panel after 24h at 20 °C and 20% RH.....	148
Figure 4.12 Separation of slats in between dowels after 72h at 20 °C and 20% RH.....	149
Figure 5.1 Wood-welded dowel and cross-cut section of wood substrate following tensile strength test. The wood reference (Ref) and welded material (WM) were used for the investigation on thermo-chemical modifications occurring at welded interface (a). Prepared samples from a wood-welded dowel for XPS and ATR-FTIR analysis (b).	156
Figure 5.2 Py-GC/MS chromatogram of a representative sugar maple reference wood sample.	160
Figure 5.3 Py-GC/MS Chromatogram of a representative sugar maple welded material sample.	160
Figure 5.4 Chemical mechanisms related to wood welding: a) Changes in lignin after side chain oxidation (adapted from Geib et al. 2008); b) Free radical thermal degradation pathways of β -O-4-bonded lignin structures (adapted from van der Hage et al. (1993); c) Depolymerisation (route 1) and condensation (route 2) reactions of lignin (Li et al. 2007); d) Formation of formaldehyde from lignin units (adapted from Schäfer et Roffael (2000)).	164

Figure 5.5 ATR-FTIR spectra for sugar maple and yellow birch before (<i>Ref</i>) and after (<i>WM</i>) wood welding: 1) Sugar maple <i>WM</i> ; 2) Sugar maple <i>Ref</i> ; 3) Yellow birch <i>WM</i> ; 4) Yellow birch <i>Ref</i>	168
Figure 5.6 ATR-FTIR transmission spectra for yellow birch before (<i>Ref</i>) and after (<i>WM</i>) wood welding.....	169
Figure 5.7 ATR-FTIR transmission spectra for sugar maple before (<i>Ref</i>) and after (<i>WM</i>) wood welding.....	170
Figure 5.8 XPS C1s of representative reference wood (top) and welded material sample (bottom) spectra for sugar maple.	172
Figure 5.9 Py-GC/MS chromatogram of yellow birch VOCs.	177

Introduction

La mondialisation et l'essor de l'Asie sont deux phénomènes ayant marqué l'économie mondiale au cours des trente dernières années. Les barrières au commerce ont été abaissées. Les accords de libre-échange se multiplient. Alors que l'économie de la planète se mondialise, son centre de gravité se déplace progressivement vers l'Asie. La contribution de l'Asie à la production mondiale a énormément progressé durant cette période et cela au détriment de l'Amérique du Nord et de l'Europe occidentale. Avec l'arrivée de la Chine et de l'Inde sur le circuit mondial, la main-d'œuvre planétaire s'est enrichie de 1,2 milliard de nouveaux travailleurs dont la majorité reçoit de très faibles salaires. En conséquence, un nombre important de nos travailleurs ont perdu leur emploi au profit de travailleurs asiatiques (Fortin 2011).

Le secteur canadien de la fabrication des produits du bois n'est pas en reste face à cette tendance. La concurrence mondiale et les besoins des consommateurs sont les principales forces motrices qui motivent les entreprises à rechercher une plus grande efficacité sur le plan de la fabrication et des coûts. Un sondage mené auprès de fabricants canadiens de produits du bois (armoires de cuisine, planchers de bois, boiseries, fenêtres, portes, produits de bois d'ingénierie, etc.) souligne que le développement de nouveaux produits est l'un des grands obstacles de l'industrie canadienne des produits du bois à valeur ajoutée (FPInnovations 2012). L'accroissement de la productivité, l'amélioration de la planification, le rythme de production et la qualité du produit suivent ensuite en importance. Cependant, la concurrence des pays étrangers n'est pas considérée comme un obstacle aux yeux de l'industrie. Renforcer les capacités de développement des produits par une meilleure conception, une meilleure finition et une meilleure qualité est un autre aspect soulevé par l'industrie pour demeurer compétitif. L'optimisation des procédés est également considérée comme étant un moyen pour demeurer en tête face à la concurrence.

L'assemblage de pièces de bois est un préalable à la confection de produits finaux dans le domaine de l'ameublement. Cet assemblage peut être réalisé soit par l'utilisation d'adhésif ou encore par le biais de connecteur métallique ou plastique. Les adhésifs synthétiques, couramment utilisés dans l'industrie, sont généralement issus de la pétrochimie et nécessitent des temps de polymérisation importants, allant de quelques minutes à plus de 24

heures. Ce temps d'attente constitue un goulot dans la production de meuble et limite l'atteinte de la production de lot unitaire. La présence de ces adhésifs et connecteurs, considérés comme une source de contamination tant dans des procédés de valorisation par la filière énergétique que dans les procédés existants de recyclage des produits du bois, limitent la recyclabilité du produit rendant sa gestion en fin de vie utile très difficile. L'utilisation de connecteurs limite notamment les phases de découpage et sablage subséquentes.

Des études ont démontré qu'il est possible de joindre mécaniquement deux pièces de bois ensemble sans l'utilisation d'adhésif ou d'un support mécanique. Le soudage du bois par friction rotationnelle consiste à joindre deux pièces de bois sans adhésif ou connecteurs. La technique consiste à introduire un goujon, soumis à une force rotationnelle, dans un trou pré-percé de diamètre inférieur. Durant l'insertion, la montée en température induite par friction entraîne la fusion du matériel polymère ligneux. Ceci provoque le détachement partiel de fibres de bois qui s'entrelacent dans la matrice en fusion. Lorsque l'insertion est complétée, la température à l'interface diminue et la matrice se solidifie produisant un joint très résistant. Le procédé permet d'éliminer complètement l'utilisation des colles synthétiques. En plus de produire des composants de meubles exclusivement à base de bois, le soudage du bois permet de réduire les coûts associés au collage, d'introduire une certaine flexibilité dans la production et de réduire les lots et le temps nécessaire à la polymérisation des colles.

Le présent projet vise à évaluer l'aptitude du soudage du bois par friction rotationnelle pour le panneautage et la conception de meuble à partir d'essences canadiennes. Grâce à un partenariat unique, un prototype conçu spécifiquement pour le projet par le Centre de recherche industrielle du Québec a permis d'étudier l'effet de divers paramètres sur la qualité du soudage pour l'érable à sucre (*Acer saccharum*) et le bouleau jaune (*Betula alleghaniensis*). Les paramètres optimaux pour chaque essence ont d'abord été déterminés par des essais en traction linéaire. Les propriétés mécaniques en flexion et la stabilité dimensionnelle de panneaux lamellés-soudés ont ensuite été étudiées puis comparées avec leur équivalent collé. Enfin, les modifications chimiques à l'interface de soudage et émanations volatiles émises lors du soudage ont fait l'objet d'analyse.

Chapitre 1 Revue de littérature

1.1 Portrait forestier québécois

Les forêts du Québec couvrent près de la moitié du territoire québécois. Elles représentent un peu moins de 761 100 km² sur une superficie totale de 1,7 million de km². Les Québécois sont collectivement propriétaires d'environ 92% du territoire, dont plus de la moitié est couvert de forêt à valeur commerciale (MRNFQ 2012a). Le territoire destiné à la production forestière au Québec couvre une superficie nette après réduction de 26 153 827 hectares. Le couvert feuillu y représente 12% contre 66% pour le couvert résineux alors que le couvert mélangé où se retrouve les deux types représente 22% (BFCQ 2010).

La forêt publique québécoise est en majorité située au sud du 52^e parallèle et s'étend sur une superficie de près de 390 000 km². Ce territoire couvre les 74 unités d'aménagement qui subdivisent la forêt publique et qui sont attribuées par contrats d'approvisionnement et d'aménagement forestier. On trouve une quarantaine d'essences commerciales sur ce territoire. Les quatre essences feuillues les plus abondantes sur le territoire, avec 85% du volume, sont les suivantes : le bouleau blanc (309 Mm³), le peuplier faux-tremble (198 Mm³), le bouleau jaune (134 Mm³), et l'érable à sucre (120 Mm³) (MRNFQ 2009).

Les approvisionnements en bois feuillus chez les fabricants québécois de composants en bois proviennent en majeure partie du Québec à plus de 87 %. Les essences indigènes feuillues les plus populaires sont dans l'ordre, le bouleau jaune (22,7%), l'érable à sucre (11,9%), le chêne rouge (9,5%) et le tremble (8,6%) (MRNFQ 2008). Les composants en bois servent à la fabrication de toute une variété de produits (Figure 1.1) Les industries des meubles de maison, des armoires, des escaliers et des portes et fenêtres constituent les secteurs les plus importants à ce chapitre.

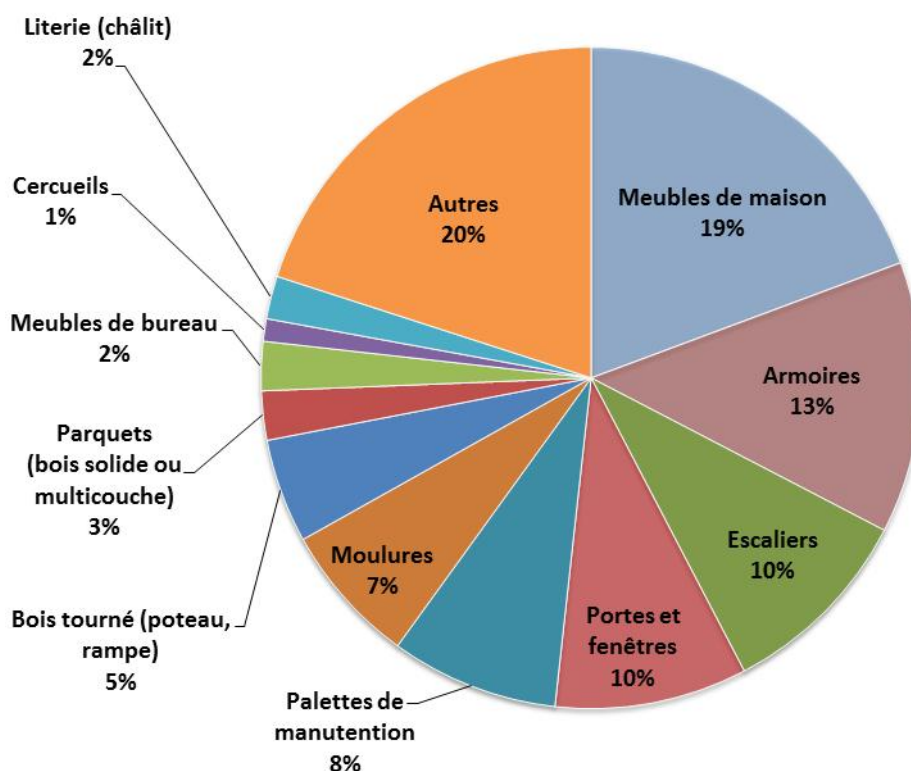


Figure 1.1 Industries desservies pour les composants en bois (MRNFQ 2008).

1.2 Matériau bois et ses propriétés

Le bois est une structure biologique complexe. Il peut se définir comme un composite de nombreux éléments chimiques et types de cellule œuvrant ensemble pour combler les besoins d'une plante vivante. Les propriétés physique, mécanique, chimique, biologique ou même technologique du bois sont fondamentalement liées au fait que la matière ligneuse se forme afin de satisfaire les besoins d'un arbre vivant (Hoadley 2000).

Les végétaux sont des piliers sur lesquels reposent plusieurs écosystèmes terrestres. La photosynthèse permet d'assurer la croissance et le maintien des végétaux par le métabolisme de la lumière du soleil, l'eau et le dioxyde de carbone en divers composés essentiels. Les végétaux croissent en produisant constamment des tissus embryonnaires appelés méristèmes. Les cellules du méristème sont indifférenciées. Certaines d'entre elles, les cellules initiales, se divisent afin de régénérer le méristème; les autres cellules, les

cellules dérivées, se spécialisent et s'incorporent aux tissus de la plante en croissance. Le mode de croissance d'une plante dépend de l'emplacement des méristèmes. Les méristèmes apicaux, situés à l'extrémité des racines et dans les bourgeons des pousses axillaires et de la tige, fournissent les cellules nécessaires à la croissance en longueur (croissance primaire). Il permet aux racines d'étendre leurs ramifications dans le sol et aux pousses d'accroître leur exposition à la lumière et au dioxyde de carbone. La croissance secondaire quant à elle se produit par l'élargissement progressif des racines et des pousses grâce aux méristèmes latéraux. L'accroissement annuel entraîne la formation de cerne annuel qui se compose de bois initial (bois de printemps) et de bois final (bois d'été) (Campbell 1995).

La coupe transversale d'un arbre permet de distinguer plusieurs couches, du centre vers l'extérieur (Figure 1.2). L'aubier et le duramen constituent le xylème secondaire. Le duramen ou cœur de l'arbre est plus vieux et n'assure plus le transport de la sève brute; les parois lignifiées de ses cellules mortes forment une colonne centrale qui soutient l'arbre. L'aubier se compose de cellules du xylème secondaire qui assurent encore le transport d'eau et de minéraux (sève brute). Puisque chaque nouvelle couche de xylème secondaire possède une circonférence plus grande, la croissance secondaire permet au xylème de transporter une plus grande quantité de sève brute chaque année afin de fournir aux feuilles plus nombreuses l'eau et les minéraux dont elles ont besoin. Le cambium libéroligneux quant à lui est situé près des cellules les plus jeunes du xylème secondaire qu'il engendre. Le cambium libéroligneux produit également le phloème secondaire, qui s'accumule vers l'extérieur. Les plus vieilles couches, situées à l'extérieur, s'étirent et se fendent sous l'effet d'expansion du xylème secondaire. Le périderme, la couche protectrice de la structure secondaire des végétaux, comprend le cambium subérophellodermique et ses dérivés, le phelloderme et le liège. Finalement l'écorce comprend les tissus situés à l'extérieur du cambium libéroligneux soit le phloème et le périderme (Campbell 1995).

Les propriétés physiques du bois sont ainsi très variables en raison de ses origines naturelles. La structure variable du bois est liée notamment au caractère héréditaire, à son origine biologique ainsi qu'aux conditions environnementales changeantes et cycliques associées au climat, au sol, à l'apport en eau et en nutriments présents (Bodig et Jayne 1993).

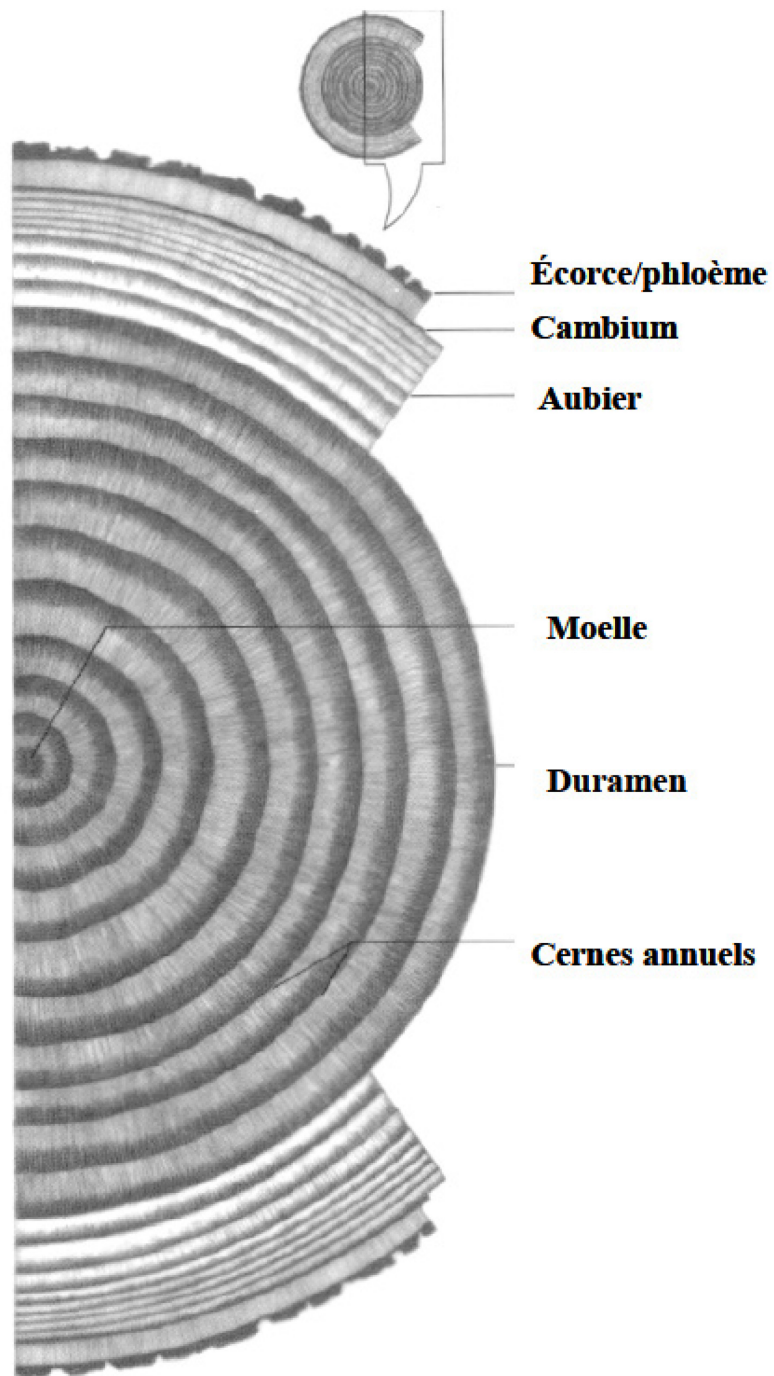


Figure 1.2 Représentation schématique de la section transversale d'un arbre (adapté de Hoadley 1990).

1.2.1 Relations entre l'eau et le bois

Le bois est un matériau hygroscopique qui acquiert ou libère de l'eau de l'environnement qui l'entoure. À ce chapitre, les échanges s'effectuent en fonction de l'humidité relative (*HR*) et la température de l'air ainsi que de la teneur en humidité (*TH*) du bois lui-même (USDA 2010). Les molécules d'eau sont adsorbées par les groupes hydroxyles (OH) de la cellulose et des hémicelluloses grâce aux ponts hydrogène. Les parties paracrystallines des microfibrilles de cellulose sont capables d'adsorber de l'eau en raison de leur structure plus irrégulière et possédant moins de ponts hydrogène.

La détermination de *TH* (%) s'effectue à l'aide de la formule suivante

$$TH = 100 \times \frac{M_h - M_0}{M_0} \quad [1]$$

où M_h : masse humide du bois (kg); M_0 : masse anhydre du bois séché à 103 °C jusqu'à masse constante (kg).

L'eau libre ou capillaire se trouve dans les micropores des parois cellulaires et dans les lumens (Figure 1.3). L'eau liée, quant à elle, est adsorbée par des sites de sorption ou groupes hydroxyles sur les macromolécules d'hémicelluloses, de cellulose amorphe et de lignine. Le point de saturation des fibres (*PSF*) correspond à *TH* où les cellules du bois sont saturées d'eau alors que le lumen des cellules n'en contient pas (~30%). L'eau liée est seule responsable du gonflement et du retrait du bois. Sous le *PSF*, il existe une relation quasi linéaire entre *TH* et la variation dimensionnelle du bois. L'eau dans le bois influence ses propriétés physiques, mécaniques, son usinage et sa mise en œuvre en plus d'agir comme un plastifiant. Le bois gonfle en cours d'adsorption et se rétracte en désorption (e.g. lors d'un séchage) sous le *PSF* pour tendre vers un état d'équilibre.

1.2.2 Masse volumique

La densité est un concept physique qui permet de comparer le poids de différentes substances à volume égal à ne pas confondre avec la masse volumique qui elle possède des unités (kg m⁻³). Pour un corps poreux et hygroscopique tel le bois, Jessome (2000) note trois définitions différentes de la masse volumique.

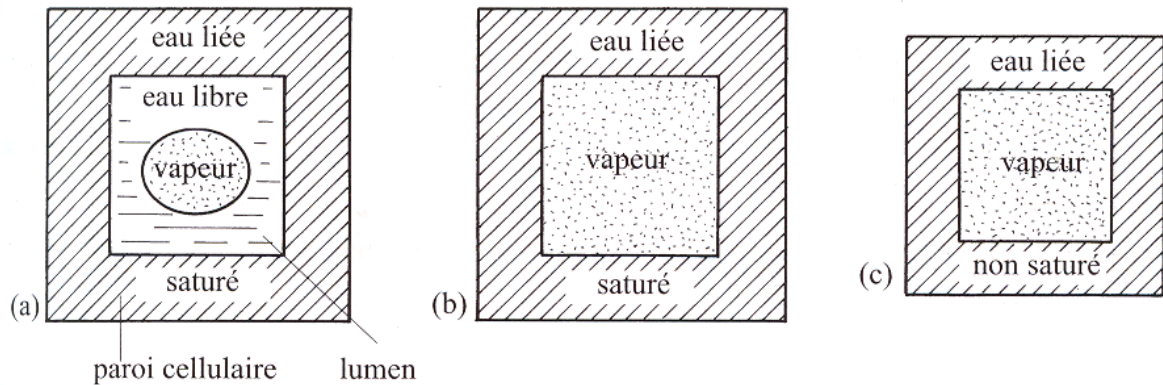


Figure 1.3 Schéma de trois états de l'eau dans le bois: a) au-dessus du point de saturation des fibres (*PSF*); b) au *PSF*; c) sous le *PSF* (Navi et Heger 2005).

La masse volumique anhydre (D_0) qui exprime le rapport de la masse au volume de l'échantillon à l'état anhydre

$$D_0 = \frac{M_0}{V_0} \quad [2]$$

où V_0 : Volume anhydre de l'échantillon.

La masse volumique pour *TH* donnée (D_h) qui correspond au rapport de la masse au volume de l'échantillon à *TH* donnée

$$D_h = \frac{M_h}{V_h} \quad [3]$$

où V_h : volume de l'échantillon pour *TH* donnée.

La masse volumique basale (D_b) qui donne le rapport de la masse de l'échantillon anhydre à son volume à l'état de saturation (V_s).

$$D_b = \frac{M_0}{V_s} \quad [4]$$

Pour l'érable à sucre et le bouleau jaune, D_b pour chacune des essences à l'étude correspond à 597 et 559 kg m^{-3} respectivement (Tableau 1.1).

Tableau 1.1 Différentes masses volumiques pour l'érable à sucre et le bouleau jaune (Jessome 2000).

Espèce	Masse volumique (kg m ⁻³)		
	Anhydre	À 12% <i>HR</i>	Basale
Bouleau jaune	649	670	559
Érable à sucre	702	740	597

HR: Humidité relative de l'air.

1.2.3 Considérations techniques mécaniques

La mécanique du bois peut se définir comme l'étude des relations entre les forces et les déformations appliquées au bois. Le bois est un matériau à fibres directionnelles avec des rayons ligneux perpendiculaires aux fibres. L'anatomie et le mode de croissance de l'arbre confère au bois une structure de matériau composite anisotrope (Goulet et Laforest 1974).

La plupart des espèces présentent une structure cellulaire anisotrope et hétérogène. Les origines biologiques du matériau bois font que ses propriétés diffèrent suivant les trois axes de symétrie (Figure 1.4). Les propriétés de la matière ligneuse sont associées à chacune de ces directions, soit les directions longitudinale (L), radiale (R) et tangentielle (T). Le comportement de ce matériau dépend donc de la direction selon laquelle on applique une charge. Il est donc nécessaire de connaître ses caractéristiques fonctionnelles et sa structure afin de prédire son comportement en service pour en faire une utilisation adéquate.

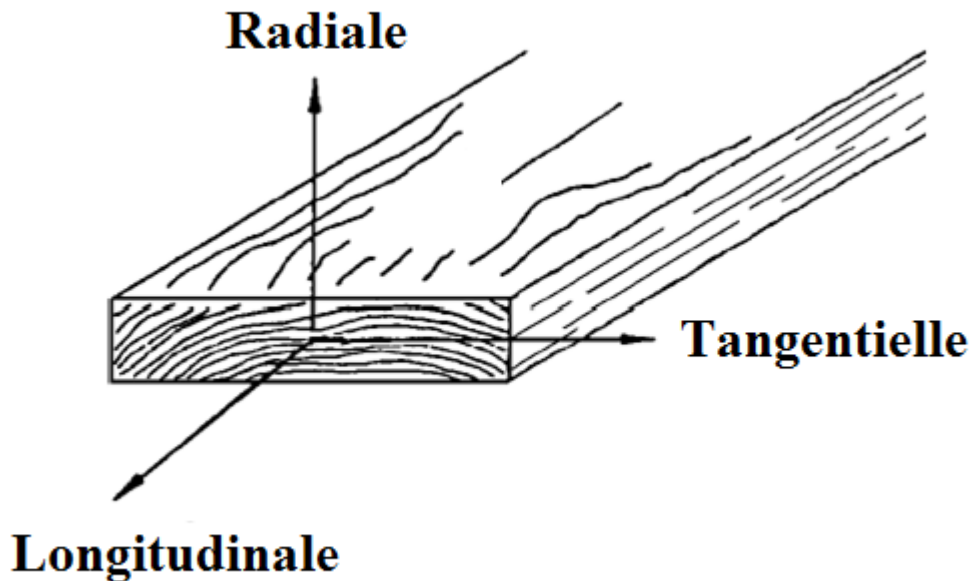


Figure 1.4 Trois axes principaux du bois en fonction du fil du bois et des cernes annuels (adapté de Bodig et Jayne 1993).

1.2.3.1 Contraintes et déformations

Lorsqu'un corps est soumis à l'action de forces extérieures (P), des contraintes (σ) s'établissent par réaction à l'intérieur de ce corps. Aux contraintes sont associées des déformations (ε), c'est-à-dire le rapport des allongements à la longueur initiale du corps. Si le comportement du corps se situe dans le domaine élastique, les relations existantes entre les contraintes et les déformations sont définies par la théorie de l'élasticité linéaire des milieux continus. Les deux principales hypothèses de cette théorie sont: i) les propriétés du corps sont homogènes et ne varient pas d'un point à l'autre; ii) elles sont les mêmes dans toutes les directions. Cette seconde hypothèse implique alors que le milieu soit isotrope. Les déformations sont entièrement réversibles dans le domaine élastique. Le corps retrouve ainsi sa forme initiale une fois les forces extérieures retirées. Un corps cylindrique (*e.g.* un goujon de bois) soumis à deux forces colinéaires de valeur égale mais de signe contraire et dont la ligne d'action passe par l'axe du cylindre est en traction simple. Sous l'effet d'une traction simple, le corps s'allonge dans le sens de la traction. Les trois comportements

possibles des matériaux en traction sont: i) comportement fragile alors que le matériau ne présente pas de domaine plastique et que la rupture se produit alors que les déformations sont purement élastiques; ii) comportement ductile alors qu'une déformation plastique permanente accompagnée généralement d'un durcissement du matériau suit la déformation élastique; iii) comportement élastique non linéaire alors que la déformation élastique réversible n'est pas proportionnelle à la charge qui la provoque. Un tel comportement est caractéristique de certains polymères thermoplastiques et des élastomères. Les propriétés du bois varient considérablement selon la direction considérée en raison de son caractère anisotrope. Le bois est un matériau composite constitué de deux composants: la matrice (lignine, hémicelluloses) et le matériau de renfort (cellulose). Selon la configuration du renfort où les microfibrilles de cellulose sont toutes orientées selon une même direction, le matériau bois est identifié comme un matériau composite unidirectionnel. Les fibres y sont courtes ou discontinues et alignées dans la matrice. Le matériau bois se déforme lorsque soumis à une contrainte. La matrice, moins rigide ou plus élastique comparativement à la fibre, se déforme élastiquement plus que celle-ci. Cela entraîne alors l'apparition de cisaillement dans les éléments de volume de la matrice. Dans ce cas spécifique, la déformation élastique du composite et celle de la matrice sont égales mais supérieures à la déformation élastique de la fibre (Baïlon et Dorlot 2000).

1.2.3.2 Mécanique de fracture élastique linéaire

Les propriétés de goujons collés lors d'un chargement axial ont été étudiées par Jensen et al. (2001). Les auteurs ont ainsi démontré que la force de cisaillement de la ligne d'adhésif est la propriété gouvernante pour un joint ductile alors que l'énergie à la fracture le serait pour un joint fragile.

L'approche de mécanique de fracture élastique linéaire assume que la rigidité de cisaillement de l'interface est infiniment grande ou égale à zéro. Pour un assemblage goujonné collé (Figure 1.5), une fissure peut se propager soit de $x = 0$ (vers la droite) ou encore de $x = l$ (vers la gauche). On assume la propagation de la fissure (dx) quand

$$\frac{dW}{dx} = \pi d G_f \quad [5]$$

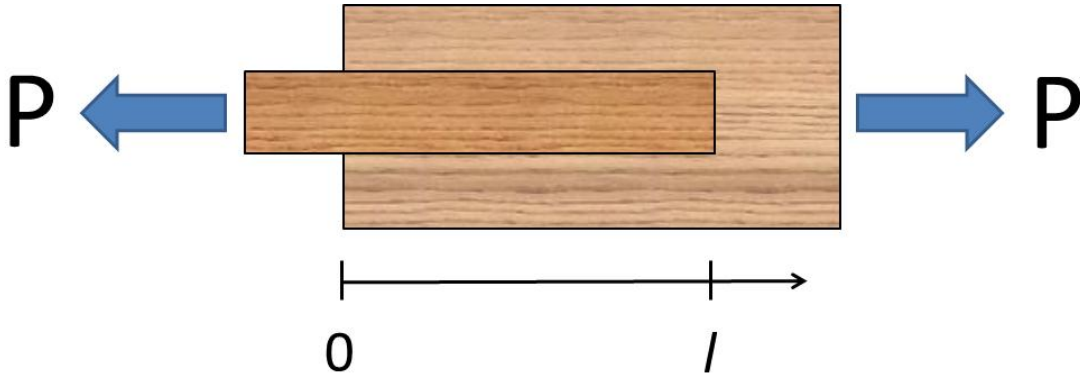


Figure 1.5 Schéma de la géométrie d'un assemblage goujonné collé avec les conditions aux frontières en traction simple dont la ligne d'action passe par l'axe du cylindre. P : forces colinéaires de valeur égale mais de signe contraire.

où W : énergie de tension du corps; d : diamètre du goujon; G_f : énergie de fracture de l'interface. On assume ici que le système est en état de traction pure et que la rigidité de cisaillement de la ligne d'adhésif est infiniment large. La propagation d'une fissure de $x = 0$ entraîne une augmentation de l'énergie de tension

$$dW = \frac{2P^2}{\pi d^2 E_d} \frac{\alpha}{1+\alpha} dx \quad [6]$$

alors que pour une fissure qui se propage plutôt de $x = l$ nous avons

$$dW = \frac{2P^2}{\pi d^2 E_d} \frac{\alpha}{\alpha(1+\alpha)} dx \quad [7]$$

où E_d : module d'élasticité (MOE) du goujon; α : ratio de rigidité axiale pièce de bois/goujon tel que

$$\alpha = \frac{E_w A_w}{E_d A_d} \quad [8]$$

où E_w : MOE de la pièce de bois; A_d : aire de la section transversale à l'axe de tension du goujon; A_w : aire de la section transversale à l'axe de tension de la pièce de bois. La profondeur d'insertion du goujon dans la pièce de bois et la force de cisaillement de la ligne

d'adhésif n'influencent pas le résultat car cette théorie n'assume aucun déplacement entre le goujon et la pièce de bois. La seule propriété impliquée ici étant G_f .

La limite plastique supérieure doit cependant être satisfaite ce qui introduit la profondeur d'insertion du goujon (l) et la force de cisaillement de l'interface (f_v).

$$P \leq \pi d l f_v \quad [9]$$

Une seconde approche considère plutôt la rigidité de cisaillement de l'interface. La relation constitutive de l'interface se définit comme la relation entre la contrainte de cisaillement et le déplacement relatif (δ) entre le goujon et la surface du trou dans le membre de bois.

Ainsi s'appliquent les relations élastiques linéaires suivantes pour le membre de bois (équation 10), pour le goujon (équation 11) et à l'interface (équation 12)

$$\sigma_w(x) = E_w \varepsilon_w(x) \quad [10]$$

$$\sigma_d(x) = E_d \varepsilon_d(x) \quad [11]$$

$$\tau(x) = \Gamma \delta(x) \quad [12]$$

où σ : contrainte normale; τ : contrainte de cisaillement; ε : déplacement normal; E : module d'élasticité; Γ : facteur de rigidité en cisaillement de l'interface. Les lettres w et d désignent respectivement le membre de bois et le goujon. Γ s'exprime alors selon

$$\Gamma = \frac{f_v^2}{2G_f} \quad [13]$$

La Figure 1.6 introduit l'énergie de fracture et la force de cisaillement au niveau de l'interface qui permet de déterminer Γ .

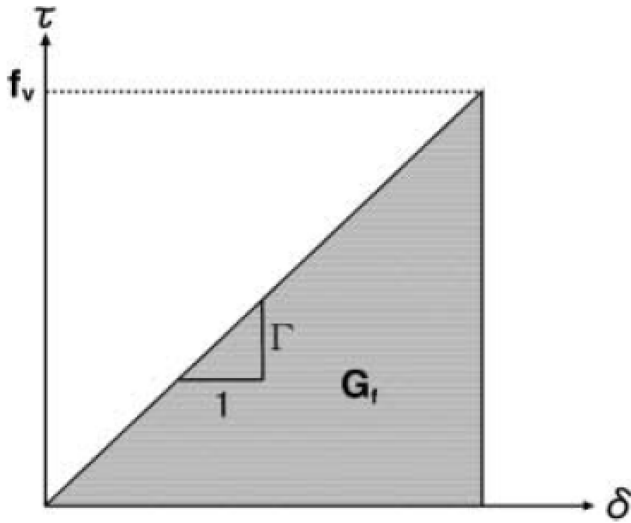


Figure 1.6 Énergie de fracture (G_f): déplacement relatif (δ) entre le goujon et la surface du trou dans le membre de bois en fonction de la force de cisaillement de l'interface (f_v). Γ : Facteur de rigidité (Jensen et al. 2001).

L'équation d'équilibre d'une section de goujon tient compte de σ_d et de τ à l'interface

$$-\frac{\pi d^2}{4} \sigma_d(x) - \pi d \tau(x) dx + \frac{\pi d^2}{4} \left(\sigma_d(x) + \frac{d\sigma_d(x)}{dx} dx \right) = 0 \quad [14]$$

Après simplification l'équation d'équilibre pour le goujon devient

$$\frac{d\sigma_d(x)}{dx} = \frac{4}{d} \tau(x) \quad [15]$$

Pour une section du substrat de bois, l'équation d'équilibre est

$$-A_w \sigma_w(x) + \pi d \tau(x) dx + A_w \left(\sigma_w(x) + \frac{d\sigma_w(x)}{dx} dx \right) = 0 \quad [16]$$

où σ_w : tension dans le substrat de bois. Après simplification cette relation devient

$$\frac{d\sigma_w(x)}{dx} = -\frac{\pi d}{A_w} \tau(x) \quad [17]$$

La contrainte de cisaillement maximale apparaît à la fin de l'interface. Pour $\alpha \leq 1$ ce maximum se retrouve à $x = 1$. Lorsque $\alpha \geq 1$ ce maximum sera plutôt à $x = 0$. Pour des goujons de bois nous pouvons assumer $\alpha > 1$. Les conditions de transfert de charge à l'interface matrice-renfort sont importantes car elles détermineront la valeur de cisaillement à l'interface. La relation entre la déformation causée par une force appliquée est influencée par l'orientation des axes de symétrie, le taux de chargement et l'ampleur de la déformation.

Les modes de rupture du bois en traction sous des sollicitations axiales au fil du bois se présentent sous 4 types: a) éclatement; b) traction et cisaillement; c) cisaillement; d) traction fragile (Figure 1.7).

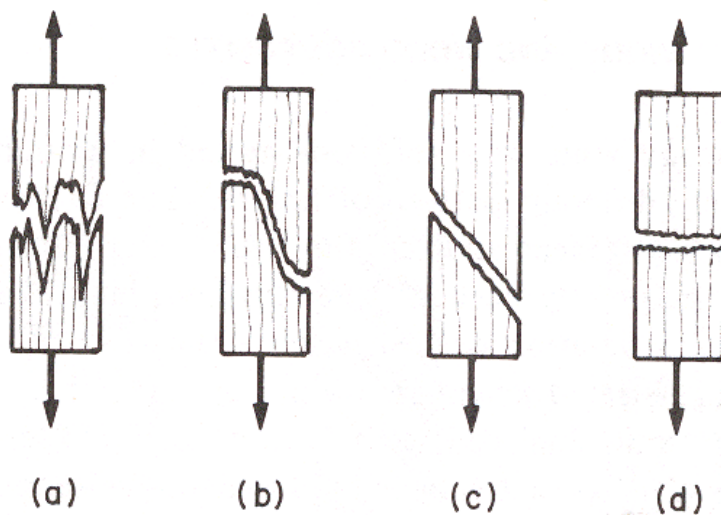


Figure 1.7 Modes de rupture du bois en traction suite à une sollicitation axiale au fil du bois: a) éclatement; b) traction et cisaillement; c) cisaillement; d) traction fragile (Bodig et Jayne (1993)).

Le bois initial et le bois final présentent des profils de rupture différents. Dans le bois final, un processus hybride de cisaillement et de rupture en tension entraîne généralement une séparation des tissus le long de la lamelle moyenne (Figure 1.8a). Pour le bois initial, la rupture sera plutôt fragile avec une séparation dans la paroi cellulaire (Figure 1.8b).

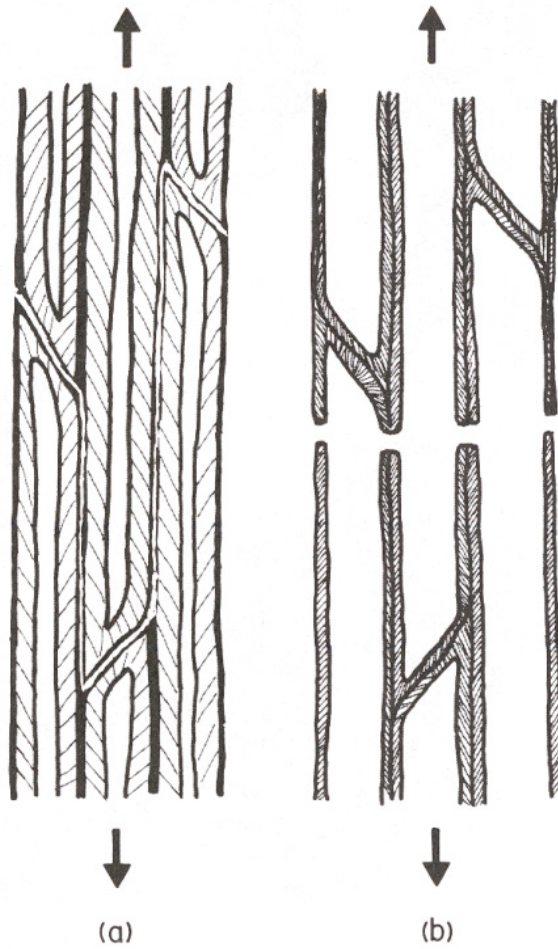


Figure 1.8 Profils de rupture en traction axiale au fil du bois: pour le bois final (a); pour le bois initial (b) (Bodig et Jayne (1993)).

Les modes de rupture en traction transversale ou perpendiculaire au fil du bois sont: a) traction dans le bois initial (Figure 1.9a); b) cisaillement le long des cernes annuels (Figure 1.9b); c) traction dans les rayons (Figure 1.9c).

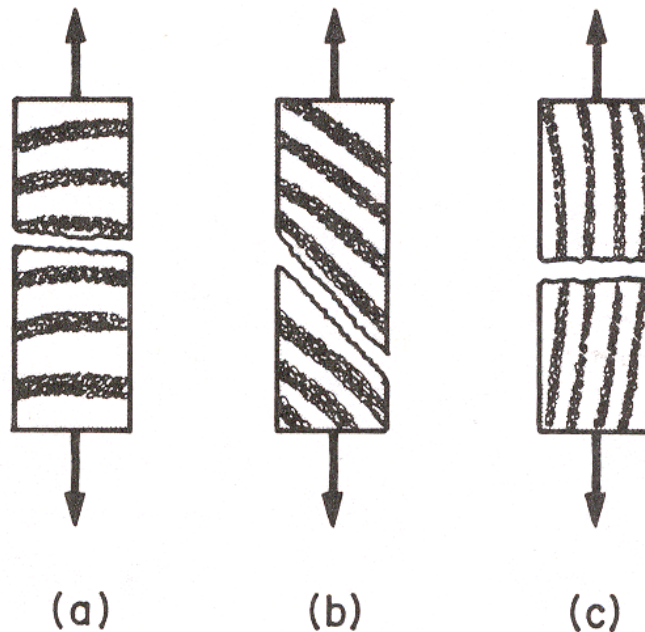


Figure 1.9 Modes de rupture en traction transversale perpendiculaire au fil du bois : a) traction dans le bois initial; b) cisaillement le long des cernes annuels; c) traction dans les rayons (Bodig et Jayne (1993)).

1.2.4 Propriétés thermiques

La chaleur spécifique, le coefficient de conduction de la chaleur et la diffusivité thermique sont trois propriétés thermiques importantes du matériau bois.

1.2.4.1 Chaleur spécifique

La chaleur spécifique (c) représente la quantité de chaleur nécessaire pour élever de 1 °C la température de l'unité de masse d'un corps et est obtenue grâce à l'équation suivante

$$c = \frac{Q}{m\Delta T} \quad [18]$$

où Q : quantité de chaleur requise (J); m : masse du bois (kg); ΔT : différence de température (°C). Pour du bois solide initialement à 27 °C et 12% TH, on observe une chaleur spécifique de l'ordre de 1,3 kJ kg⁻¹ °C⁻¹ ce qui est supérieur à celles des métaux et autres matériaux communs mais très bas comparativement à l'eau (4,18 kJ kg⁻¹ °C⁻¹) (USDA 2010).

1.2.4.2 Coefficient de conduction de la chaleur

De par la loi de Fourier, le coefficient de conductivité thermique (k_i , $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$) d'un matériau est une mesure de la quantité de chaleur que celui-ci laisse passer par unité de temps (s) sur une surface donnée (m^2) pour un gradient de température de $1 \text{ } ^\circ\text{C m}^{-1}$ entre ses deux faces. Ce coefficient augmente avec la densité, la teneur en humidité, et la température (Kollmann et Côté 1968). Pour TH inférieur à 40% et en direction transversale, k_t peut s'évaluer par l'équation suivante établie à $30 \text{ } ^\circ\text{C}$ (MacLean 1941 cité dans Kollmann et Côté 1968)

$$k_t = 0,14423[D_b(1,39 + 0,028TH) + 0,165] \quad [19]$$

où D_b : masse volumique apparente. L'effet de la température sur la conductivité est très faible et peut généralement être négligé (Kollmann et Côté 1968).

1.2.4.3 Diffusivité thermique

Le bois absorbe la chaleur très lentement en raison de sa faible conductivité thermique et de sa chaleur spécifique élevée. En conséquence, sa diffusivité thermique (α) ou encore le rapport entre la conductivité thermique et le produit de la masse volumique par la capacité thermique massique est faible par rapport à celles d'autres matériaux tels que la brique ou les métaux. Une valeur typique pour le bois est $1,6 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ comparativement à $1 \times 10^{-5} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ pour l'acier. Ceci explique que le bois n'est pas extrêmement chaud ou froid au toucher en comparaison à d'autres matériaux (USDA 2010).

1.3 Anatomie et composition chimique du bois

Les cellules du bois remplissent diverse fonctions telles que la conduction de la sève, le soutien mécanique, la résistance contre le vent et l'entreposage de substances nutritives. Chez les feuillus, la conduction est assurée par les vaisseaux alors que les fibres assument la fonction de soutien tout comme les trachéides dans une mesure moindre. L'entreposage des substances nutritives s'effectue dans le parenchyme radial et longitudinal. Chez les résineux, les trachéides assurent les fonctions de conduction et de soutien alors que les parenchymes veillent à la répartition et au stockage des substances nutritives.

Le développement cellulaire s'effectue en trois phases: l'élargissement, l'épaississement des parois cellulaires et enfin la lignification. La paroi cellulaire est organisée en un composite fibreux multicouche formant les parois cellulaires et la lamelle moyenne (Figure 1.10). La lamelle moyenne complexe se compose de l'ensemble des couches intercellulaire et primaire excluant la paroi secondaire (S_1 , S_2 et S_3) (Stevanovic et Perrin 2009).

La structure de la paroi cellulaire se compose essentiellement de microfibrilles de cellulose, de lignine et d'hémicelluloses. Les composants de la paroi cellulaire peuvent être classifiés soit glucide (polysaccharide) ou phénolique. Les polysaccharides qui représentent environ 75% du contenu de la paroi cellulaire sont des polymères linéaires plus ou moins ramifiés.

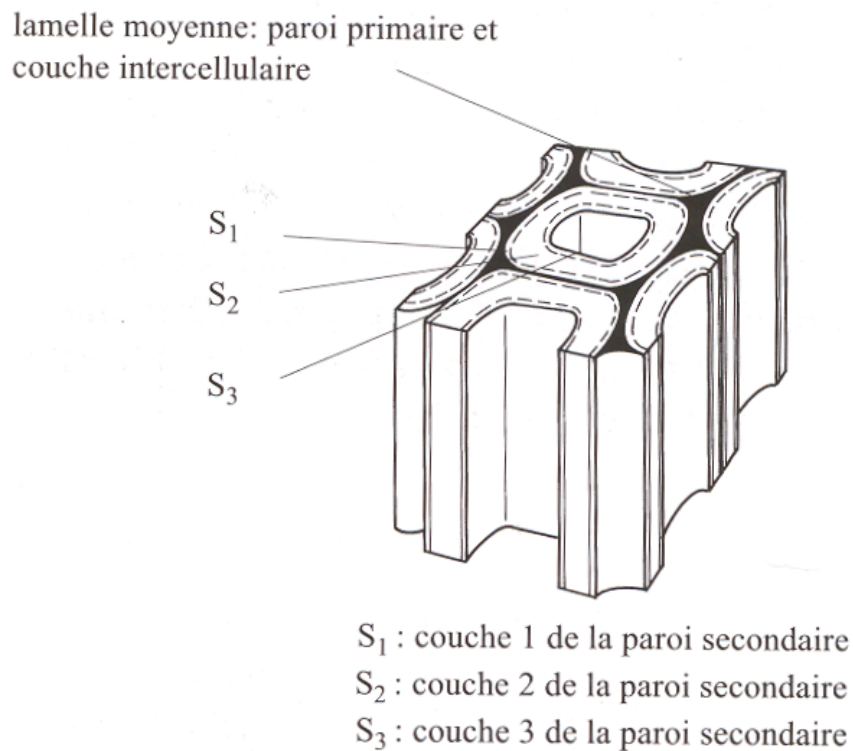


Figure 1.10 Schéma illustrant la composition de la paroi cellulaire d'une cellule (Pavi et Heger 2005).

Le matériel phénolique se retrouve essentiellement dans la lignine, un polymère tridimensionnel complexe. En Amérique du Nord, les feuillus contiennent plus de cellulose que les résineux (45% contre 42%), moins de lignine (20% contre 28%) et légèrement plus d'hémicellulose (30% contre 27%). Les feuillus sont riches en xylose et les résineux en mannose (Bodig et Jayne 1993, Stevanovic et Perrin 2009).

La paroi primaire est d'une épaisseur de l'ordre de 0,1 μm et contient une grande quantité de lignine mais très peu de cellulose tout comme la couche intercellulaire. En ce qui concerne la paroi secondaire, la couche S_2 est la partie la plus épaisse et contribue de manière prépondérante aux propriétés mécaniques et physiques de la paroi cellulaire. Les parois S_1 et S_3 présentent peu de différences (Figure 1.11).

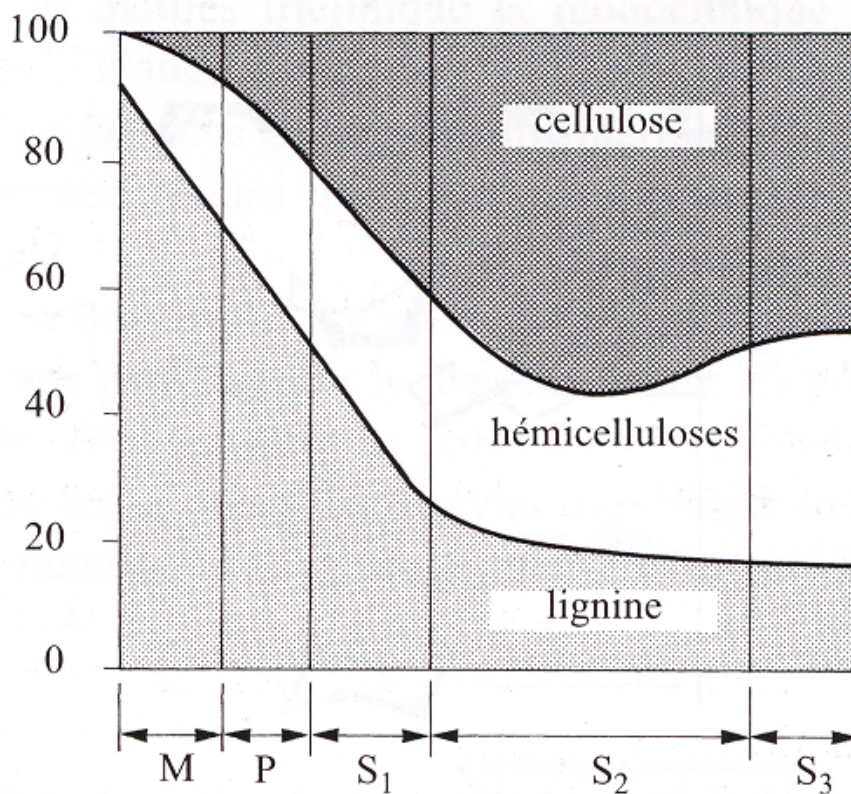


Figure 1.11 Distribution (%) de la cellulose, de la lignine et des hémicelluloses à l'intérieur de la paroi cellulaire. M: lamelle moyenne; P: paroi primaire; S_i: couche 1, 2 ou 3 de la paroi secondaire (adapté de Panshin et de Zeeuw 1980).

Les polymères naturels constituant le bois sont liées par des liaisons hydrogènes et covalentes. La liaison hydrogène, particulièrement importante pour les interactions intermoléculaires entre les hémicelluloses et la cellulose, est à l'origine de l'adéquation entre le comportement mécanique du bois et les conditions de température et d'humidité ambiantes. Les microfibrilles de cellulose, les chaînes de cellulose moins ordonnées et les hémicelluloses s'associent grâce aux ponts hydrogènes (Fengel et Wegener 2003). Les hémicelluloses sont fortement liées à la lignine grâce à des liaisons covalentes.

La microfibrille constitue la structure élémentaire de la paroi cellulaire. Elle se compose d'arrangements de 50 à 80 molécules de cellulose alignées parallèlement avec l'axe principal de la fibre libriforme chez les feuillus (trachéide chez les résineux) et liées par pont hydrogène et interactions de type van der Waals. Les régions denses sont dites *crystallines* alors que les autres constituent les *zones amorphes* (Bodig et Jayne 1993). L'angle des microfibrilles correspond à l'angle de la spirale par rapport à la direction axiale de la fibre (Figure 1.12). L'angle peut varier de la moelle à l'écorce, du bois initial vers le bois final et même dans l'épaisseur d'un cerne annuel. Pour la paroi S₂, l'angle microfibrillaire est compris entre 10° à 30° contre -80° à 80° pour S₁ et -70° à 70° pour S₃ chez le bois normal (Kollmann et Côté 1968).

La composition élémentaire du bois est approximativement de 50% de carbone, 6% d'hydrogène, 44% d'oxygène et un peu moins de 0.1% d'azote. Les cendres représentent en moyenne 0,2-0,3% et sont constituées notamment de silice, de carbonate de magnésium et de carbonate de calcium pour le bois normal de la zone tempérée (Bodig et Jayne 1993).

1.3.1 Cellulose

La cellulose (C₆H₁₀O₅)_n est la matière organique la plus abondante sur la planète et le principal composant de la paroi cellulaire. Elle se présente comme un polymère linéaire d'unités de glucose ayant un degré de polymérisation pouvant atteindre 15,000. Cet homopolysaccharide est constitué d'unités β-D-glucopyranose reliées par des liaisons glycosidiques β-(1→4). La cristallinité des microfibrilles de la cellulose est possible en raison du caractère linéaire de sa chaîne et de l'établissement de ponts hydrogènes entre les

groupes hydroxyles de ses macromolécules. Les régions cristallines sont interrompues par des régions non cristallines dites *amorphes* (Figure 1.13).

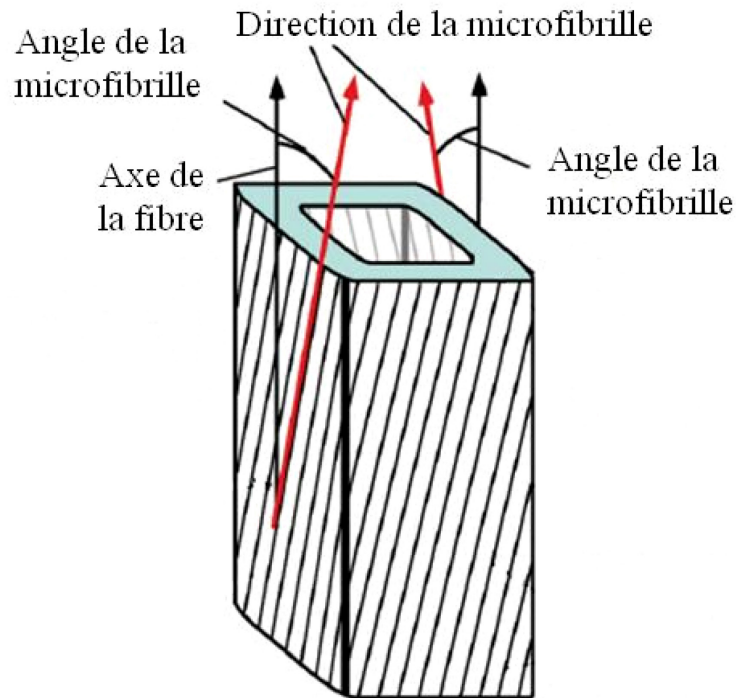


Figure 1.12 Méthode de détermination de l'angle d'une microfibrille.

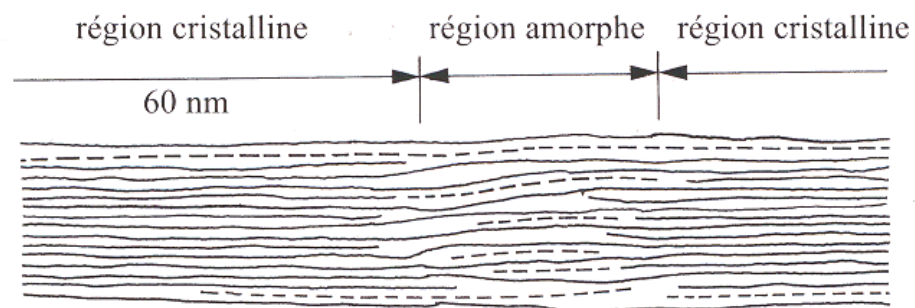


Figure 1.13 Schéma d'une section longitudinale d'une fibrille : régions cristallines et amorphes (Navi et Heger 2005).

La cellulose présente différents types de sites réactionnels: les liaisons osidiques, les hydroxyles de l'extrémité réductrice et les fonctions alcool dans les unités anhydroglucose (Figure 1.14). La structure moléculaire de la cellulose dispose d'une maille répétitive de cellobiose et deux extrémités différentes aux bouts: l'extrémité réductrice et son hydroxyle hémiacétal libre; l'extrémité non réductrice ne contenant pas d'hémiacétal. Une liaison osidique ou acétal est formée par réaction entre l'hydroxyle hémiacétal et l'hydroxyle alcoolique de deux monosaccharides pour former la chaîne macromoléculaire linéaire de cellulose. Celle-ci contient un grand nombre de groupements hydroxyle qui se répètent dans les résidus glucopyrannose constituant la molécule. On dénombre trois groupements hydroxyle par unité anhydroglucopyrannose ($C_6H_{10}O_5$) ou encore $C_6H_7O_2(OH)_3$.

La cellulose est insoluble dans l'eau en raison de l'interaction physico-chimique entre les hydroxyles des molécules de cellulose voisines associées par liaisons hydrogène. Ces liaisons intermoléculaires n'ont lieu qu'entre les chaînes d'un même plan constituant une série de couches successives à l'intérieur desquelles les chaînes cellulosiques sont liées par des ponts hydrogène. Il n'y a pas de liaison hydrogène entre ces feuilletts mais plutôt des liaisons van der Waals. Les unités monosaccharides préformées sont fournies aux parois cellulaires qui n'ont pas la capacité de les biosynthétiser. L'appareil de Golgi de même que le plasmalemmes sont les deux organelles assurant l'approvisionnement en oses constitutifs des polysides végétaux et les acheminent ensuite dans le protoplasme cellulaire. On différencie trois étapes lors de mise en place des microfibrilles de cellulose: la polymérisation et l'allongement des chaînes cellulosiques par formation de liaisons covalentes (osidiques); la fibrillogénèse, étape d'association des glucanes (celluloses), surtout par liaisons hydrogène, qui conduit à la formation des édifices géométriques cristallins; et la mise en place et l'orientation des nouvelles fibrilles selon des angles définis (Stevanovic et Perrin 2009).

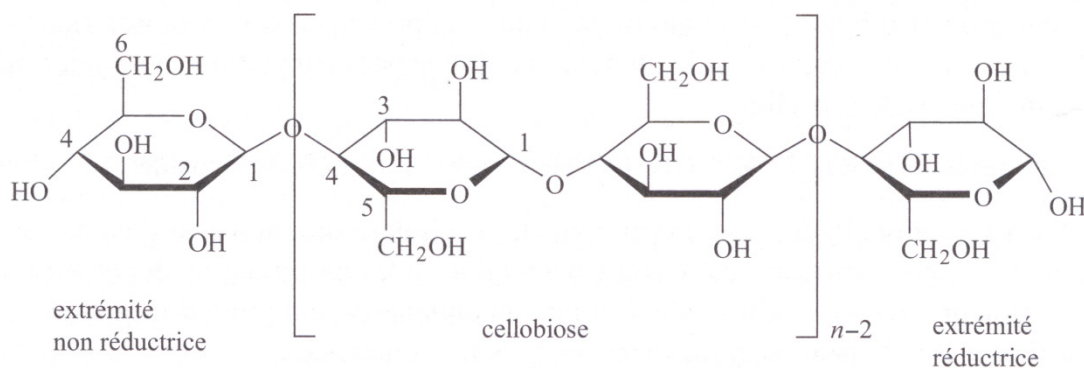


Figure 1.14 Représentation de la structure moléculaire de la cellulose (Stevanovic et Perrin 2009).

1.3.2 Hemicelluloses

Les hémicelluloses sont des polysides qui constituent, en association étroite avec la cellulose et la lignine, les parois cellulaires du bois. Les hémicelluloses se composent principalement de deux types de polymères: les xylanes et les mannanes. On dénombre deux catégories d'hémicelluloses suivant leur sucres constitutifs dominants : les hexosanes (hexose par hydrolyse); et les pentosanes (pentose par hydrolyse). Ces polysaccharides de masse molaire moindre que la cellulose se composent de glucides de nature variable: glucose, galactose, acide glucuronique, acide galacturonique, xylose et arabinose, mannose (Figure 1.15).

Il est possible d'obtenir l'holocellulose, un échantillon constitué de cellulose et des hémicelluloses, par délignification sélective. Les hémicelluloses sont ensuite isolées par extraction puis délignification. Un taux élevé de lignine, comme c'est le cas dans les bois de conifère, rend cependant difficile l'isolement d'hémicelluloses. Le bois de feuillus contient deux hémicelluloses importantes, les xylanes et les mannanes (ratio de 5 à 10 pour 1). L'hémicellulose dominante chez les feuillus est O-acétylglucuronoxylane. On observe deux différences principales entre les xylanes de bois de feuillus et ceux de conifères: les xylanes de résineux ne sont pas acétylés; la présence de résidus L-arabinofurannose dans le xylanes des conifères alors que ceux-ci sont absents chez les feuillus. La structure ramifiée

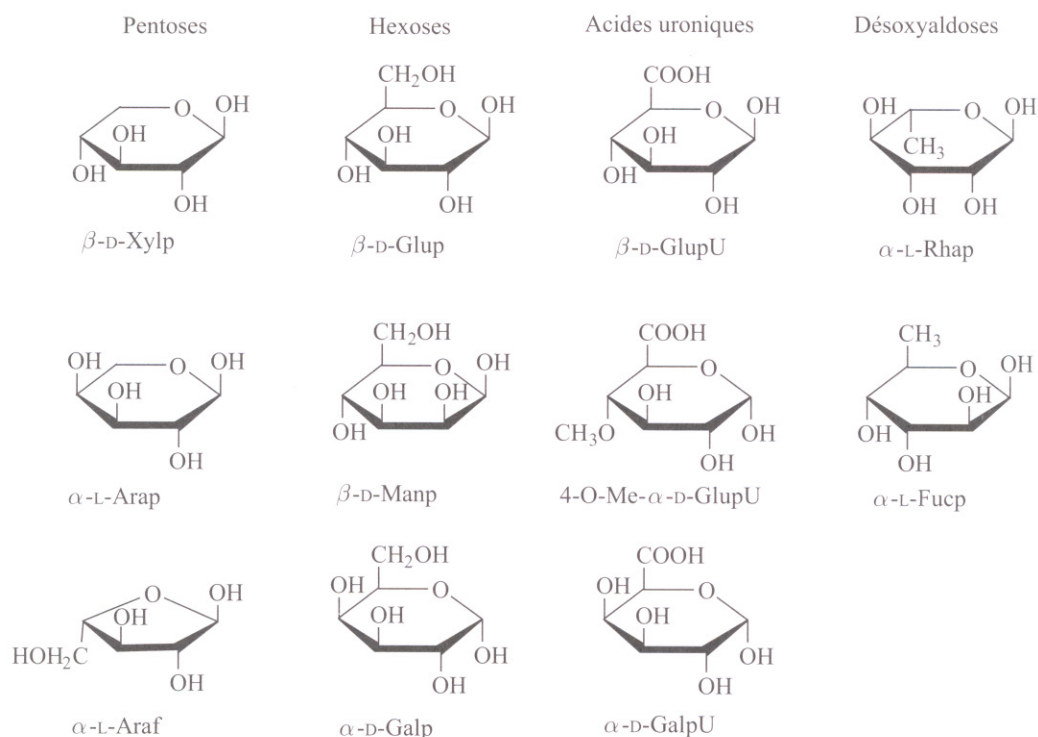


Figure 1.15 Hémicelluloses du bois : pentoses, hexoses, acides uroniques et désoxyaldoses (Stevanovic et Perrin 2009).

des hémicelluloses est responsable de la facilité de l'attaque par divers agents chimiques (notamment l'eau) (Stevanovic et Perrin 2009).

1.3.3 Lignine

La lignine est le constituant caractéristique des plantes vasculaires. D'un point de vue quantitatif, elle représente la deuxième substance macromoléculaire en importance dans le bois. Elle prend la forme d'une macromolécule amorphe, complexe, non linéaire et constituée d'un système aromatique et phénolique. La lignine est un polymère résistant qui, une fois inséré dans les parois cellulaires, assure l'imperméabilité et la rigidité des vaisseaux conducteurs de sève de par sa nature hydrophobe. Les tissus lignifiés assurent également une protection contre les attaques biologiques. La teneur en lignine varie entre 15% à 36% pour les plantes ligneuses et 20% à 30% pour le bois des forêts tempérées et boréales (Stevanovic et Perrin 2009).

Haut polymère constitué d'unités phénylpropane, on accorde respectivement à la lignine la lettre G, S ou H selon la participation majoritaire dans sa structure des unités guaiacyl, syringyl ou p-hydroxyphénylpropane, respectivement (Figure 1.16). Chez les résineux, les lignines sont dites G tandis qu'elles seraient plutôt S-G chez les feuillus.

1.3.4 Extractibles

Les extractibles ne font pas partie intégrante de la paroi cellulaire et sont facilement éliminés par des solvants organiques ou l'eau. Présents sous forme de graisses, de composés aromatiques, d'huiles volatiles, d'alcools et d'acides gras, les extractibles pigmentent le bois parfait et augmentent sa résistance contre les attaques d'insectes et la pourriture. Ces derniers ont peu d'effets directs sur les propriétés mécaniques du bois. Ils sont cependant responsables de l'augmentation de la densité basale et de la diminution de la teneur en humidité d'équilibre (Navi et Heger 2005). La composition chimique de l'érable à sucre et du bouleau jaune sont similaires à quelques différences près (Tableau 1.2).

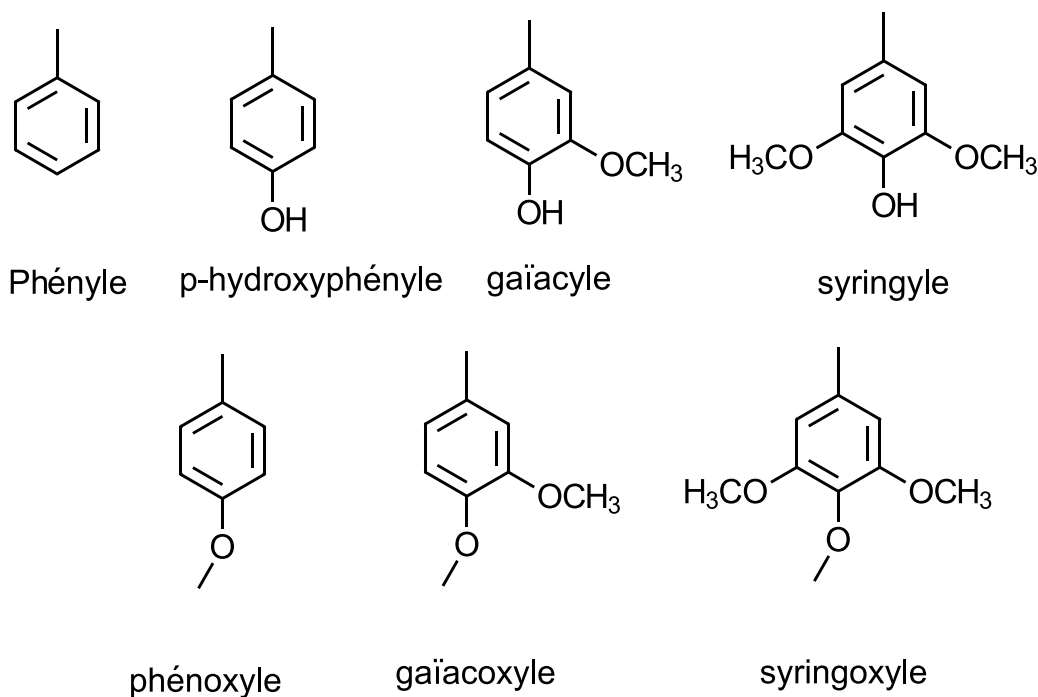


Figure 1.16 Nomenclature chimique de la lignine.

Tableau 1.2 Composition chimique (%) des espèces étudiées (Timell 1967)

	Cellulose	Lignine (insoluble en acide)	Composants des hémicelluloses			Cendre
			Acétyl- méthyl- glucoro- xylane	Gluco- mannane	Arabino- galactan xylo- glucane pectine	
Érable à sucre	40,2	23,1*	28,3	4,6	3,5	0,3
Bouleau jaune	43,5	23,8*	24,8	2,7	4,9	0,6

*Méthode Klason. Ces valeurs devraient être plus élevées car les feuillus contiennent de 2-6% de ligne soluble en milieu acide.

1.4 Comportement du matériau bois lors d'un traitement thermique

Le bois est un matériau sensible à la température. Ce paramètre peut interagir avec la teneur en eau et influencer le comportement mécanique du matériau bois. Les caractéristiques rhéologiques du bois sous l'action de la température et de l'humidité peuvent ainsi jouer un rôle essentiel sur le comportement de celui-ci. Le traitement thermique du bois est un sujet qui a été particulièrement étudié à travers le temps. À cet effet, Beall et Eickner (1970) ont effectué une revue de littérature complète sur la dégradation thermique des constituants du bois. Kollmann (1960) définit trois phases concernant les réactions exothermiques du bois: le point de flamme (*flame point*) entre 220 et 260 °C qui correspond au point auquel les gaz de décomposition s'enflamment en présence d'une source d'allumage; le point de combustion qui se situe entre 260 et 290 °C; et enfin le point d'allumage spontané (*flash point*) entre 330 et 470 °C.

1.4.1 Voies de transformation thermo-chimique

En absence totale d'oxygène, le traitement thermique du bois prend la forme d'une pyrolyse. Les produits alors générés sont le charbon de bois, du matériel pyroligneux ainsi que des gaz incondensables. En présence limitée d'oxygène, la gazéification entraîne une production de cendres et de gaz combustibles. Lorsque le traitement thermique est effectué

en présence suffisante ou en excès d'oxygène, le procédé, de combustion, entraîne la production de cendres et de gaz incombustibles (Figure 1.17).

Les principales réactions thermiques lors d'un traitement thermique du bois en présence suffisante d'oxygène sont (Rogaume 2009, Butterman et Castaldi 2009) sont:

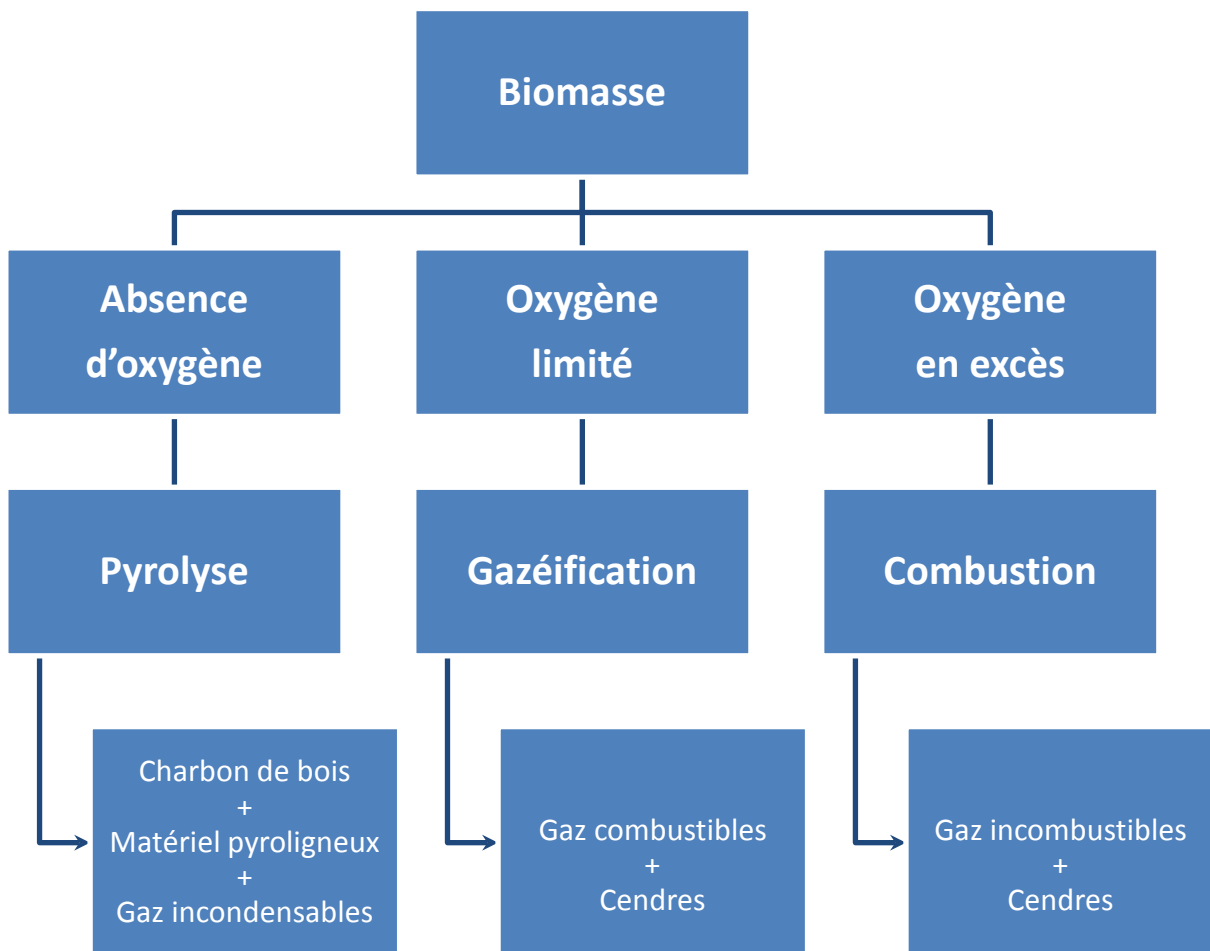
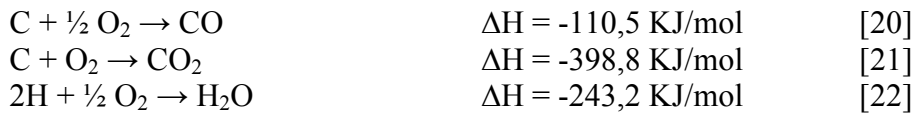
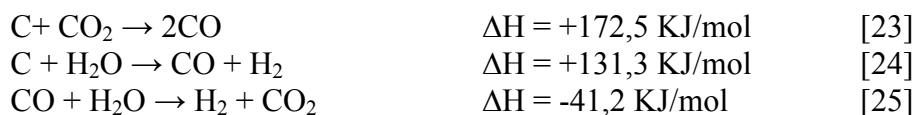
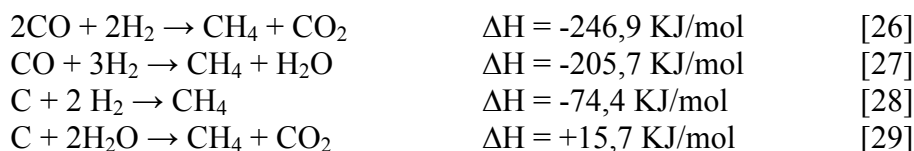


Figure 1.17 Principales voies de transformation thermochimique de la biomasse forestière en fonction de l'apport en oxygène.

À des températures de gazéification, soit entre 800 et 1200 °C, les réactions dominantes assurant le procédé de gazéification de la biomasse sont les réactions de Boudouard (équation 23), la réaction de gazéification de vapeur (équation 24) et les réactions impliquant la pyrolyse des produits lignocellulosiques qui libèrent CO, CO₂, et CH₄, la décomposition de minéraux qui libère de l'oxygène ainsi que l'oxydation du charbon de bois qui libère du CO et du CO₂.



La conversion de bois en CH₄ s'inspire de technologies développées pour le traitement du charbon. Pour la formation de CH₄, les réactions chimiques qui se produisent entre 300 et 450 °C prennent les formes suivantes



La réaction de gazéification du bois à haute température entraîne la formation d'une faible quantité de goudron, généralement non désirable et potentiellement dommageable pour l'environnement, qui se compose de composants hydrocarbures. Elliot et Baker (1986) ont observé une forte proportion de phénols et d'hydrocarbures aromatiques pour une gazéification du bois à 750 °C en absence de catalyseur (Tableau 1.3). La température de traitement influence également la proportion et le type de composés chimiques qui se retrouvent dans le goudron.

On dénombre quatre produits issus de la carbonisation du bois soit des gaz (CO, CO₂, H et CH₄) entre 200 et 450 °C avec des pointes à 350-400 °C, du charbon de bois ainsi qu'un condensé de goudron (*tar*) à 300-450 °C, et des produits pyroligneux principalement entre 250 et 300 °C (Amy 1961). Plus de 213 composés différents ont été également recensés lors de la distillation destructive du bois en incluant les réactions secondaires (Goos 1952).

Tableau 1.3 Composition en principaux composés organiques du goudron obtenus par une gazéification du bois à 750 et 900 °C (g kg⁻¹ de bois sec).

Composé	Formule	750 °C ¹	900 °C ²
Phénol	C ₆ H ₆ O	1.183	0.753
Crésol	C ₇ H ₈ O	1.155	1.079
Benzène	C ₆ H ₆	0.001	ND
Toluène	C ₇ H ₈	0.040	0.538
Xylène + Styrène	C ₈ H ₈	0.205	0.653
Méthylstyrène	C ₉ H ₁₀	0.135	ND
Indène	C ₉ H ₈	0.488	1.425
Naphthalène	C ₁₀ H ₈	0.868	1.722
Méthyl-naphthalènes	C ₁₀ H ₁₀	0.511	0.745
Acénaphthylène	C ₁₂ H ₈	0.301	ND
Acénaphtène	C ₁₂ H ₁₀	0.170	ND
Biphényl	C ₁₂ H ₁₀	0.071	ND
Fluorène	C ₁₃ H ₁₀	0.093	0.276
Phenanthrène	C ₁₄ H ₁₀	0.158	0.368
Benzofurane	C ₈ H ₆ O	0.108	ND
Dibenzofurane	C ₁₂ H ₈ O	0.014	ND
2,5-Xylénol	C ₈ H ₁₀ O	ND	0.137
3,4-Xylénol	C ₈ H ₁₀ O	ND	0.077
2,6-Xylénol	C ₈ H ₁₀ O	ND	0.174
o-Éthylphénol	C ₈ H ₁₀ O	ND	0.240
Anthracène	C ₁₄ H ₁₀	ND	0.107
Pyrène	C ₁₆ H ₁₀	ND	0.140

¹ Elliot et Baker (1986), ² Brage et al. (1996), ND : Non déterminé.

Certains traitements thermiques du bois sont reconnus comme étant des méthodes efficaces afin d'améliorer la stabilité dimensionnelle et la résistance à la moisissure du bois (Tiemann 1915, Hill 2006). Le bois modifié thermiquement, également connu sous le nom de bois torréfié, est un exemple de méthode visant à améliorer certaines propriétés du matériau bois (Bourgeois et Guyonnet 1989). Le procédé consiste à chauffer le bois entre 160 et 245 °C sous atmosphère contrôlée pauvre en oxygène. Au-delà de la limite maximale, une dégradation non appréciée du substrat est observée (Elder 1991). Hill (2006) note certains changements au niveau macroscopique tels qu'une réduction de l'hygroscopicité, une meilleure résistance aux attaques microbiologiques et une réduction de la résistance à l'impact, à l'abrasion, du module de rupture et de travail à la rupture en plus d'un noircissement du matériel. La durée, la température, et l'atmosphère de traitement de même que l'essence, l'utilisation d'un système sec ou humide, fermé ou ouvert, la dimension des échantillons et la présence d'un catalyseur sont quelques-unes des variables

importantes affectant ces changements. La dégradation des hémicelluloses, qui possèdent des propriétés hydrophiles, et la réticulation de la lignine, qui entraîne la formation de liaisons C-C chimiques entre les noyaux aromatiques, expliqueraient les changements de propriétés physiques et mécaniques du bois traité (Tremblay 2008).

1.4.1.1 Pyrolyse

La pyrolyse est un procédé de décomposition ou de transformation en absence d'oxygène d'un composé organique par la chaleur sans présence de flamme afin d'éviter l'oxydation et la combustion dans le but d'obtenir d'autres produits.

Browne (1958) s'est attardé au concept de décomposition chimique du bois lors de la pyrolyse qu'il divise en quatre zones: une première zone sous les 200 °C à l'intérieur de laquelle des gaz non combustibles, surtout de la vapeur d'eau, des traces de dioxyde de carbone (CO₂), d'acides formique et acétique, et du glyoxal sont produits. L'évaporation de l'eau liée est complète à ce stade; une seconde zone de 200 °C à 280 °C où les mêmes gaz présents dans la première zone sont produits en plus de monoxyde de carbone (CO) mais avec très peu de vapeur d'eau. La réaction à ce stade est endothermique; une troisième zone de 280 °C à 500 °C alors qu'on assiste à une pyrolyse active dans des conditions exothermiques conduisant à des réactions secondaires à l'intérieur des produits combustibles (CO, CH₄, etc.) et à la production de goudron; enfin une quatrième zone au-delà de 500 °C alors qu'on retrouve surtout du charbon qui procure des sites très réactifs pour des réactions secondaires additionnelles. La paroi cellulaire de la couche secondaire du bois final se fracture et le matériel incrusté dans les torus s'écoule à des températures correspondantes à la zone de transition entre la première et la seconde zone.

Pour une pyrolyse *flash*, qui se caractérise par un temps de traitement inférieur à 2 secondes à température modérée (400-500 °C), la production typique liquide-charbon-gaz représente 75%, 12% et 13% respectivement. Lors d'une carbonisation à basse température et un temps de traitement très long, ces proportions deviennent 30%, 35% et 35% respectivement. Finalement, pour une gazéification qui se caractérise par une température élevée et un temps de traitement long, ces proportions sont de 5%, 10%, et 85% (Bridgwater 2003).

La formation de charbon et de goudron lors de la pyrolyse de la cellulose était directement reliée à la température de traitement (Figure 1.18). La proportion de charbon produite est ainsi inversement proportionnelle à la température de traitement. La proportion de goudron produite, quant à elle, progresse jusqu'à atteindre un plateau vers 425 °C.

La pyrolyse des constituants du bois à température de gazéification (800 °C) a fait l'objet d'étude par Hosaya et al. (2007) (Tableau 1.4): la cellulose produit un faible pourcentage de charbon (10,0% sur une base sèche) et une forte proportion de goudron (72,0%); la lignine isolée et purifiée de bois moulue (MWL) produit beaucoup de charbon (40,6%) et moins de goudron (38,2%) que les autres constituants du bois; les hémicelluloses (xylane et glucomannane) montrent une tendance entre celles de la cellulose et de la lignine.

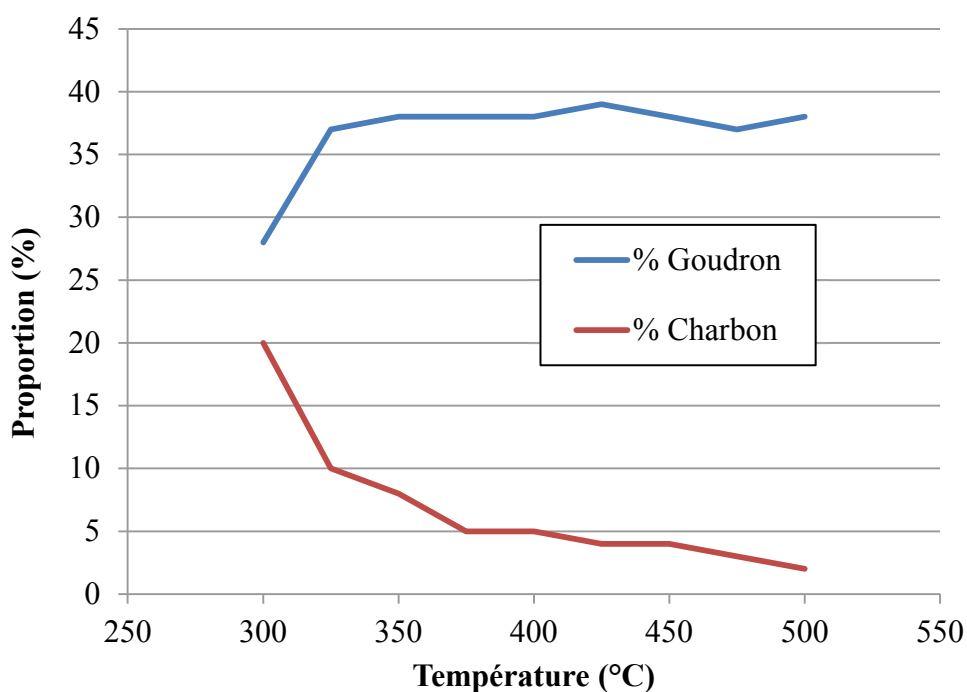


Figure 1.18 Proportion de goudron et de charbon produite lors de la pyrolyse de la cellulose en fonction de la température (adapté de Shafizadeh 1984).

Tableau 1.4 Composition du bois et des constituants de la paroi cellulaire (% sur une base sèche) après pyrolyse à température de gazéification (800 °C) (Hosaya et al. 2007).

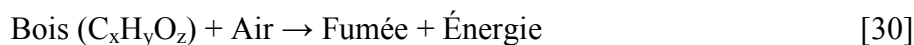
	Gaz	Goudron			Eau	Charbon
		total	i-PrOH soluble	H ₂ O soluble		
Bois	11,4	41,6	37,1	4,5	9,2	37,7
Cellulose	12,9	72,0	50,4	21,6	5,1	10,0
Glucomannane	13,0	41,3	32,2	9,0	15,3	30,4
Xylane	14,1	54,3	49,1	5,2	11,5	20,1
MWL	12,1	38,2	37,1	1,1	9,2	40,6

MWL: Lignine de bois moulue et purifiée; i-PrOH: isopropanol.

1.4.1.2 Combustion et gazéification

La combustion peut se définir comme une dégradation thermique d'un combustible en présence suffisante d'un comburant (*e.g.* l'oxygène). La combustion accompagne systématiquement la pyrolyse. Lors de la combustion du bois, les gaz libérés sont attaqués par l'oxygène pour former des gaz simples tels que le dioxyde de carbone (CO₂) et de la vapeur d'eau (H₂O) en plus de produire de l'énergie (phases secondaire et tertiaire). La proportion d'énergie produite est ainsi fonction de la proportion d'atomes C et H oxydés. En présence partielle d'oxygène, la dégradation thermique est plutôt associée à un phénomène de gazéification produisant des cendres et des gaz combustibles alors que l'ajout d'un gradient de pression (20-300 bars) lors de la dégradation thermique entraînera un phénomène de liquéfaction (Rogaume 2009).

L'air se compose essentiellement d'oxygène (21%) et d'azote (N₂, 79%). Pour le bois (C_xH_yO_z) qui se compose principalement de C (50%), O₂ (44%), H (6%) et de traces de N (Rogaume 2009), la formulation simplifiée de la combustion du bois prend la forme

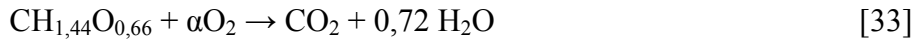


Pour $C_1H_yO_z$, avec 24 g de C les inconnus Y et Z peuvent être déterminés

$$0,06 \times 24 = 1,44 \text{ g} \rightarrow Y = (1,44 \text{ g})/1 (\text{g mol}^{-1}) = 1,44 \text{ mol} \quad [31]$$

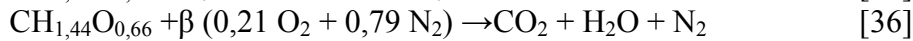
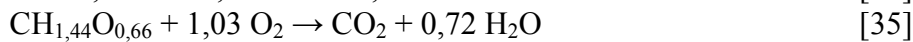
$$0,44 \times 24 = 10,56 \text{ g} \rightarrow Z = (10,56 \text{ g})/(16 \text{ g mol}^{-1}) = 0,66 \text{ mol} \quad [32]$$

En implémentant les équations 31 et 32 dans 30 nous obtenons



Tout comme la quantité d'air requise pour la combustion complète ou neutre

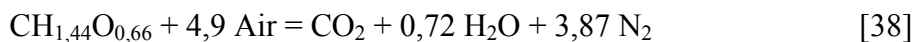
$$2\alpha + 0,66 = 2 + 0,72 \rightarrow \alpha = 1,03 \quad [34]$$



où β est équivalent à

$$\beta \times 0,21 = 1,03 \rightarrow \beta = 4,9 \quad [37]$$

En incluant l'équation 37 à l'équation 36 la formule de la combustion devient



Le bois ne contient ni soufre ni de chlore et peu d'azote. Ainsi, les émissions de dioxyde de soufre (SO_2), de chlorure d'hydrogène (HCl) et de dioxines-furannes sont particulièrement faibles et celles d'oxyde d'azote (NO_x) très faible (Rogaume 2009).

Le bois de feuillus affiche une perte de masse plus importante que le bois de résineux (Rusche 1973). La présence d'eau ou de vapeur d'eau accélère la formation d'acides organiques qui catalysent l'hydrolyse des hémicelluloses, et de la cellulose amorphe à un niveau moindre (Mitchell 1988). Selon Stamm (1956), une dégradation plus importante est observée : dans une atmosphère d'air (phénomène d'oxydation); dans un système fermé (accumulation d'acide favorisant l'hydrolyse); et enfin dans des conditions d'humidité relative élevée.

1.4.2 Réactions chimiques des constituants polymères du bois

Les constituants polymères du bois sont particulièrement sensibles au traitement thermique. Lors d'un traitement thermique, ces polymères tendent à se dégrader faisant ainsi varier les

propriétés mécaniques et hydriques du bois. La cellulose et la lignine se dégradent plus lentement et à des températures plus élevées que les hémicelluloses. Les extractibles, quant à eux, se dégradent rapidement et facilement durant le traitement thermique pour ensuite s'évaporer (on parle ici des extractibles volatiles, ce qui n'est pas le cas avec tous les extractibles). Les extractibles et les hémicelluloses se décomposent entre 150 et 200 °C avec un plafond de 280 °C pour les hémicelluloses (Kudo et Yoshida 1957).

Une décomposition des constituants du bois accompagnée d'une désorption des molécules d'eau se produit en chauffant le bois. Jusqu'à 140 °C, on assiste essentiellement à une perte en extractibles volatils et en eau libre. Au-delà de cette température, des bris cellulaires à la surface de la paroi cellulaire entraînent la formation d'acide formique, d'acide acétique dérivé des hémicelluloses, de méthanol et de CO₂. Le processus d'évaporation entraîne une diminution du contenu en OH. La formation de CO et CO₂ progresse à mesure que la température augmente (Bourgeois et Guyonnet 1988). À 270 °C, un changement significatif de la réaction cinétique occasionne une réaction exothermique (Stamm et al. 1946).

Certaines études notent une augmentation du degré de cristallinité, apparemment reliée à une réorientation moléculaire, durant la portion initiale d'un traitement thermique (Hirai et al. 1972, Nakao et al. 1983). Une exposition prolongée entraînerait quant à elle une décomposition thermique de la cellulose accompagnée d'une diminution de la cristallinité. Cependant, certaines études n'ayant observé aucune variation de la cristallinité suite à un traitement thermique (30-60 min, 300 °C) de la cellulose anhydre estiment que le phénomène serait plutôt hétérogène. L'effet de vapeur pourrait entre autre influencer ce phénomène (Bourgeois et Guyonnet 1988, Kim et al. 2001).

1.4.2.1 Cellulose

La décomposition ou dégradation de la cellulose débute entre 170-210 °C pour être complète à 400 °C. À 270 °C, la dégradation de la cellulose serait prédominante (Ramiah 1970, Navi et Heger 2005). La cellulose se dégrade à des températures plus élevées que les hémicelluloses. Une dégradation thermique mineure a lieu à basse température mais à un rythme plus lent que les hémicelluloses. Les régions amorphes, plus susceptibles à la dégradation thermique, auraient des propriétés thermiques similaires à ceux des hexoses chez les hémicelluloses. La cellulose cristalline, quant à elle, se dégrade entre 300-400 °C.

(Kim et al. 2001). Un chauffage prolongé entraîne une scission des chaînes de cellulose, produisant des oligosaccharides solubles en alkali, de même qu'une réduction de son degré de polymérisation et de cristallinité (Hill 2006).

Tanahashi et al (1989) ont démontré que les fibrilles peuvent fusionner entre elles pour former des fibrilles de plus grandes tailles suite à une explosion du bois à la vapeur. Une température élevée jumelée à de la pression de vapeur seraient à l'origine de l'augmentation du diamètre des cristallites et de la cristallinité de la cellulose. Une fois leurs liaisons avec la cellulose et la lignine rompues, les hémicelluloses hydrolysées deviennent quasiment solubles à l'eau. La mobilité de ces composants laisse donc la cellulose libre des autres constituants du bois donnant la possibilité aux fibrilles de fusionner entre elles.

Le mécanisme de décomposition de la cellulose a été étudié par Kilzer et Broido (1965) de même que Rowell et LeVan-Green (2005). Une dépolymérisation de la cellulose et d'une réduction de son poids moléculaire serait la cause d'une réaction de déshydratation entre 200-280 °C (Figure 1.19).

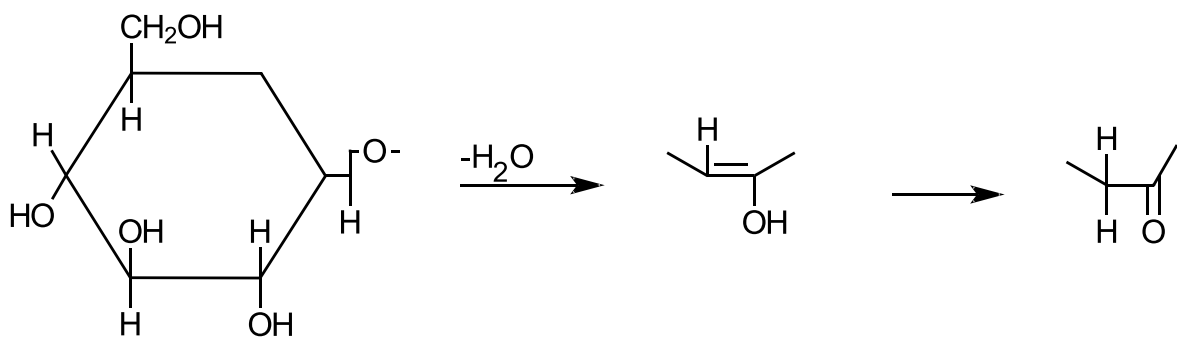


Figure 1.19 Réaction de déshydratation et réarrangement de la cellulose suite à un traitement thermique (adapté de Arseneau 1971).

Entre 280-340 °C, une dépolymérisation et une déshydratation entraînent la formation de composés volatiles tels que l'acétaldéhyde, l'éthylène aldéhyde (C_3H_4O), du méthanol, du diacétyle ($C_4H_6O_2$), et de l'acide acétique. Vers 300 °C, la molécule de cellulose, très flexible, entraîne une dépolymérisation (par trans-glycosylation) pour former des anhydromonosaccharides, notamment du levoglucosane. La décomposition sous forme de gaz (H_2O , CO et CO_2) et de résidus de charbon initie ensuite une réaction exothermique vers 320 °C. Un schéma simplifié de la pyrolyse et de la combustion pour la cellulose est présenté à la Figure 1.20.

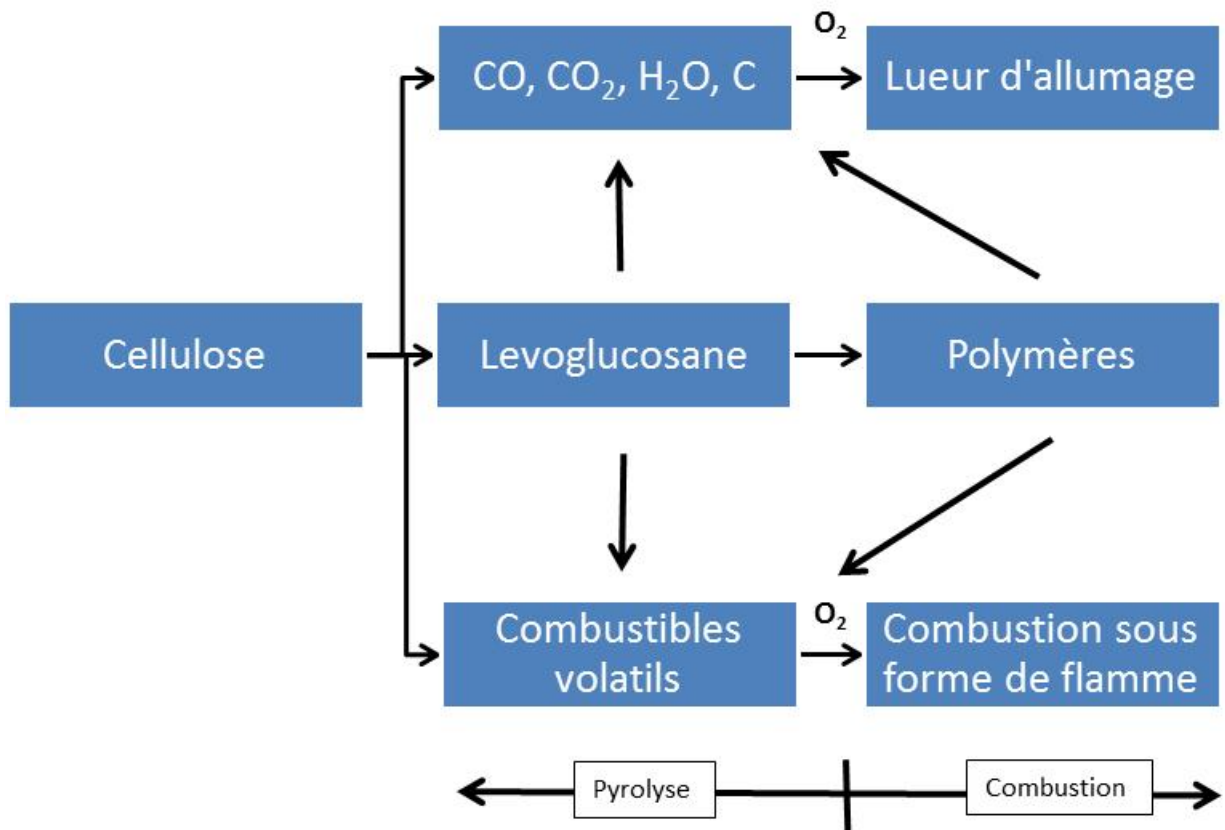


Figure 1.20 Schéma de la pyrolyse et combustion de la cellulose (adapté de Shafizadeh 1984).

Lors d'analyse DTA de la cellulose dans une atmosphère d'air, Sergeeva et Vaivads (1954) ont observé une réaction endothermique entre 95-100 °C résultant de l'évaporation du contenu en eau suivi d'un plateau entre 155-259 °C, lui-même résultant du réchauffement de la cellulose sans clivage des liens chimiques (Beall et Eickner 1970). Ces mêmes liens commencent à se rompre entre 259-389 °C résultant en une réaction exothermique. Un nouveau plateau est observé entre 452-500 °C suite à la formation de substances stables. Une réaction endothermique entre 500-524 °C vient enfin compléter la réaction.

1.4.2.2 Hémicelluloses

La température de décomposition des hémicelluloses se situe entre 120-260 °C (Hon et Shiraishi 2001). En raison de leur nature amorphe, les hémicelluloses sont les constituants du bois les moins stables thermiquement (Domensky et Rendos 1962). Ceux-ci se dégradent également de façon plus importante que les autres composants macromoléculaires (Shafizadeh et Chin 1977). Les pertes de matériel de type polysaccharide deviennent significatives à des températures supérieures à 180 °C. Les hémicelluloses, très hygroscopiques, se décomposent sous l'effet du chauffage en divers sucres. Ces mêmes sucres réagissent par la suite entre eux pour former un polymère insoluble dans l'eau. Les bois feuillus, ayant moins d'hémicelluloses, perdent peu de leur hygroscopie suite à un traitement thermique (Stamm 1964).

Lors d'un chauffage, le bois produit de l'acide acétique par hydrolyse des hémicelluloses acétylée. Cet acide sert ensuite de catalyseur pour l'hydrolyse des hémicelluloses en sucres solubles. Ceci permet de dépolymériser les microfibrilles de cellulose dans les zones amorphes et d'hydrolyser les liaisons entre unités de glucose. Suite au traitement, le bois contient moins d'hémicelluloses et de sites hydroxyles ce qui permet d'en améliorer la stabilité dimensionnelle (Navi et Heger 2005).

La structure ramifiée des hémicelluloses est responsable de la facilité de l'attaque par divers agents chimiques. Suite à la coupure hydrolytique des liaisons ester de groupements acétyle dans les xylanes (feuillus) ou les mannanes (résineux), l'acide acétique libéré augmente l'acidité du milieu ce qui favorise les transformations des sucres simples dont les produits sont le furfural pour les pentoses et l'hydroxyméthylfurfural pour les hexoses (Stevanovic et Perrin 2009).

Les transformations thermiques des hémicelluloses comprennent l'hydrolyse et la déshydratation acide des monosaccharides menant à la formation de furfural (à partir de pentose, voir Figure 1.21). La réaction entre ces aldéhydes et les entités phénol de la lignine sont les réactions de condensations auxquelles on attribue une amélioration de l'hygroscopicité du bois traité thermiquement et par conséquent une amélioration de sa stabilité dimensionnelle et de sa résistance aux champignons.

La réaction entre le furfural et les phénols (Figure 1.22) peut prendre place à la suite des traitements hydrothermiques du bois : une hydrolyse acide libère d'abord les sucres simples (pentoses et hexoses) qui sont déshydratés par la suite pour donner le furfural et l'hydroxyméthylfurfural qui réagissent avec les lignines pour former des structures réticulées plus hydrophobes.

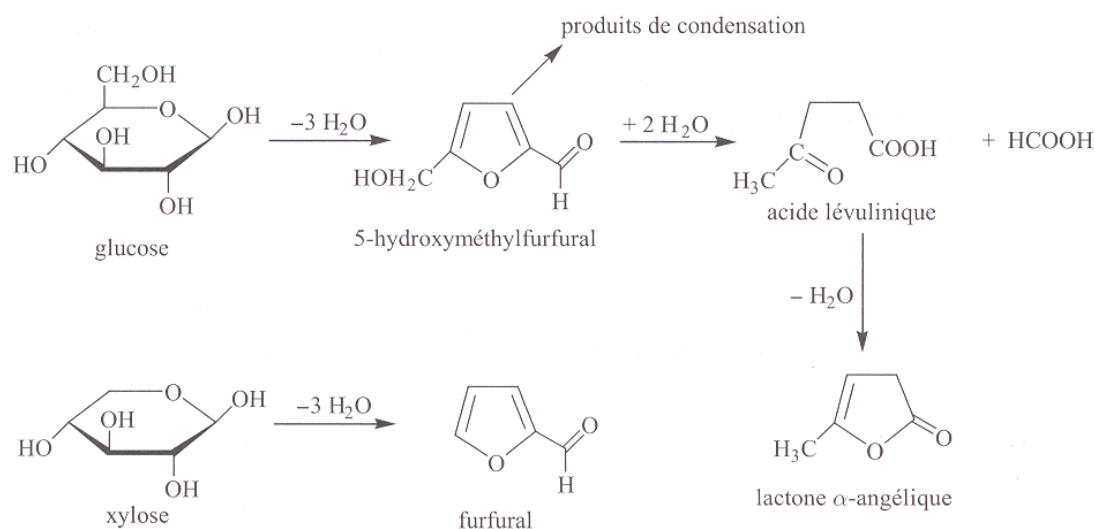


Figure 1.21 Produits de déshydratation des monosaccharides par hydrolyse acide lors d'une transformation destructive de la cellulose (Stevanovic et Perrin 2009).

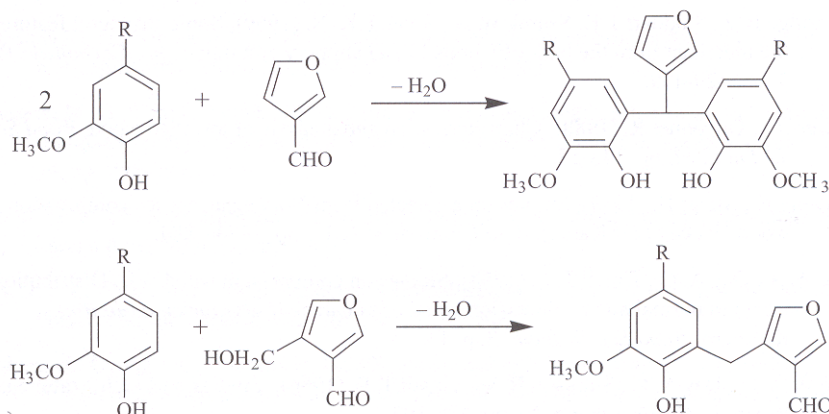


Figure 1.22 Exemple de réactions entre le furfural ou l'hydroxyméthylfurfural et les phénols (Stevanovic et Perrin 2009).

1.4.2.3 Lignine

La lignine est le composant le plus stable thermiquement bien qu'on observe une dégradation à température relativement basse, produisant des produits phénoliques variés (Sandermann et Augustin 1964). Résistante à la chaleur, sa masse commence à diminuer à partir de 200 °C. À cette température, les liaisons β -aryle éther sont progressivement scindées. À plus haute température, la concentration en méthoxy diminue et des unités non condensées sont transformées en unité diphénylémthane. La condensation de type diphénylémthane est la réaction la plus typique entre 120-220 °C (Funaoka et al 1990). Cette réaction s'applique sur les unités G. La perte de matériel de type polysaccharide entraîne une augmentation en contenu de lignine dans le bois.

Le réchauffement de la lignine se caractérise par une réaction endothermique entre 50-200 °C (Domensky et Rendos 1962), correspondant à un réarrangement moléculaire associé à un ramollissement de celle-ci et une réaction exothermique à 220 °C qui s'intensifie plus la température augmente. La lignine de type G se dégrade à partir de 165 °C alors que celle de type S est moins affectée à cette température. De nouveaux liens de réticulation se forment dans le réseau de la structure de la lignine de type G en réponse au traitement thermique (Figure 1.23) (Hill 2006, Rousset et al. 2006). Une décomposition significative se produit à partir de 280 °C avec un taux maximal de dégradation entre 350-450 °C lors d'une pyrolyse à 0,3 °C min⁻¹ (Kudo et Yoshida 1957).

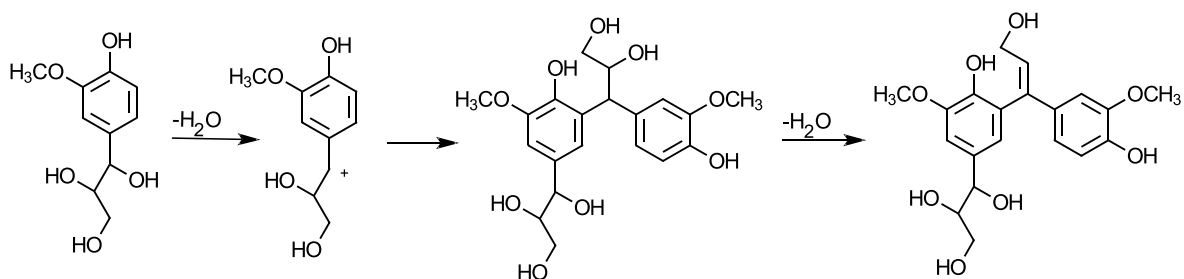


Figure 1.23 Réactions de réticulations sur la lignine guaiacyl (adapté de Rousset et al. 2006).

1.4.3 Température de transition vitreuse

La température de transition vitreuse (T_g) d'un polymère amorphe marque la frontière entre deux états fondamentaux: l'état vitreux, dur et cassant, et l'état caoutchouteux (Figure 1.24a). Le plateau vitreux d'un polymère amorphe est caractérisé par un module d'élasticité de 3000 à 4000 fois supérieur à celui du plateau dit caoutchouteux. Les taux d'élongation à la rupture sont compris entre 5 et 10% pour l'état vitreux et 500 à 1000% pour l'état caoutchouteux. Cette haute extensibilité s'explique par l'activation thermique qui diminue les cohésions inter et intra moléculaires. En condition anhydre, T_g est de l'ordre de 200-250 °C pour la cellulose, 150-220 °C pour les hémicelluloses et 140-210 °C pour la lignine et diffère selon que le composant est isolé ou natif. Pour des conditions d'humidité relative élevée, la lignine possède la T_g la plus élevée qui définit, entre autre, la température minimale de formage de bois (Figure 1.24b). Au même titre qu'un plastifiant, les molécules H₂O agissent en diminuant les interactions entre macromolécules au sein des polymères hydrophiles. La cellulose paracristalline et les hémicelluloses possèdent de nombreux groupes hydroxyles qui sont si hydrophiles que lorsqu'ils sont saturés en eau, T_g est alors inférieure à la température ambiante. La lignine contient moins de groupes hydroxyles. Ainsi, l'eau n'a pas autant d'impact sur T_g de la lignine qui se situe à environ 85 °C en conditions dites saturantes. La structure stable de la cellulose cristalline fait donc en sorte que l'eau est incapable de pénétrer son réseau cristallin grâce aux nombreux ponts hydrogène (de haute énergie) présents (Navi et Heger 2005).

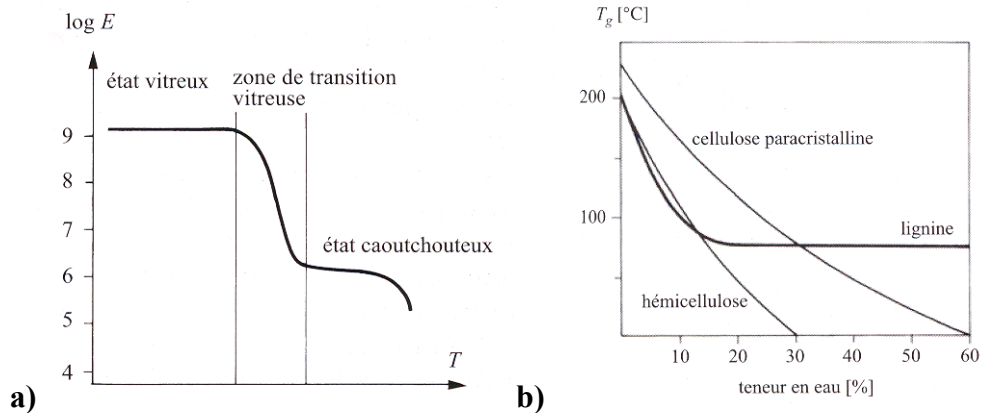


Figure 1.24 (a) Variation du module d'élasticité (E) en fonction de la température (T) pour un polymère amorphe. (b) Température de transition vitreuse (T_g) des constituants isolés en fonction de la teneur en eau (Navi et Heger 2005).

La pyrolyse casse les chaînes d'hémicelluloses et modifie la lignine à partir de 280 °C. Les sous-produits de l'hémicellulose ainsi formés par la pyrolyse se condensent et polymérisent sur les chaînes de lignine. Ces réactions forment alors une nouvelle pseudo-lignine plus hydrophobe et plus rigide que la lignine d'origine. Le nombre de groupes contenant des atomes d'oxygène (surtout des groupes hydroxydes) baisse au profit de double liaison C=C. La cristallinité de la cellulose demeure inchangée à ce stade-ci. Le degré de polymérisation de la cellulose et des hémicelluloses baisse alors que l'eau est éliminée à 300 °C. Des radicaux libres carbonyles, carboxyles et des groupes hydroperoxydes, du CO, du CO₂ et du charbon de bois sont également générés (Navi et Heger 2005).

1.5 Le soudage du bois

Le soudage du bois par friction ou frottement est un procédé qui permet d'assembler deux pièces de bois ensemble sans utilisation d'adhésif ou autres connecteurs. Cette technique tire directement parti du comportement thermo-hydomécanique et chimique du bois (Navi et Heger 2005). Les premières études menées sur le soudage du bois sous l'action combinées de la pression et du frottement induit par des mouvements frictionnels ont été effectuées en Allemagne par Sutthoff et al. (1996). Les mécanismes physico-chimiques intervenant aux niveaux cellulaire et moléculaires ont fait l'objet d'études depuis (Glioniorz et al. 2001; Stamm 2006). Grâce à l'effet de Coulomb, la température à l'interface entre

deux pièces de bois augmente ce qui entraîne la fusion du matériel polymère ligneux après seulement quelques secondes de frottement (Stamm 2006). Le phénomène se veut essentiellement la fusion et l'écoulement de matériel cellulaire présent dans la structure du bois, principalement la lignine et des hémicelluloses, jumelé à un phénomène de réticulation radicalaire (Wieland et al 2005). Ceci entraîne à l'interface des deux pièces le détachement partiel ou complet de cellules et de fibres de bois pour former un réseau d'enchevêtrements de fibres à l'intérieur d'une matrice en fusion qui se solidifie une fois le soudage terminé. Durant la période de soudage, l'excès des fibres qui se sont détachées sont expulsées hors de l'interface (Gfeller et al. 2003). L'arrêt du frottement et le refroidissement du bois conduit enfin à la solidification de la couche à l'interface pour former une connexion continue.

Deux techniques sont principalement utilisées afin de produire une soudure entre deux pièces du bois: le soudage linéaire qui est obtenu par mouvement vibrationnel entre deux pièces de bois solides; le soudage rotationnel qui s'effectue par insertion d'un goujon auquel on induit un mouvement rotatif (Figure 1.25). Bien que ces deux méthodes s'appuient sur les mêmes concepts, elles sont cependant différentes sur plusieurs aspects. À titre d'exemple, contrairement au soudage linéaire alors qu'une orientation parallèle du fil du bois par rapport à la surface de soudage offre de meilleurs résultats (Properzi et al. 2005), un fil du bois du goujon perpendiculaire à celui du substrat procure une qualité optimale pour le soudage rotationnel (Kanazawa et al. 2005). Dans la présente étude, seul le soudage rotationnel sera à l'étude. Le soudage orbital ou circulaire, version hybride des méthodes linéaire et rotationnelle, existe également mais procure toutefois des joints de moins grande qualité (Pizzi 2006).

1.5.1 Soudage linéaire

La technique consiste à appliquer deux échantillons de bois l'un contre l'autre avec une force appliquée (F) (Figure 1.26). Cette zone de contact entre les deux échantillons deviendra éventuellement la surface de soudage (S) suite à un mouvement linéaire (F_f) qui produit une friction à l'interface (F_r). Le déplacement des échantillons, généralement de 3 mm ou moins, s'effectue à une fréquence de vibration de l'ordre de 100 Hz dans le plan du joint. La vibration est arrêtée après quelques secondes (t_s). Une fois le soudage complété, la

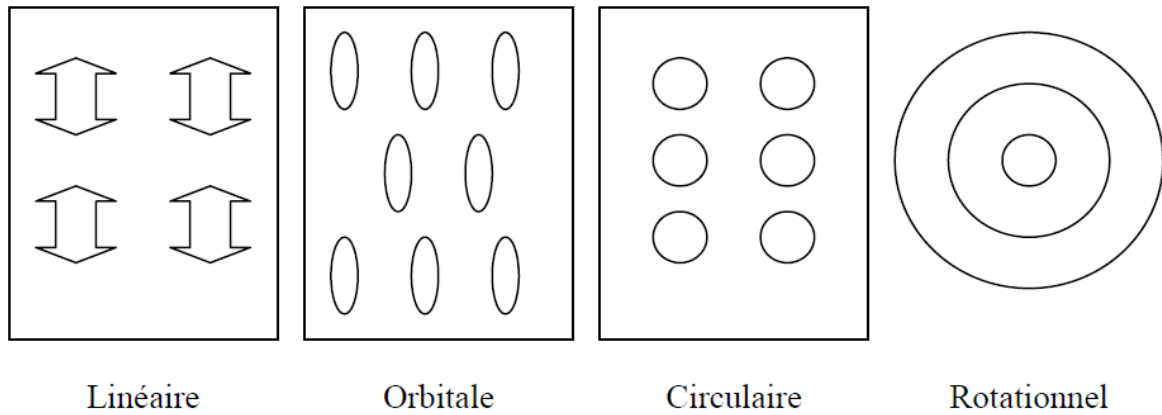


Figure 1.25 Différentes formes de soudage par friction selon le type de mouvement frictionnel.

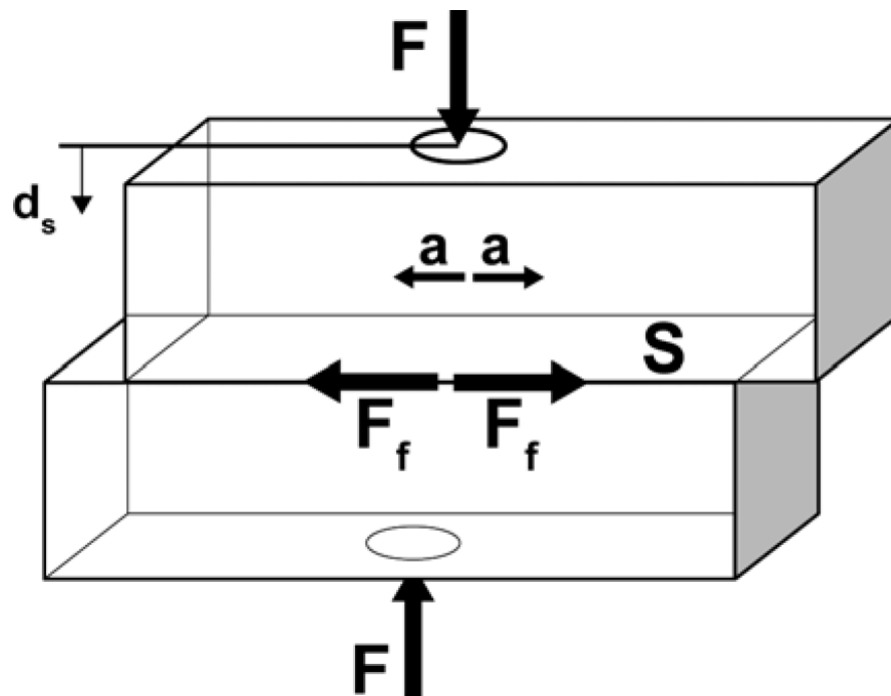


Figure 1.26 Principe du soudage par friction linéaire: Force appliquée (F); déplacement de soudage (d_s); amplitude (a); surface de soudage (S); pression de soudage (P_s) = F/S ; force de friction (F_f) (Ganne-Chedéville 2008 tiré de Giese 1995).

pression entre les deux pièces est maintenue quelques secondes (t_m) jusqu'à la solidification de l'interface de soudage (Leban et al. 2005).

1.5.2 Soudage rotationnel

Cette revue de littérature s'attarde essentiellement au soudage rotationnel puisqu'il s'agit de la méthode d'assemblage utilisée pour l'ensemble des travaux. Certains parallèles ont cependant été effectués entre les méthodes rotationnelle et linéaire lorsque ceux-ci étaient pertinents. La technique du soudage rotationnel consiste à introduire un goujon, soumis à une force rotationnelle, dans un trou de diamètre inférieur. Durant l'insertion, la montée en température induite par friction entraîne la fusion du matériel polymère ligneux. Ceci provoque le détachement partiel de fibres de bois qui s'entrelacent dans la matrice en fusion. Une fois l'insertion complétée, la température diminue produisant un joint hautement densifié et très résistant (Figure 1.27).

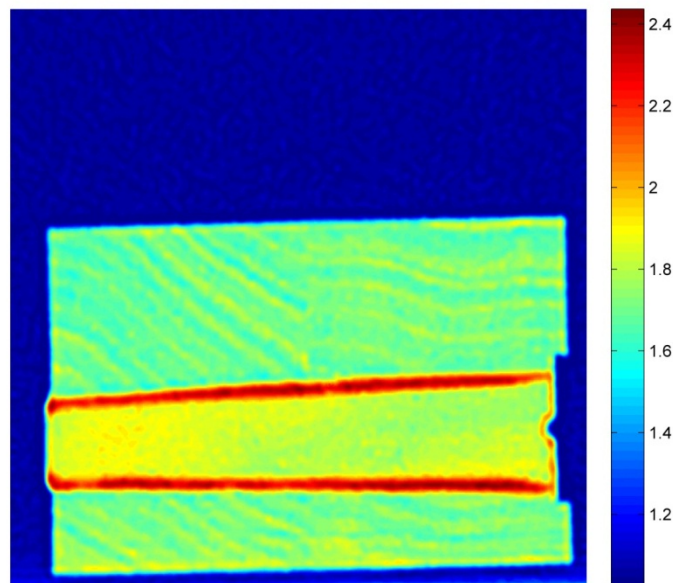


Figure 1.27 Image par tomodensitométrie (CT-scan) d'un assemblage composé de 2 baguettes et d'un goujon soudé. Rouge: zone de soudage fortement densifiée; Bleu: zone de référence correspondant à la densité du bois.

1.5.3 Paramètres influents lors du soudage

La définition des paramètres de soudage optimaux tient compte des propriétés anatomiques du bois pour une essence donnée, à savoir sa densité, la largeur de ces cernes annuels et l'angle du fil du bois (Properzi et al. 2005). Durant le soudage, la pression exercée à l'interface vient comprimer les fibres et la fusion qui s'en suit entraîne l'écoulement du matériel ligneux et une densification à l'interface. Le mécanisme de déformation par compression est étroitement relié à l'anatomie de l'essence utilisée. Les propriétés anatomiques telles que le type de cellule et l'épaisseur de la paroi cellulaire sont des aspects déterminants pour l'obtention d'un bon soudage. La densification à l'interface a fait l'objet d'études par microdensitométrie à rayon-X et par tomographie (Leban et al. 2004, Wieland et al. 2005). La Figure 1.28 présente le profil de densité pour trois essences ayant une structure anatomique différentes (pin, chêne et hêtre). Pour une essence à pores diffus telle que le hêtre, la ligne de soudage est très étroite et linéaire. Dans le cas du pin, un grand contraste de densité entre le bois initial et le bois final entraîne la formation d'une interface qui rappelle le procédé d'aboutage par entures multiples ou *fingerjoints*. Le bois final, plus dense, pénètre dans le bois initial moins dense de l'autre pièce de bois. Ce phénomène est également visible à l'interface du chêne à échelle moindre. Selon Navi et Heger (2005), trois zones de densification peuvent être identifiées dans un joint soudé: une zone au milieu constituée d'un matériau semblable à un matériau amorphe dense avec des fragments de fibres de bois; une deuxième zone constituée de fibres adjacentes à la première zone (zone centrale) totalement densifiées par l'action thermo-hydomécanique; et une troisième zone constituées par les cellules de bois non abîmées.

Un profil de densité régulier et abrupte à l'interface procure des joints plus performants mécaniquement. Les irrégularités liées à la transition bois initial et bois final sont un facteur limitatif à l'obtention d'un joint de qualité chez les résineux tels que l'épinette (Leban et al. 2004). Rodriguez et al. (2010) ont observé un profil de densité nettement plus uniforme pour l'érable à sucre (*Acer saccharum*) que pour le bouleau jaune (*Betula alleghaniensis*) lors d'une étude sur le soudage rotationnel d'essences canadiennes. L'érable à sucre offrait également de meilleures performances mécaniques en comparaison avec le bouleau jaune bien que le facteur de densité n'explique pas à lui seul cette différence.

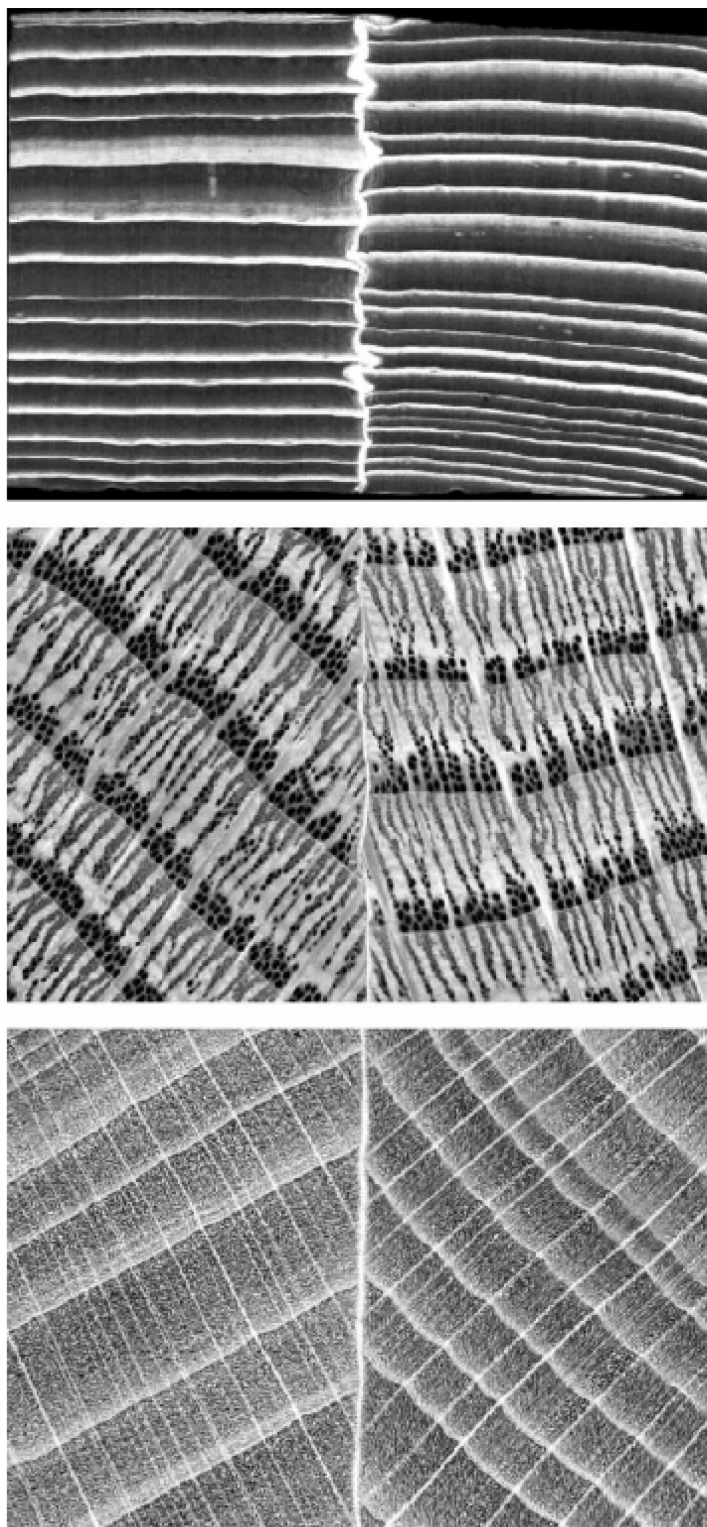


Figure 1.28 Photos par rayon-X d'échantillons soudés par soudage linéaire. Les pixels plus foncés correspondent à des zones de faible densité et les pixels clairs des zones de haute densité. De haut en bas: Pin, chêne et hêtre) (Leban et al. 2005).

Des assemblages partiel ou complet de type 2 blocs (Figure 1.29) pourraient s'avérer intéressants pour des applications dans le domaine du meuble. La Figure 1.30 présente une micrographie par rayon-X d'un goujon inséré dans deux pièces de hêtre: les zones *blanches* à l'interface indiquent une forte densification; les flèches 1 et 2 indiquent respectivement l'absence de soudage et le matériel en fusion ayant transféré dans l'espace entre les 2 pièces de bois.

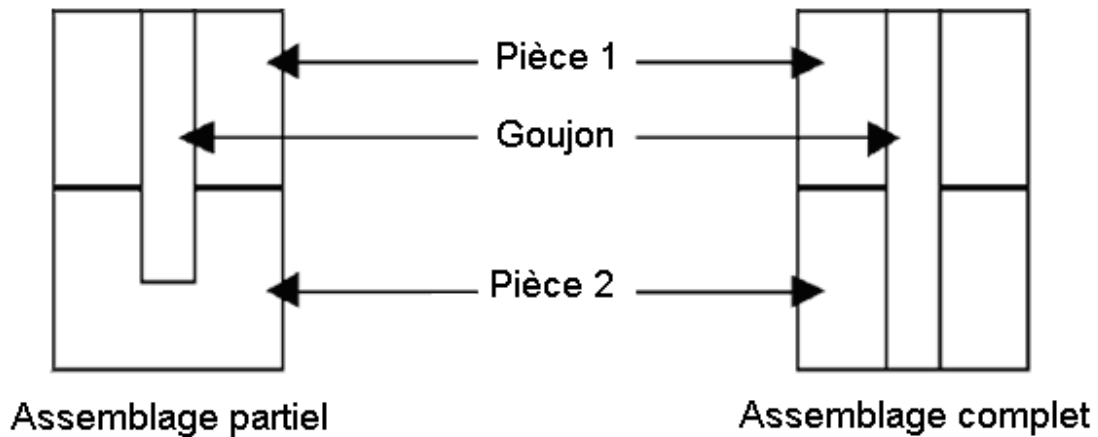


Figure 1.29 Assemblages de type 2-blocs. Gauche : Assemblage ne traversant pas totalement le 2e élément. Droite : Assemblage traversant complètement les 2 éléments.

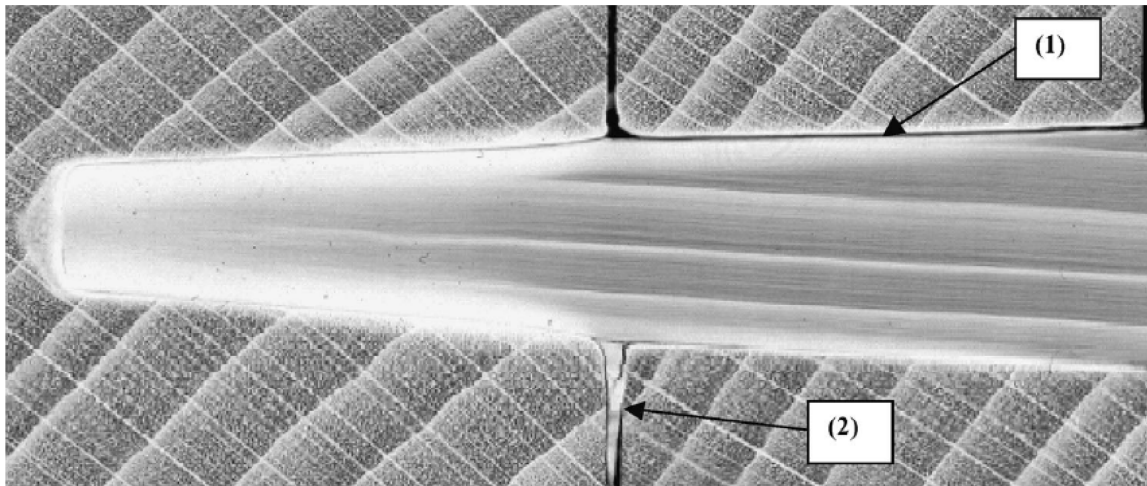


Figure 1.30 Micrographie par rayon-X d'un goujon inséré dans deux pièces de hêtre (Ganne-Chedeville et al. 2005).

1.5.3.1 Vitesse d'insertion et de rotation du goujon

Un temps d'insertion du goujon élevé à haute température augmente les risques de brûler le bois à l'interface réduisant ainsi la qualité du soudage. Durant le soudage du bois, l'interface de soudage se forme et se brise continuellement. Pour un temps de soudage prolongé, le lien de soudage peut se briser pour se reformer à nouveau mais seulement partiellement. Un contact entre le goujon et le substrat est donc inévitablement essentiel (Pizzi et al. 2004).

La vitesse de rotation influence directement la qualité de soudage lors d'essais manuels effectués au moyen d'une perceuse à colonne (Rodriguez et al. 2010). La rapidité à laquelle la température atteint son point maximal entraînant la fusion du matériel ligneux serait une explication de ces résultats. Tant chez l'érable à sucre que le bouleau jaune, une vitesse rotationnelle de l'ordre de 1000 tours min^{-1} s'est avérée la vitesse optimale lors d'essais en traction. Des essais similaires effectués avec du hêtre européen (*Fagus sylvatica*) ont permis de constater une meilleure qualité de soudage à 1515 tours min^{-1} (Ganne-Chedévile et al. 2005).

Kanazawa et al. (2005) ont effectué des essais afin de comparer des vitesses d'insertion de 100 et 400 $\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$ avant de conclure que la seconde vitesse d'insertion procure les meilleurs joints. Segovia et Pizzi (2009) ont effectué le même type d'essai pour des temps d'insertion encore courts (de l'ordre de 2 à 3 secondes) et constaté une nette amélioration des propriétés mécaniques.

Un temps de soudage linéaire court a pour avantage de réduire la quantité de fibres expulsées hors de la zone de soudage (Mansouri et al. 2009). Le maintien des fibres à l'interface procure un joint plus solide mais également moins poreux et plus résistant à l'eau en raison de l'absence de cette zone carbonisée qui facilite la pénétration de l'eau. Une couleur moins foncée à l'interface indique également une diminution de la carbonisation liée à une montée en température rapide et une température maximale à l'interface moins élevée. Une période de soudage plus courte induit moins de dommage à l'interface de l'assemblage soudé. La température maximale à l'interface est ainsi inversement proportionnelle à la résistance à l'eau du joint (Omrani et al. 2009a).

1.5.3.2 Ratio diamètre goujon/diamètre trou

La vitesse à laquelle la lignine atteint son point de fusion (*melting point*) s'avère un aspect important relativement au soudage du bois. Une bonne friction permet à la lignine d'atteindre rapidement son point de fusion fournissant du même coup un meilleur joint. Le ratio entre le diamètre du goujon et le diamètre du trou pré-percé dans le substrat accueillant le goujon est un paramètre influent sur la qualité du soudage. Lors d'études européennes, les meilleurs résultats en traction ont été obtenus avec un goujon de 10 mm de diamètre et un trou pré-percé de 8 mm de diamètre pour un ratio de 1,25 (Pizzi et al. 2004, Kanazawa et al. 2005, Segovia et Pizzi 2009). Différents ratios ont été également évalués pour l'érable à sucre et le bouleau jaune par Rodriguez et al. (2010). Ainsi, des goujons de 9,67 mm de diamètre étaient insérés dans des trous pré-percés de 7,14, 7,34 et 7,67 mm de diamètre. Tout comme pour les études européennes, un ratio de 1,25 s'est avéré celui procurant les meilleurs résultats mécaniques.

Ganne-Chedeville et al. (2005) ont déterminé lors d'une insertion de type 2-blocs de 40 mm d'insertion (20 mm dans chacun des éléments) que les diamètres optimaux des trous pré-percés sont respectivement de 8 mm pour le premier élément et de 7 mm dans le second comparativement à 6 et 5,5 mm. Des goujons légèrement coniques ont été utilisés pour l'occasion.

1.5.3.3 Angle/sens d'insertion

L'angle d'insertion influencerait la montée en température expliquant les différences observées entre les techniques de soudage rotationnel et linéaire (Kanazawa et al. 2005). D'un point de vue mécanique, l'angle d'insertion a également un impact non négligeable. Selon la configuration de l'assemblage et des contraintes en présence, le goujon peut être sujet à du cisaillement pur, à du cisaillement jumelé à de la tension ou encore à du cisaillement additionné de compression (Figure 1.31). Pour une insertion à 90° soumise à une contrainte en cisaillement, le goujon est essentiellement en cisaillement alors que pour une insertion à 45° le goujon est hautement déformé résultat d'un mélange de cisaillement et de tension. La contrainte de cisaillement sera cependant moins importante à 45° comparativement à 90° (Bocquet et al. 2006, 2007, Segovia et Pizzi 2009).

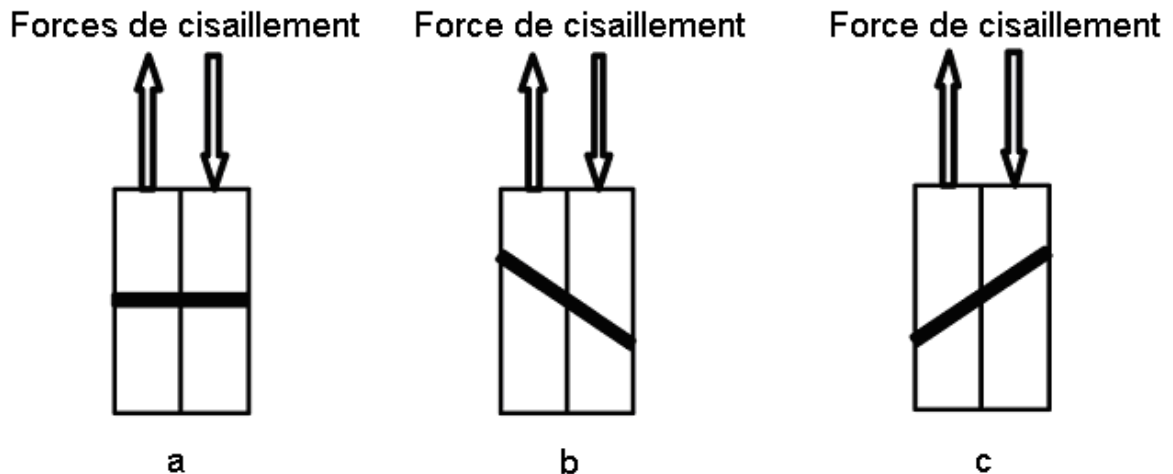


Figure 1.31 Représentation schématique du type de force à laquelle le goujon est soumise en fonction de l'angle d'insertion dans le substrat; a: le goujon est sujet à du cisaillement pur et la force est perpendiculaire (90°) au goujon; b: le goujon est sujet à du cisaillement et de la tension et l'angle entre la surface et le goujon est inférieur à 90° et les surfaces du bois tendent à se séparer; c: le goujon est sujet à du cisaillement et de la compression et l'angle entre la surface et le goujon est inférieur à 90° et les surfaces du bois tendent à se rapprocher (Bocquet et al 2007).

L'angle d'insertion du goujon par rapport à la surface du substrat a une influence significative sur la performance mécanique du joint (Bocquet et al. 2007). Pour une insertion à 90° , le goujon est soumis uniquement à du cisaillement. Par contre, pour un angle de 30° à 45° , le goujon est sujet à du cisaillement mais également à de la tension, procurant un joint plus résistant alors que de façon générale se sera le goujon qui se casse. Les assemblages soudés de type 2 blocs résistent de façon équivalente ou mieux que leur équivalent cloué.

Pour des essais en flexion effectués sur des baguettes composées de 56 goujons (Figure 1.32), Bocquet et al. (2007) ont démontré que les assemblages goujonnés sont plus rigides et offrent de meilleurs résultats en rupture maximale comparativement à leurs équivalents collés ou cloués.



Figure 1.32 Assemblage soudé (gauche) et assemblage cloué (droite) en prévision d'essais en flexion (Bocquet et al. 2007).

Segovia et Pizzi (2009) n'observent pas de différence significative entre des assemblages soudés ou collés ayant un angle d'insertion des goujons de 45° ou 90° par rapport à la surface du bois mais ceux-ci sont cependant supérieurs à leur équivalent cloué (Figure 1.33). Les joints soudés à 45° , sollicités en tension et en cisaillement, procurent une meilleure rigidité aux assemblages lors d'essais mécaniques que ceux à 90° , sollicités uniquement en cisaillement.

L'angle d'insertion du goujon par rapport au fil du bois est également un paramètre qui influence la qualité des joints obtenus (Ganne-Chedéville et al. 2005, Rodriguez et al. 2010). Une insertion perpendiculaire au fil du bois procure des joints plus résistants que ceux en insertion parallèle.

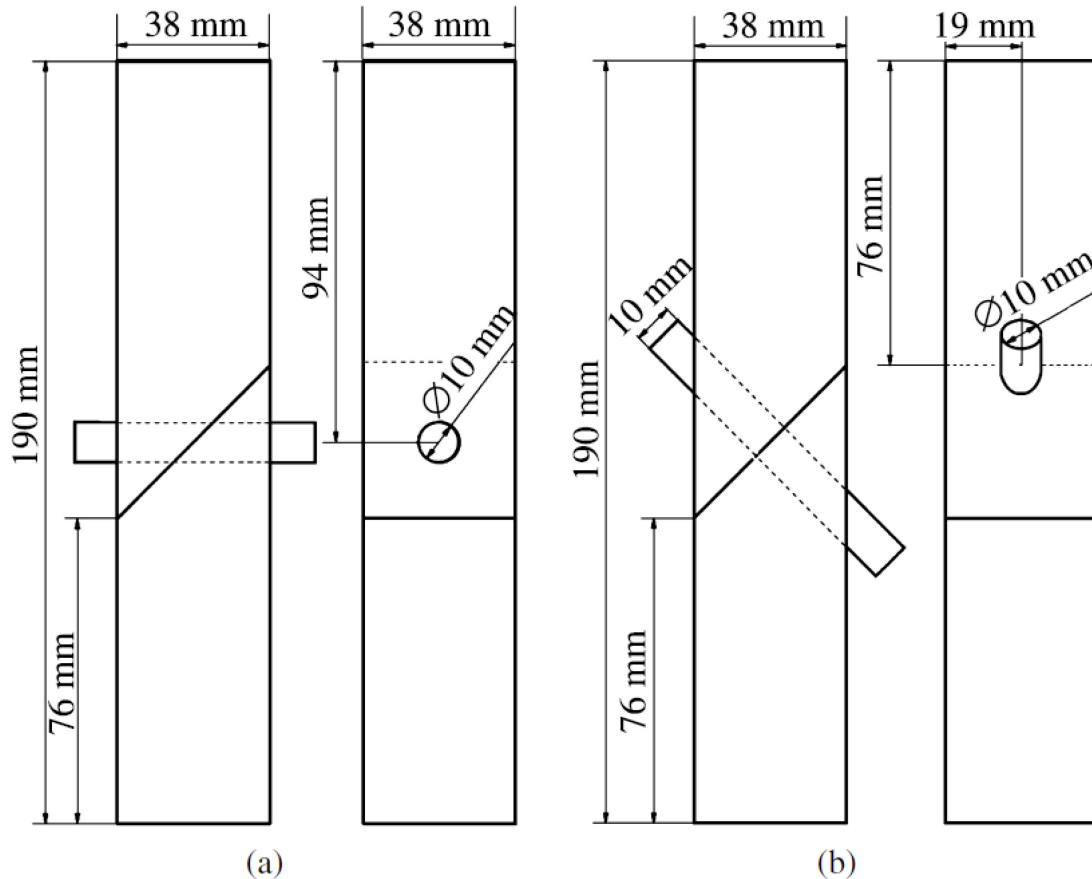


Figure 1.33 Assemblage goujonné-soudé à enture: à 45° par rapport à la surface du bois (a); à 90° par rapport à la surface du bois (b) (Segovia et Pizzi 2009).

1.5.3.4 Profondeur d'insertion

La profondeur d'insertion, et du même coup la surface de soudage effective, sont directement liés à la résistance mécanique d'un joint soudé qui est sollicité. Selon Kanazawa et al. (2005), la surface de soudage serait proportionnellement liée à la résistance mécanique du joint.

La contribution de sections de goujon à différents niveaux pour une insertion de 30 mm de profondeur a fait l'objet d'étude par Kanazawa et al. (2005). Les sections étudiées, soit de 0 à 10 mm, 11 à 20 mm et 21 à 30 mm, ont permis de conclure que l'apport de chaque section sur la résistance globale du joint était inversement proportionnellement à la profondeur d'insertion. La réduction du diamètre du trou pré-percé en fonction de la

profondeur d'insertion (diamètre de 8 mm de 0-20 mm et 7,5 mm de 21 à 30 mm) permettrait selon les auteurs d'améliorer la résistance mécanique des joints.

Pizzi et al. (2004) estiment à 60% la surface effective de soudage entre le goujon et son substrat. L'alignement entre l'axe d'insertion longitudinal du goujon et le trou pré-percé jumelé à des refroidissements localisés durant le soudage expliqueraient ceci. Un assemblage 2-blocs partiel ou à travers n'affecterait pas les propriétés mécaniques du joint formé tant que la profondeur d'insertion demeure la même (voir Figure 1.29).

1.5.3.5 Essence

En Europe, des soudages obtenus avec le bois de hêtre (*Fagus sylvatica*) et de frêne (*Fraxinus excelsior*) ont donné des résultats supérieurs à ceux avec des résineux tels que le pin (*Pinus sylvestris*) et l'épinette de Norvège (*Picea abies*) (Pizzi et al. 2004, Ganne-Chédeville et al. 2005, Segovia et al. 2011). La densité des essences étudiées s'expliquerait par les différences observées. Chez les résineux, une densité moins élevée favoriserait l'affaissement cellulaire (*cellular collapse*) à l'interface de soudage ce qui réduit la pression exercée entre les surfaces à souder et du même coup réduit la montée en température. Différents essais ont également été effectués avec le chêne (*Quercus robur*) (Leban et al. 2005), l'érable (*Acer campestre*) (Ganne-Chédeville 2008) et le pin sylvestre (*Pinus sylvestris*) (Vaziri et al. 2011, 2012).

À ce jour, une seule étude s'est intéressée aux paramètres de soudage du bois pour des essences nord-américaines. Rodriguez et al. (2010) ont évalué l'aptitude de deux essences canadiennes, l'érable à sucre (*Acer saccharum*) et le bouleau jaune (*Betula alleghaniensis*), pour le soudage rotationnel au moyen d'une perceuse à colonne manuelle. Les résultats en traction ont non seulement démontré que l'essence est un paramètre influent sur la qualité du joint soudé mais également que celui-ci avait une meilleure résistance à l'eau que son équivalent collé (PVA). La variabilité inter-essence s'expliquerait par la composition chimique et la structure des polymères présents dans chaque essence, à savoir la lignine, les hémicelluloses, ainsi que la structure anatomique de chaque essence.

1.5.3.6 Applications et limites relatives à l'utilisation du soudage du bois

Les avancées actuelles ne permettent pas l'utilisation de la technique du soudage du bois pour des applications extérieures bien qu'un joint soudé résiste durant un certain temps aux intempéries liées à un usage extérieur (Omrani et al. 2007). Les assemblages soudés sont toutefois plus résistants que leur équivalent collé (PVA de type 2) lorsque ceux-ci sont mis en contact avec l'eau (Omrani et al. 2007, Rodriguez et al. 2010).

La résistance mécanique d'assemblages composés d'éléments soudés serait acceptable pour la conception de meuble (Renaud 2008, Segovia et Pizzi 2009). L'application de la technique de soudage rotationnel pour la conception de meuble offrirait de propriétés supérieures à son équivalent cloué et comparables à ceux de goujons collés.

Des essais mécaniques ont permis de démontrer qu'un plancher conçu à partir de goujons de hêtre soudés dans un substrat d'épinette avec une perceuse manuelle rencontre les normes européennes à ce sujet (Bocquet et al. 2006). Des essais utilisant le soudage rotationnel ont également été effectués avec succès sur des panneaux gaufrés (OSB) et particules (MDF) (Resch et al. 2006).

Ganne-Chedéville et al. (2005) se sont intéressés au couple lors de l'insertion du goujon en fonction de la pénétration de celui-ci de même qu'au concept de *wood nail* qui consiste à insérer un goujon dans un substrat sans trou pré-percé sans toutefois fournir des résultats intéressants lors d'essais mécaniques. Cette même étude souligne également qu'un goujon affichant près de 0% TH procure également un joint soudé de meilleure qualité que son équivalent à 12% TH.

Le soudage de bois d'épinette (*Picea abies*) par friction linéaire pour des fins en structure a récemment fait l'objet d'études expérimentales et numériques par Vallée et al. (2012). Les résultats de joints soudés seraient conceptuellement comparables à ceux obtenus au moyen de joints collés. Des assemblages multicouches effectués à partir de la technique de soudage rotationnel (Figure 1.34) ont également été réalisés puis testés en flexion statique en 4 points avec des résultats prometteurs (O'Loinsigh et al. 2012).



Figure 1.34 Poutre multicouche assemblée par soudage rotationnel (O’Loinsigh et al. 2012).

1.5.3.7 Mesure de température

Kanazawa et al. (2005) ont observé une température de l’ordre de 180 °C à l’interface de soudage pour un soudage par friction rotationnelle. Cependant, le substrat étant préalablement coupé afin de permettre une mesure par caméra thermique. Une portion de la chaleur pouvait ainsi se dissiper dans l’air ambiant ce qui pourrait sous-estimer la température à l’interface.

Des mesures de température à l’interface pour le soudage rotationnel ont également été effectuées à l’aide de thermocouples par Rodriguez et al. (2010) sur des essences canadiennes. L’étude soutient que le ramollissement et la température de dégradation des composants du bois sont atteints durant le procédé de soudage. Les températures maximales, atteintes en moins d’une seconde, pour l’érable à sucre (*Acer saccharum*) et le bouleau jaune (*Betula alleghaniensis*) étant respectivement de 263 °C et 274 °C.

La relation entre la température, le temps de friction et le flux thermique lors du soudage rotationnel est particulièrement complexe. Zoulalian et Pizzi (2007) proposent le modèle suivant afin de déterminer la température à l’interface (T_o) en fonction du temps de friction

$$T_o = T_i + \frac{2\beta\mu\tau\sqrt{\alpha}}{k\sqrt{\pi}}\sqrt{t} \quad [39]$$

où T_i : température initiale à l’interface (K); t : temps de soudage (s); τ : contrainte de friction (Pa); μ : vitesse de rotation (m s^{-1}); β : fraction d’énergie mécanique convertible en

énergie thermique; k : conductivité thermique ($\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$); α : coefficient de diffusion thermique du bois ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$). Selon ces derniers, $183 \text{ }^\circ\text{C}$ serait la température optimale afin d'obtenir des soudages de qualité pour le hêtre européen (*Fagus sylvatica*).

1.5.4 Soudage du bois et qualité de l'air

La qualité de vie est étroitement liée à l'état de l'environnement qui nous entoure. Au Canada, la population passe une grande partie de leur vie à l'intérieur et la qualité de l'air ambiant intérieur est cruciale pour la santé et le bien-être. Une mauvaise qualité de l'air intérieur ou encore une ventilation inadéquate sont des facteurs qui peuvent contribuer au syndrome du bâtiment malsain, aux maladies liées aux bâtiments et aux environnements intérieurs malsains. L'expression *syndrome du bâtiment malsain* décrit d'ailleurs des immeubles dont les occupants ressentent la fatigue et réagissent aux produits chimiques présents dans l'air (Anonyme 2001).

Que ce soit lors de la fabrication, pendant l'utilisation ou encore à l'enlèvement et à l'élimination, les matériaux de construction peuvent avoir des incidences importantes sur la santé. La notion de qualité de l'air intérieur (QAI), qui renvoie aux caractéristiques chimiques, physiques et biologiques de l'air intérieur, peut être liée aux produits chimiques que dégagent les matériaux ou produits de construction (Anonyme 2001). Les principaux polluants de l'air intérieur sont les composés organiques volatils (COV), le formaldéhyde, les micro-organismes et les particules. Le terme COV représente une gamme étendue et diversifiée de produits chimiques contenant du carbone et de l'hydrogène qui se volatilisent à la température ambiante. Leurs sources d'émission dans l'air intérieur sont variées et comprennent la fumée de cigarette, les produits domestiques, le mobilier, les gaz d'échappement des véhicules et les matériaux de construction comme la peinture, le vernis et les colles. Ces produits peuvent se retrouver pendant des années dans les habitations (Santé Canada 2002).

Parmi les symptômes d'une exposition aux COV, citons la fatigue, les maux de tête, la somnolence, les étourdissements et les irritations de la peau et des yeux. Les personnes hypersensibles peuvent réagir très mal à divers COV en concentrations très faibles. La pollution de l'air peut également irriter l'appareil respiratoire et causer une inflammation

des poumons, elle peut réduire la fonction pulmonaire, rendant la respiration plus difficile et peut enfin aggraver l'asthme et les maladies pulmonaires (Anonyme 2001).

Le vinyle, le contreplaqué et les panneaux de particules sont parmi les produits ayant des taux d'émissions les plus élevés. Les contreplaqués pour usage intérieur (placages en bois de feuillus) et les panneaux de particules émettent des taux particulièrement élevés de COV à moins qu'ils n'aient été fabriqués avec un adhésif spécial ou recouverts de peintures ou d'enduit. L'utilisation de panneaux de particules contenant des résines de phénol-formaldéhyde permet d'atténuer le problème. Une autre possibilité est d'appliquer des stratifiés ou d'autres matériaux non poreux sur les deux faces des panneaux de particules. Les adhésifs utilisés dans la fabrication de ce mobilier peuvent également avoir des effets négatifs sur la QAI. Les adhésifs chimiques à base de solvant ont généralement des taux d'émissions de COV supérieurs aux produits à base d'eau. Le formaldéhyde se trouve dans beaucoup de résines utilisées dans la fabrication de matériaux de construction comme les panneaux de particules, les contreplaqués pour usage intérieur et les adhésifs nécessaires pour l'installation (Anonyme 2001).

Une analyse par chromatographie en phase gazeuse (TD-GC-MS) des composés volatils et des émissions gazeuses lors du soudage rotationnel pour le hêtre (*Fagus sylvatica*) et l'épinette de Norvège (*Picea abies*) a démontré que les composés formés sont essentiellement de la vapeur d'eau, du CO₂ en très faible proportion, des composés de dégradation provenant de glucides et de la lignine amorphe. Une très faible proportion de CO₂ émise et l'absence d'émanation de CO ou CH₄ ont été attribuées à des températures de soudage peu élevées (Omrani et al 2008).

Ganne-Chedéville (2008) note la présence d'une grande variété de substances dont la plupart sont dérivées de la lignine lors de soudage linéaire d'érable (*Acer campestre*) via analyse des fumées par GC/MS. Ces substances étant le 4 (2-méthyl propane) phénol, la vanilline, l'eugénol et l'alcool furfurylique.

1.5.5 Aspects chimiques en lien avec le soudage du bois

Le principe d'adhésion du soudage du bois par friction mécanique se résume à la fusion et l'écoulement de la lignine et des hémicelluloses suite à un réchauffement issu de la friction

produite entre deux pièces de bois et à un phénomène de réticulation radicalaire (Wieland et al. 2005). Le détachement partiel des cellules et des fibres entraîne la formation d'un réseau d'enchevêtrements dans une matrice de matériel en fusion qui se solidifie. Une réaction chimique de réticulation entre la lignine et des dérivés de carbohydate furfural a également lieu durant le soudage (Gfeller et al. 2003).

Jusqu'à 90 °C on observe surtout des pertes d'eau et de volatiles ainsi que des changements chimiques mineurs dans le bois (Sundqvist 2004). Entre 90-180 °C, la matière ligneuse commence à ramollir et des changements plus prononcés se produisent. Au-delà de 200 °C, la structure ligneuse s'en retrouve endommagée et une conversion thermique s'en suit. Au-delà de 270 °C débute la pyrolyse du bois (Fengel et Wegener 2003). Omrani et al. (2009a) notent que les xylanes sont fortement acétylés suite au soudage alors que les mannanes sont présents en faible proportion concluant que l'essentiel de la dégradation et des réarrangements cellulaires ont lieu sur les xylanes, confirmant que les hémicelluloses constituent l'un des composants qui fusionnent et s'écoulent à l'interface de soudage.

Selon Sun et al. (2010), la résistance mécanique des joints de soudage d'érable à sucre comparativement à ceux de bouleau jaune s'expliquerait par: une augmentation des fonctions phénoliques libres dans les structures provenant de la lignine qui supportent les liaisons hydrogène et offrent une meilleure association entre la lignine et les fibres; une réticulation par ponts hydrogène méthylène menant à la formation d'un nouveau polymère à base de lignine formé de liaisons C-C à l'origine des structures de lignine condensée; une interface moins altérée en raison d'une décomposition plus faible des polysaccharides (Tableau 1.5).

Tableau 1.5 Composition de la surface (%) à l'interface de soudage et pour l'érable à sucre et le bouleau jaune par analyse XPS (Sun et al 2010).

Échantillon	Éléments (%)				Carbone C1 (%)				Oxygène O1 (%)		Ratio O/C
	C	O	N	autres	C1	C2	C3	C4	O1	O2	
BJ <i>Ref</i>	72,2	27,4	0,3	0,1	47,8	41,2	6,9	4,1	1,8	98,2	0,38
BJ <i>WM</i>	69,1	28,3	-	2,6	46,8	42,9	7,1	3,1	6,8	93,2	0,41
ES <i>Ref</i>	69,0	27,2	0,1	3,6	48,4	42,3	6,7	2,6	3,3	96,7	0,39
ES <i>WM</i>	65,2	30,4	-	4,5	35,8	50,7	10,9	2,5	1,3	98,7	0,47

BJ: bouleau jaune; ES: érable à sucre; *Ref.*: matériel de référence; *WM*: matériel provenant de l'interface de soudage.

1.6 Objectifs de recherche

Dans le domaine de l'ameublement, l'assemblage de pièces de bois est un préalable à la confection de produits finaux, notamment dans des cas où la lamination est nécessaire afin d'obtenir un panneau. Les adhésifs synthétiques, généralement issus de la pétrochimie, nécessitent énormément d'énergie à la confection. Ceux-ci proviennent généralement d'une matière première non renouvelable, imposent un temps de polymérisation constituant un goulot dans la chaîne de production et s'avèrent une source de contamination qui complique la revalorisation ou encore le recyclage du produit une fois son cycle de vie utile terminé. Les connecteurs métalliques ou plastiques, quant à eux, sont également des sources de contamination en plus de limiter les phases subséquentes de découpage et de sablage.

Le soudage du bois constitue une double innovation. Dans un premier temps, il propose un procédé d'assemblage offrant une très grande efficacité en termes de temps, ce qui permettrait d'introduire une plus grande flexibilité dans la production. De plus, son mode d'assemblage ne constituant pas une contrainte à la gestion en fin de vie du produit, sa recyclabilité ou encore sa revalorisation seraient grandement simplifiées. En effet, le produit étant composé uniquement à base de bois, une matière première renouvelable, la diversité de matières d'un assemblage soudé serait réduite au maximum. Ainsi, les opérations de séparation, de déconstruction et de valorisation au terme du cycle de vie normale du produit seraient grandement simplifiées, conférant au produit une grande recyclabilité.

À ce jour, la plupart des études portant sur le soudage du bois ont été effectuées en Europe à partir d'essences européennes (e.g. *Fagus sylvatica*, *Picea abies*) couramment utilisées pour des applications en structure et en ameublement. Peu d'information sur le soudage d'essences nord-américaines est donc disponible, à l'exception de travaux effectués par Rodriguez et al. (2010) et par Sun et al. (2010). Enfin, aucune étude ne porte sur un prototype industriel entièrement automatisé pour le soudage par friction rotationnelle dans le but de concevoir des assemblages lamellés-soudés.

L'objectif général du présent projet consiste donc à évaluer l'aptitude du soudage par friction rotationnelle à partir d'essences feuillus canadiennes au moyen d'un procédé entièrement automatisé.

Les objectifs spécifiques du projet sont:

1. de déterminer les paramètres optimaux de soudage du bois par friction rotationnelle pour l'érable à sucre (*Acer saccharum*) et le bouleau jaune (*Betula alleghaniensis*), deux essences couramment utilisées dans le domaine de l'ameublement;
2. d'examiner la faisabilité d'un panneautage lamellé-soudé pour des applications d'apparence intérieures à partir des deux essences étudiées;
3. de caractériser la zone à l'interface de soudage afin de mettre en relation les performances mécaniques des joints soudés avec les phénomènes physico-chimiques en cause lors du soudage;
4. d'analyser les émanations volatiles produites durant le soudage afin de s'assurer que le procédé ne présente aucun risque pour la santé des travailleurs ou encore pour l'environnement.

Ainsi, les hypothèses de recherche du projet sont :

1. qu'il est possible de concevoir des panneaux lamellés-soudés tout aussi performants que leur équivalent lamellé-collé;
2. que des différences d'ordre chimiques expliquent une meilleure aptitude pour le soudage d'une essence par rapport à une autre;
3. que de la conception à la fin de vie utile du produit, le soudage du bois est une alternative supérieure, sur le plan environnemental, aux techniques d'assemblage actuellement utilisées.

Chapitre 2 Rétrospective méthodologique

L'ensemble du projet se divise en trois sections principales. La première partie porte sur l'effet de divers paramètres sur la qualité du soudage et la détermination de la température à l'interface lors du soudage pour deux essences nord-américaines fréquemment utilisées pour des produits d'apparence d'intérieur et retenues pour cette étude : l'érable à sucre (*Acer saccharum*) et le bouleau jaune (*Betula alleghaniensis*). Cette section a pris la forme d'une analyse factorielle afin d'évaluer l'effet de l'essence (a: bouleau jaune; b: érable à sucre), de la vitesse de rotation du goujon durant l'insertion (1000 tours min⁻¹; 1500 tours min⁻¹; 2500 tours min⁻¹), de la vitesse d'insertion du goujon (12,5 mm s⁻¹; 16,7 mm s⁻¹; 25,0 mm s⁻¹) et de l'angle d'insertion par rapport au fil du bois (insertion radiale; insertion tangentielle). Les paramètres optimaux pour chaque essence ont été déterminés au moyen d'essais en traction linéaire. Les résultats de cette partie sont présentés au Chapitre 3.

La seconde partie des essais expérimentaux vise à évaluer l'aptitude du soudage du bois par friction rotationnelle pour le panneauage et la conception de meuble à partir d'essences canadiennes. La qualité de panneaux lamellés-soudés a été analysée puis comparée à celle de panneaux lamellés-collés assemblés avec des systèmes et méthodes tels qu'utilisés actuellement dans l'industrie. Les propriétés mécaniques en flexion et la stabilité dimensionnelle de panneaux lamellés-soudés ont été étudiées puis comparées avec leur équivalent collé. Les résultats de la seconde partie sont présentés au Chapitre 4.

Enfin, la troisième et dernière partie a porté sur l'analyse des modifications chimiques à l'interface de soudage et les émanations volatiles émises durant le procédé d'assemblage. Ces deux thèmes ont fait l'objet d'analyse afin de saisir les aspects fondamentaux du soudage rotationnel. Les résultats de cette partie sont présentés au Chapitre 5.

Un lit pour nouveau-né a été également conçu dans le cadre de ce projet de recherche. L'objectif étant de concevoir et construire un meuble exclusivement à partir de la technique d'assemblage du bois par friction rotationnelle afin de valider l'efficacité du procédé de soudage du bois pour la conception de meuble. Les détails de la cette partie sont présentés à l'Annexe 1.

2.1 Érable à sucre

L'érable à sucre (*Acer saccharum* Marsh) est un feuillu de grande longévité (200 ans et plus) pouvant atteindre 35 m de hauteur et 90 cm de diamètre. On le retrouve principalement dans l'est du Canada et dans le nord-est américain. Cette espèce forme, avec la pruche et le hêtre, les forêts naturelles de fin de succession du sud du Québec (Leboeuf 2007). Base de l'industrie acéricole du Québec, sa feuille se retrouve également sur le drapeau du Canada.

Végétal de l'embranchement des trachéophytes et de la classe des angiospermes, l'érable à sucre est un feuillu à pores diffus. Les vaisseaux de l'érable à sucre sont distribués de façon uniforme à l'intérieur des cernes annuels (Figure 2.1). Le diamètre de ceux-ci est relativement uniforme variant de 20 à 100 μm pour la plupart des espèces des zones tempérées. Ceux-ci s'avèrent être la principale voie de transport de la vapeur d'eau dans le bois juvénile sauf lorsqu'ils sont bloqués par des tyloses (Siau 1995).



Figure 2.1 Photomicrographies d'érable à sucre. De gauche à droite : plan de coupe RT, RL et LT (Grossissement de 40x) ©André Béliveau, Alain Cloutier et Université Laval.

L'érable à sucre présente de bonnes propriétés mécaniques et visuelles en raison de son grain et de ses cernes annuels peu apparents. Son bois est lourd, dur et très résistant alors que sa couleur va du blanc crème au brun clair (Farrar 2001). L'érable à sucre est utilisé notamment dans la conception de revêtement de plancher, de meuble, de cabinet de cuisine

et de planche à découper (USDA 2010). La possibilité forestière au Québec pour le groupe *érables* qui comprend l'érable à sucre et l'érable rouge (*Acer rubrum*) représente 1 336 600 m³ par année. Pour ce même groupe, la portion attribuée s'élève à 728 044 m³ annuellement (MRNFQ 2012b).

2.2 Bouleau jaune

Arbre emblématique du Québec, le bouleau jaune (*Betula alleghaniensis Britton*) est un feuillu pouvant atteindre 25 m de hauteur et 60 cm de diamètre sur une période de 150 ans. Modérément tolérant à l'ombre, on le désigne parfois à tort sous le nom de merisier. Il s'associe généralement à l'érable à sucre dans le domaine de l'érablière à bouleau jaune (Leboeuf 2007).

Végétal de l'embranchement des spermatophytes (plante à fleurs et graines) et du sous-embranchement des angiospermes, il pousse essentiellement dans le sud-est du Canada et le nord-est des États-Unis. Tout comme l'érable à sucre, le bouleau jaune est un feuillu à pores diffus (Figure 2.2). D'un point de vue anatomique, sa composition volumétrique est également similaire à celle de l'érable à sucre sauf pour les proportions de rayons et de parenchyme longitudinal (Tableau 2.1). Bien que les deux essences soient à pores diffus, chez le bouleau jaune les rayons sont très fins alors que chez l'érable à sucre, les rayons sont plus larges et plus distincts.

Le bouleau jaune est utilisé notamment pour la fabrication de meuble, de contreplaqué et de cabinet de cuisine (USDA 2010). Son bois, lourd et dur, est de couleur brun doré ou brun rougeâtre (Farrar 2001). La possibilité forestière au Québec pour le bouleau jaune représente 917 300 m³ par année. Pour ce même groupe, la portion attribuée s'élève à 385 400 m³ annuellement (MRNFQ 2012b).

Tableau 2.1 Composition volumétrique pour le bouleau jaune et l'érable à sucre (Pashin et De Zeeuw 1980)

Caractéristique anatomique	Bouleau jaune	Érable à sucre
Proportion de vaisseaux (%)	21,4	21,0
Proportion de fibres (%)	63,8	61,0
Proportion de rayons (%)	10,8	17,9
Proportion de parenchyme longitudinal (%)	2,0	0,1

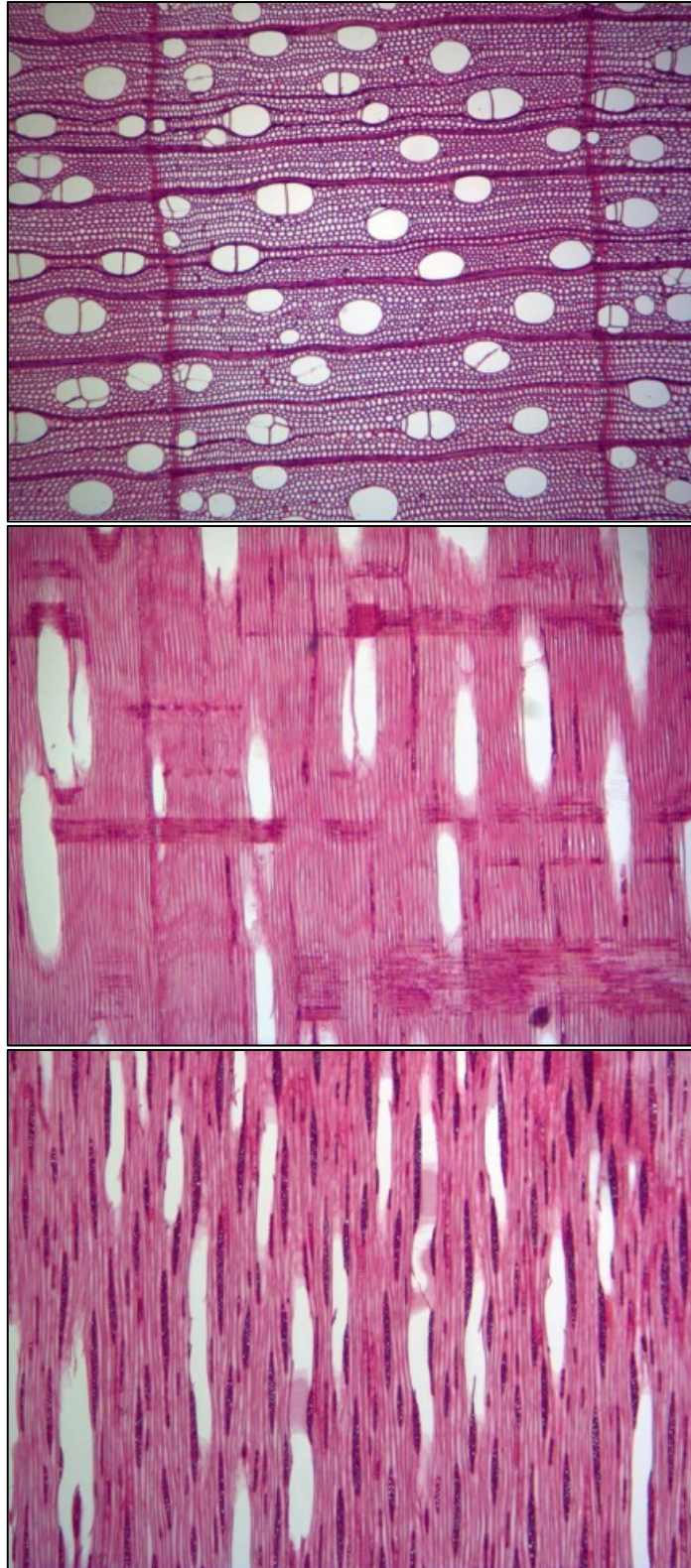


Figure 2.2 Microscopie électronique à balayage pour le bouleau jaune. Plan de coupe (de haut en bas): RT, RL et LT (Grossissement de 40x).

2.3 Préparation du matériel

Le matériel servant à la confection de baguettes était composé de sciages de bouleau jaune et d'érable à sucre séchés à TH entre 7 et 9 % provenant d'un distributeur local de bois d'ébénisterie. Des goujons lisses de précision d'érable à sucre et de bouleau jaune de 9,68 mm de diamètre, 82 mm et 96 mm de longueur¹, séchés à TH entre 6 et 8% et provenant d'un fournisseur local spécialisé en tournage de bois ont été utilisés pour le projet. Le matériel ligneux servant à la confection de baguettes a été soigneusement sélectionné afin de limiter l'impact des défauts naturellement présents dans le bois (*i.e.* nœuds) pouvant fausser les résultats. Des baguettes de 25 mm x 30 mm x 400 mm ont été usinées suivant le fil du bois. L'ensemble du matériel a été ensuite conditionnés à 20 °C et 60 HR jusqu'à masse constante préalablement au soudage. Le matériel a été préparé selon la norme ASTM D 143 (ASTM 2009). Le choix de ces essences indigènes feuillues s'explique en raison de leur popularité auprès des fabricants de meubles québécois.

2.4 Détermination de la masse volumique

Une section de 25 mm x 30 mm x 120 mm a été prélevée sur des baguettes afin de déterminer D_b . La détermination de D_b avait pour objectif de vérifier l'homogénéité de notre matériel. Les échantillons ont été placés dans un dessiccateur puis soumis à des cycles de vide et de pression afin de les imprégner d'eau. Les échantillons ont été saturés sous vide avec de l'eau distillée durant un cycle de 90 minutes en trois phases: 1) pression de -0,20 bars pendant 30 minutes pour enlever l'air; 2) pression de 2,5 bars pendant 30 minutes pour permettre aux échantillons de se gorger d'eau; 3) pression de -1,8 bars pendant 30 minutes pour enlever une fois de plus l'air restant dans les pores du bois. Le cycle était suivi d'un relâchement jusqu'à pression atmosphérique pour terminer la saturation des échantillons. Chaque échantillon était ensuite immergé dans l'eau afin de déterminer V_s selon le principe d'Archimède. Les échantillons étaient ensuite placés à l'étuve pendant 48 heures à 60 °C suivi d'une période de 24 heures à 102 °C afin de déterminer M_θ . Le calcul de D_b a ensuite été effectué à l'aide de l'équation 4. Le même processus a été appliqué pour les goujons. Les résultats de cette partie sont présentés à l'Annexe 2.

¹ L'assemblage des panneaux lamellés-soudés a été effectué avec des goujons de 96 mm de longueur en raison de la profondeur d'insertion de 50 mm. Pour des insertions de 25 mm de profondeur des goujons de 82 mm de longueur ont été utilisés.

2.5 Équipement pour le soudage par friction rotationnelle

Un banc d'essai expérimental (Figure 2.3) conçu spécifiquement pour le projet par le CRIQ afin de réaliser des panneautages lamellés-soudés a été utilisé pour l'ensemble de cette étude. L'appareil se composait d'un boîtier de contrôle, du système informatique et de la panneauteuse. La panneauteuse comprenait un porte-outil (Figure 2.4) et un système pneumatique. Le boîtier de contrôle permettait la communication avec le porte-outil à partir du système informatique via l'écran de contrôle. Une séquence de soudage typique complète s'effectuait de la façon suivante: 1) installation des baguettes; 2) activation du système de maintien pneumatique des baguettes; 3) installation du goujon dans le porte outil; 4) activation de la séquence de perçage d'un trou dans les baguettes par système à commande numérique; 5) activation de la séquence de soudage du goujon; 6) activation de la séquence de nettoyage de l'excédent du goujon²; 7) retour à la position de départ.

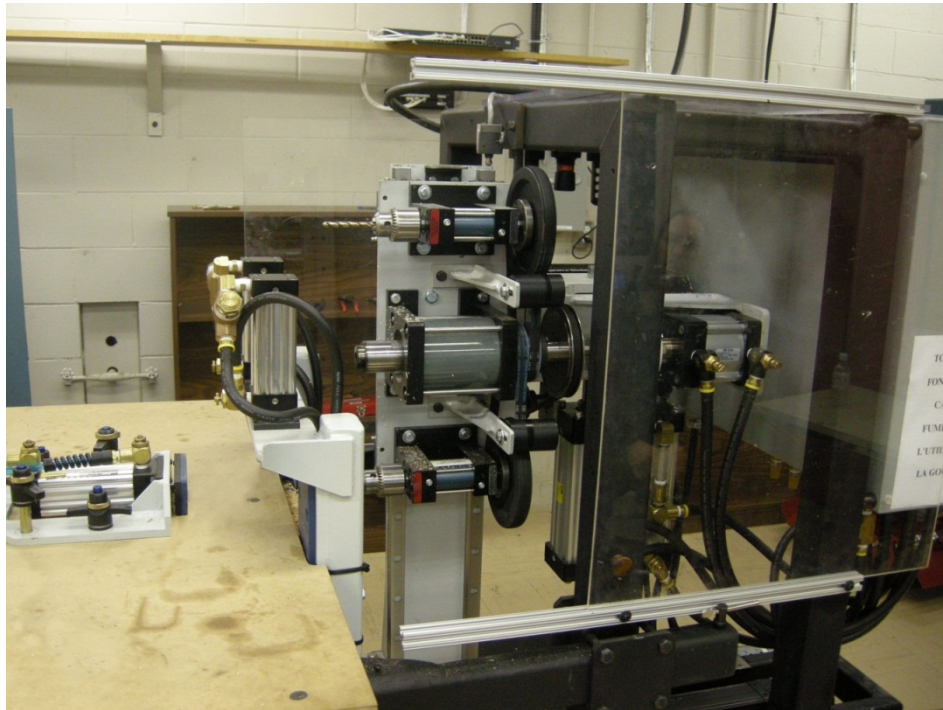


Figure 2.3 Banc d'essai et système pneumatique pour le soudage par friction rotationnelle.

² Pour la phase de détermination des paramètres de soudage optimaux, l'excédant du goujon était préservé pour fournir une prise lors des essais d'arrachement.

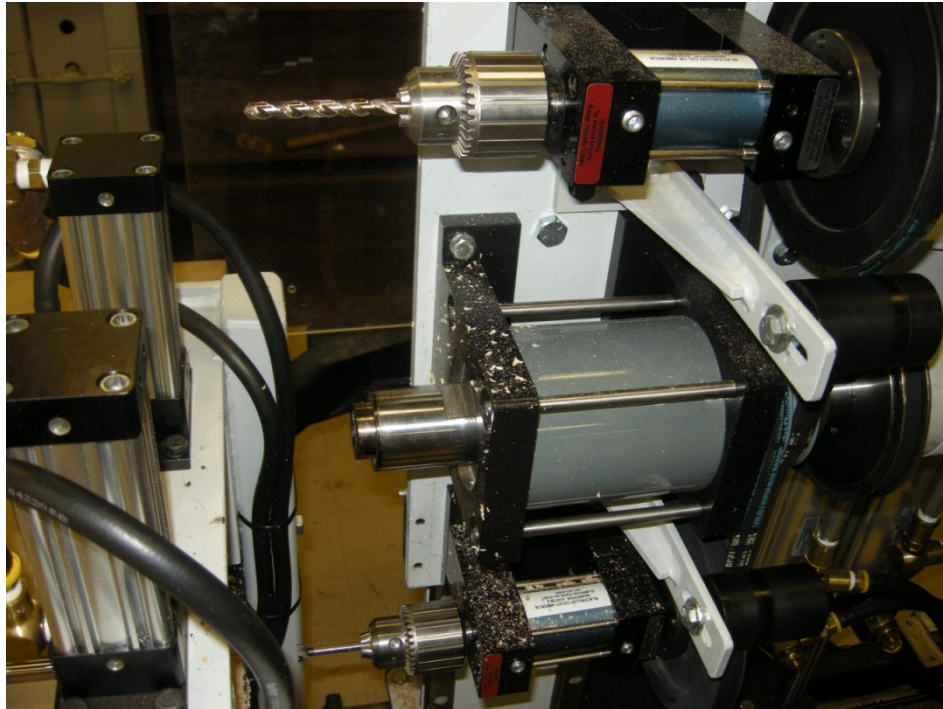


Figure 2.4: Porte-outil monté sur axe rotatif comprenant (de haut en bas) la mèche pour le perçage, le mandrin dans lequel le goujon est inséré pour le goujonnage et l'outil de nettoyage pour enlever l'excédent de goujon.

2.6 Détermination des paramètres optimaux de soudage

2.6.1 Essais préliminaires

Des essais mécaniques en traction appliqués à la zone de soudage ont été effectués afin de définir le plan d'expérience pour la détermination des paramètres de soudage optimaux pour chacune des essences. Les objectifs étaient de 1) vérifier la faisabilité du soudage pour les paramètres à l'étude afin d'établir le plan d'expérience; 2) valider la fiabilité du banc d'essai et des composants en bois.

Les capacités mécaniques du banc d'essai étaient les suivantes:

- Vitesse de rotation du goujon: 500 à 6000 tours min^{-1} ;
- Vitesse d'insertion du goujon: 0 à 40 mm s^{-1} .

Des éprouvettes ont donc été préparées pour l'ensemble des paramètres de soudage possibles. Une fois les soudages réalisés, les éprouvettes ont été usinées au moyen d'une scie à ruban (Figure 2.5). Chaque éprouvette se composait d'un goujon soudé à un substrat de bois (Figure 2.6).

De par la nature de leur utilisation, la propriété la plus importante d'un adhésif s'avère sa résistance face au cisaillement (ASTM 1999). Cet adhésif prend ici la forme d'un joint de soudage et un montage visant à étudier cet aspect a été retenu afin de déterminer les paramètres de soudage optimaux. La résistance à la traction linéaire des soudages a été déterminée au moyen d'une machine universelle MTS Alliance RT/50 50 kN (± 5 N) (MTS Systems Corporation, Eden Prairie, MN) (Figure 2.7) et du logiciel Testworks 4 selon la norme ASTM D 1037 (ASTM 2006).



Figure 2.5 Préparation des éprouvettes suite au soudage en prévision des essais en traction.

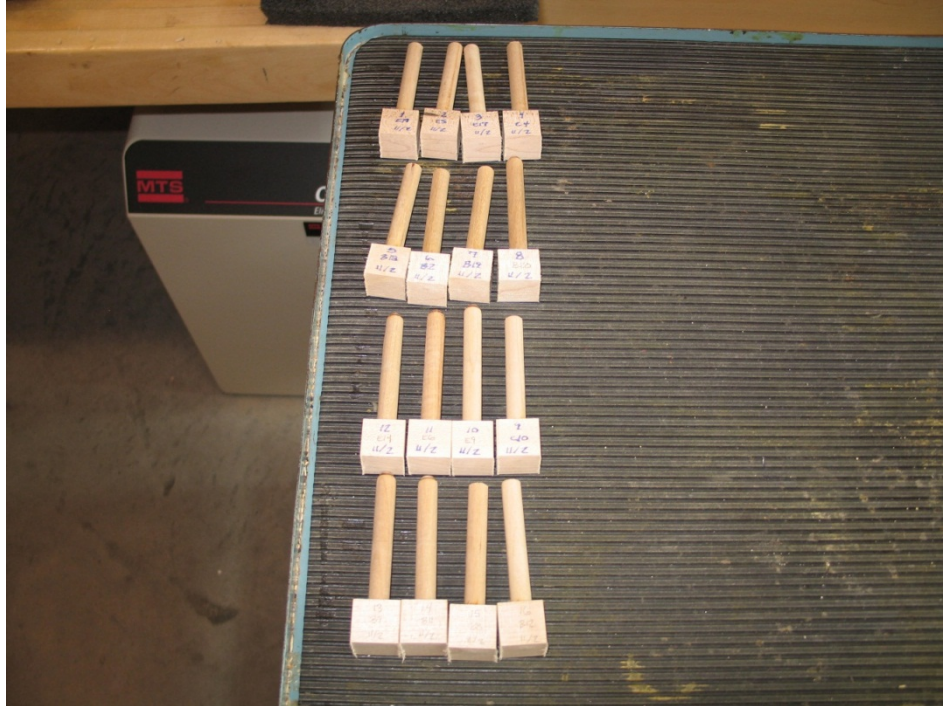


Figure 2.6 Éprouvettes pour les essais préliminaires de traction.

Le montage pour les essais en traction se composait d'un mandrin (*chuck*) afin de retenir le goujon et d'une prise (*gripping device*) pour permettre l'arrachement du goujon du substrat en chargement axial (Figure 2.8). Le mandrin devait permettre la réalisation complète de l'essai en traction sans arrachement de fibres sur le goujon au niveau du mandrin. Les goujons ont été arrachés du substrat à un taux de chargement de 2 mm min^{-1} (ASTM 2009). À partir de la charge maximale observée et de la surface de soudage, la force à l'arrachement a été calculée à partir de l'équation 42 présentée au Chapitre 3.

Une vitesse d'insertion trop lente ($<12,5 \text{ mm s}^{-1}$) et/ou une vitesse de rotation trop élevée ($>2500 \text{ tours min}^{-1}$) ont entraîné une carbonisation du matériel ligneux à l'interface de soudage (Figure 2.9). À l'inverse, une vitesse d'insertion trop rapide ($>25,0 \text{ mm s}^{-1}$) et/ou une vitesse de rotation trop lente ($<1000 \text{ tours min}^{-1}$) n'ont pas permis de produire un joint soudé ou encore une insertion complète du goujon dans le substrat.



Figure 2.7 Montage pour les essais mécaniques préliminaires en traction linéaire.

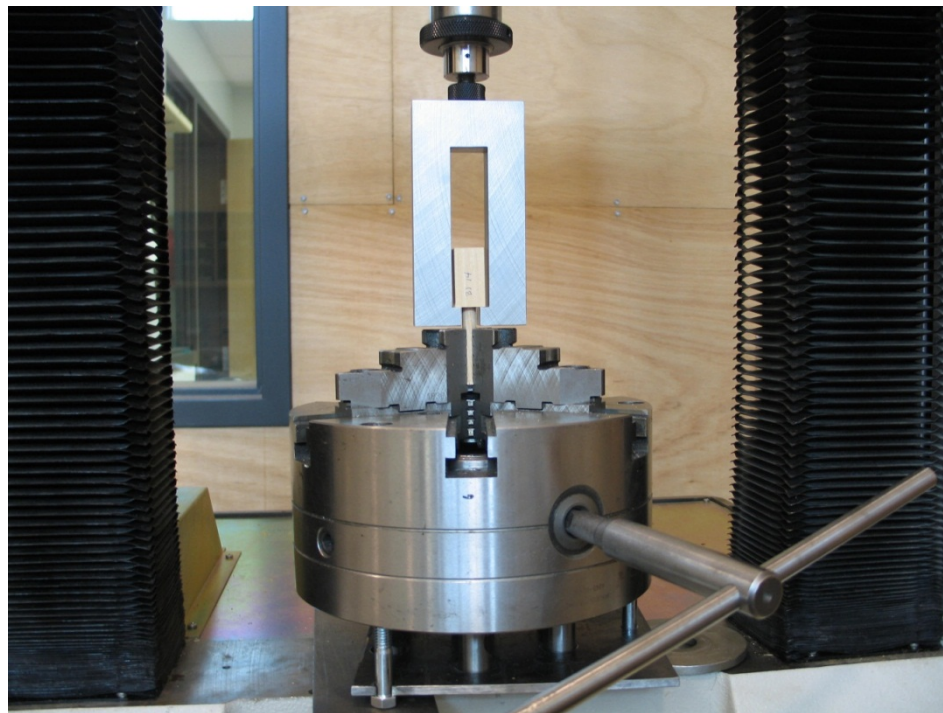


Figure 2.8 Éprouvette installée dans le montage pour les essais mécaniques préliminaires en traction linéaire.



Figure 2.9 Exemples de goujonnage inadéquats: interface de soudage fortement carbonisée (goujon à l'extrême gauche); insertion incomplète en raison de paramètres de soudage inadéquats (2^e goujon en partant de la gauche).

Les conclusions suivantes ont pu être tirées à partir des essais préliminaires pour les assemblages soudés:

- Un système de prise inspiré de la norme ASTM D1761 *Standard test methods for mechanical fasteners in wood* (ASTM 2000) a été privilégié pour le montage en traction (Voir Figure 3.1). Cette modification a été effectuée afin d'offrir une plus grande surface d'application de charge sur le substrat.
- Dans la mesure où les résultats préliminaires en traction se sont avérés inférieurs à 5 kN, une machine universelle MTS QT 5 kN (MTS Systems Corporation, Eden Prairie, MN), plus précise (± 2 N), a été utilisée pour les essais subséquents.
- Les vitesses de rotation de 1000, 1500 et 2500 tours min^{-1} ont été retenues afin d'avoir une valeur optimale probable et deux extrêmes dans le but de faciliter

l'analyse des résultats et d'enlever un effet parasite durant les manipulations pour voir l'effet quadratique ou linéaire généralement associé à ce type d'essai.

- Les vitesses d'insertion de 12,5, 16,7 et 25,0 mm s⁻¹ ont été retenues pour les raisons mentionnées plus tôt.
- Une modification du ressort à l'intérieur du mandrin a été effectuée afin d'améliorer la prise sur le goujon durant le soudage. Cette modification visait à assurer une vitesse rotationnelle constante pendant l'insertion du goujon.

2.6.2 Détermination des paramètres de soudage optimaux

Un banc d'essai conçu spécifiquement pour le projet par le CRIQ a permis d'étudier l'influence du fil du bois, la vitesse de rotation, l'angle d'insertion et la vitesse d'insertion sur la qualité du soudage pour deux espèces canadiennes soit l'érable à sucre (*Acer saccharum*) et le bouleau jaune (*Betula alleghaniensis*).

Les paramètres à l'étude dans le cadre de phase étaient:

1. La vitesse de rotation du goujon: 1000, 1500 et 2500 tours min⁻¹;
2. La vitesse d'insertion du goujon: 12,5 mm s⁻¹, 16,7 mm s⁻¹ et 25,0 mm s⁻¹;
3. L'angle d'insertion par rapport au fil du bois (insertion tangentielle à 0° ou encore radiale à 90° (Figure 2.10).
4. L'essence: érable à sucre et bouleau jaune.

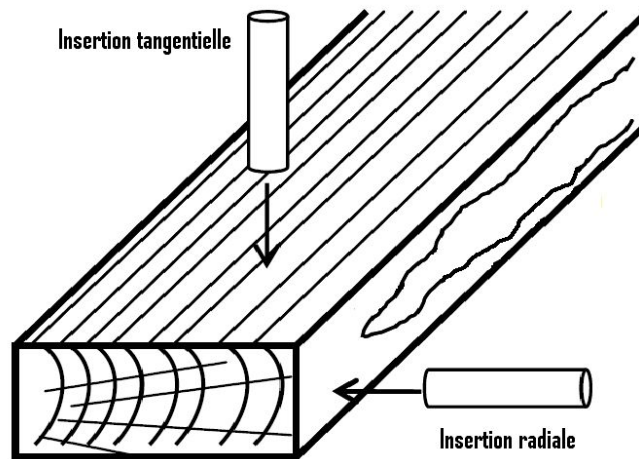


Figure 2.10 Angle d'insertion des goujons par rapport aux cernes annuels du bois.

Dix répétitions pour chacune des combinaisons de facteurs (36) ont été effectuées pour un total de 360 soudages. Afin de limiter l'effet intra pièce, une combinaison de facteurs n'a été effectuée qu'une seule fois sur une même baguette.

La dimension des baguettes était de 30 mm x 30 mm x 400 mm. Tout le matériel a été préalablement conditionné à 20°C et 60 HR en chambre climatique. Le matériel a été sélectionné avec soin afin d'être libre de défaut pouvant altérer nos résultats. Les baguettes ont été usinées suivant le fil du bois. Des goujons industriels lisses de 9,68 mm de diamètre et 82 mm de longueur ont été utilisés. L'essence des goujons était la même que celle de la baguette utilisée. Ainsi, pour le soudage d'un goujon d'érable à sucre une baguette d'érable à sucre était utilisée et vice versa pour le bouleau jaune. Les goujons ont été insérés dans des trous pré-perçés de 7,67 mm de diamètre avec une profondeur de 25 mm. Des essais mécaniques en traction appliqués à la zone de soudage ont été effectués afin de définir les paramètres de soudage optimaux pour chacune des essences (Voir Figure 3.1). Les résultats de cette section sont présentés au Chapitre 3.

2.6.3 Mesure de la température à l'interface de soudage

Une étude a été menée afin d'analyser l'effet des différents paramètres de soudage sur la température à l'interface de soudage. Une analyse factorielle tenant compte de l'essence

(bouleau jaune et érable à sucre), de la vitesse de rotation du goujon lors de l'insertion (1000, 1500 et 2500 tours min^{-1}) et de la vitesse d'insertion du goujon (12,5, 16,7 et 25,0 mm s^{-1}) a été effectuée. Les insertions étaient d'une profondeur de 25 mm.

Au total 192 mesures de température ont été effectuées soit un minimum de 5 répétitions par combinaison. Un système d'acquisition (Strainsmart 5000, Vichay micro-measuremnts, Raleigh, NC, États-Unis) muni de thermocouples a été utilisé pour effectuer les prises de mesure (Figure 2.11). Des thermocouples de type T ont été retenus puisque ceux-ci ne requièrent pas de calibration jusqu'à des températures de 400 °C. Ce système offrait l'avantage d'être très sensible et permettait de prendre 100 mesures par seconde. Il a de plus été utilisé avec succès lors d'une étude antérieure par Rodriguez et al. (2010) pour le même type d'analyse. Les thermocouples ont été insérés dans des trous préalablement percés de 0,87 mm de diamètre à 1 mm et 2 mm par rapport à la profondeur d'insertion des goujons (Voir Figure 3.2). Les résultats de cette section sont présentés au Chapitre 3 ainsi qu'à l'Annexe 3.



Figure 2.11 Montage pour les essais de détermination de la température à l'interface de soudage.

2.7 Conception et fabrication de panneau lamellé-soudé

2.7.1 Étude préliminaire

Des essais en tractions linéaires sur des assemblages soudés composés de deux baguettes et de quatre (4) goujons ont été réalisés. Ces essais ont été effectués suite à la détermination des paramètres optimaux de soudage rotationnel pour l'érable à sucre et le bouleau jaune (Chapitre 3). Les objectifs étaient: 1) de valider la faisabilité du soudage par friction pour une profondeur d'insertion de goujon de 50 mm en prévision de la conception de panneaux lamellés-soudés; 2) d'étudier l'effet d'additivité des goujons sur les propriétés mécaniques en traction; 3) d'étudier l'effet de différents modes d'insertion des goujons sur les propriétés mécaniques en traction; 4) d'optimiser les réglages sur le banc d'essai en prévision de la conception de panneaux lamellés-soudés.

Tout le matériel a été préalablement conditionné à 20 °C et 60 HR jusqu'à masse constante. Chaque éprouvette était composée de deux baguettes de 25 mm x 30 mm x 125 mm lamellées-soudées avec quatre goujons de 9,67 mm de diamètre (Figure 2.12). Chaque goujon a été inséré dans un trou pré-percé de 7,67 mm de diamètre à une profondeur d'insertion de 50 mm grâce à la technique de soudage par friction rotationnelle. Aucun mélange entre les essences (baguette & goujon) n'a été effectué pour ces essais. Ainsi, deux baguettes d'une même essence ont été assemblées avec des goujons de la même essence. La distance centre à centre entre les goujons (S_c) tout comme la distance entre le centre du goujon et l'extrémité de la baguette (S_e) étaient de 25 mm. Ces distances ont été préalablement déterminées afin de prévenir la fissuration des baguettes durant le soudage. Les paramètres S_c et S_e ont été inspirés de la norme CSA-086 qui permet de calculer l'espacement entre des goujons ou des boulons à l'intérieur d'une structure d'ingénierie (CSA 2005) et sur l'espacement ayant été utilisé durant la phase de détermination des paramètres optimaux (chapitre 3) alors qu'une distance de 25 mm c'était avérée suffisante. Une distance entre la rive de la baguette et la bordure du goujon de 5 mm a également été prévue. Une insertion de type *zig zag* a été retenue afin de prévenir la formation de fissure dans les baguettes durant l'insertion du goujon au soudage et prévenir une éventuelle délamination entre les goujons durant le cycle de vie d'un assemblage lamellé-soudé (Figure 2.13).

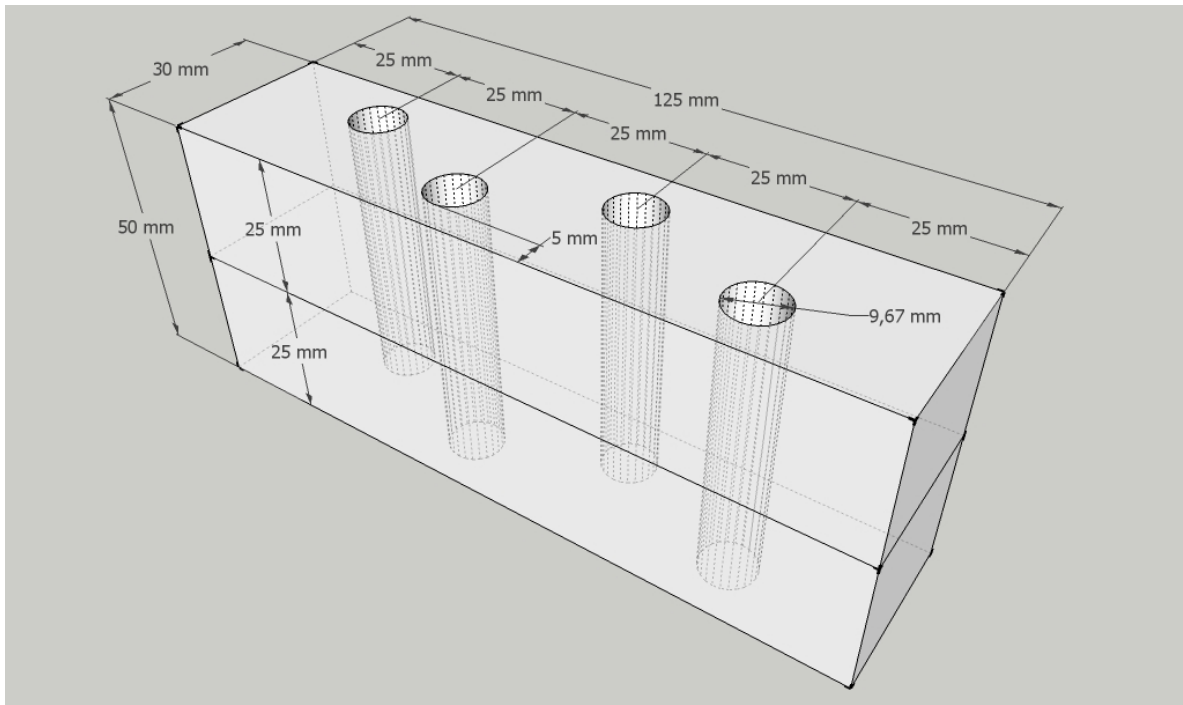


Figure 2.12 Schéma et dimensions d'assemblage soudé pour les essais en traction linéaire.



Figure 2.13 Schéma d'une insertion de type *zig zag*.

Les paramètres de soudage optimaux déterminés pour chaque essence (Chapitre 3) ont été utilisés pour la préparation des assemblages: vitesse rotationnelle de $1000 \text{ tours min}^{-1}$ et vitesse d'insertion de 25 mm s^{-1} pour l'érable à sucre et $1000 \text{ tours min}^{-1}$ à 16 mm s^{-1} pour

le bouleau jaune. Deux variantes de direction d'insertion ont également été étudiées soit une insertion en alternance des quatre goujons (Figure 2.14a) et une insertion unidirectionnelle des quatre goujons (Figure 2.14b).

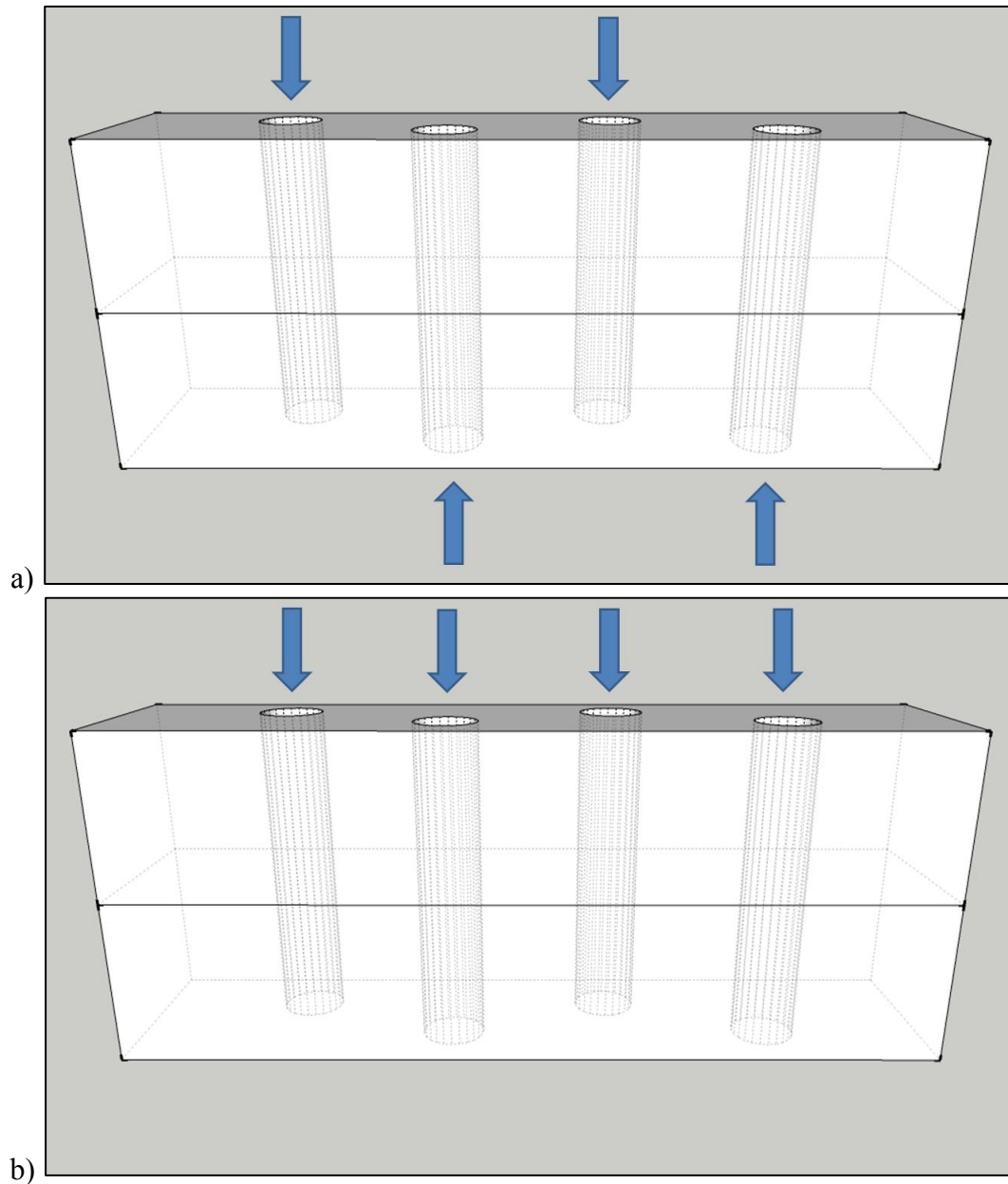


Figure 2.14 Schéma illustrant le sens d'insertion des goujons (flèches bleues) dans les éprouvettes de type assemblage soudé: a) Insertion en alternance des goujons; b) Insertion unidirectionnelle des goujons.

Les essais en traction linéaire ont été effectués à partir d'éprouvettes collées à des plaques de métal au moyen d'un adhésif thermofusible de type polyamide en granule. (Macromelt 3412, Henkel, États-Unis) (Figures 2.15 et 2.16). Ce montage a été inspiré d'essai de cohésion interne pour les panneaux gauffrés (OSB) ou de particules (MDF). Une fois collées, les éprouvettes ont été retournées à 20 °C et 60 HR durant sept jours avant les essais en traction. Les essais en traction ont été réalisés avec une machine à essai universelle MTS Alliance RT/50 (MTS Systems Corporation, Eden Prairie, MN) à un taux de chargement de 2 mm min⁻¹ selon la norme ASTM-D 1037 (ASTM 2006). Six répétitions ont été effectuées tel que présenté dans le plan d'expérience au Tableau 2.2.



Figure 2.15 Éprouvettes pour les essais en traction linéaire d'assemblages soudés.

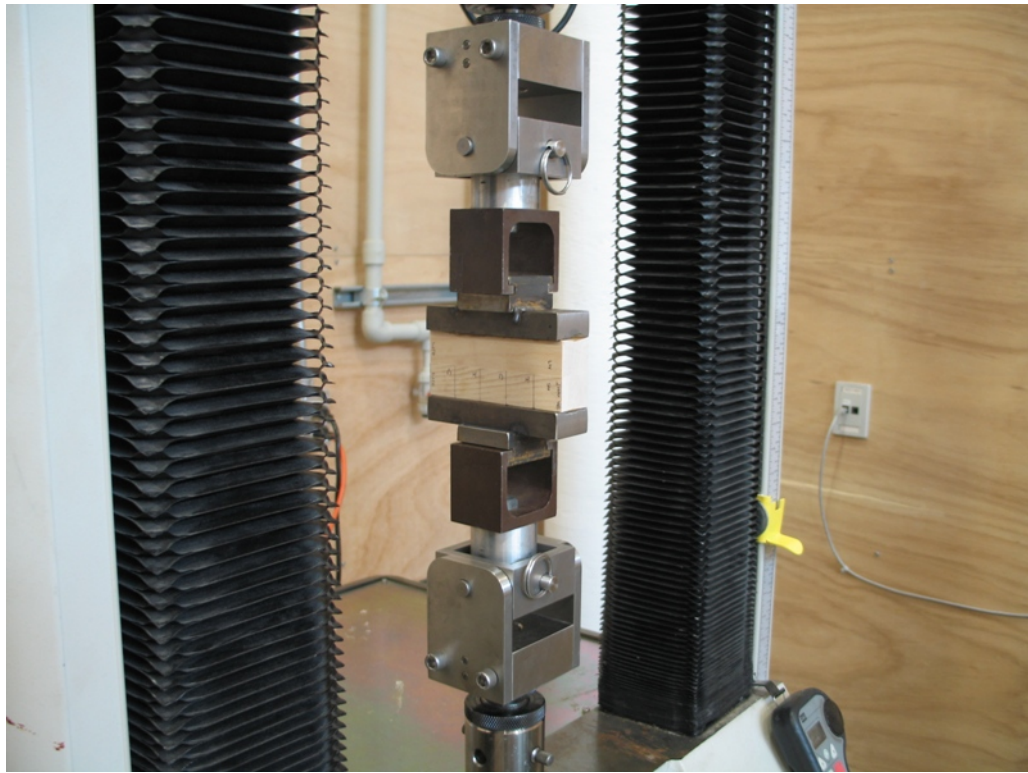


Figure 2.16 Montage pour les essais en traction linéaire d'assemblages soudés.

Tableau 2.2 Plan d'expérience préliminaire d'essai en traction d'assemblages soudés.

Esence	Bouleau jaune				Érable à sucre			
Insertion	Unidirectionnel		Alternance		Unidirectionnel		Alternance	
Répétitions	6	6	6	6	6	6	6	6

Les essais préliminaires en traction linéaire ont été effectués. L'utilisation d'un adhésif thermofusible afin de coller les éprouvettes aux plaques de métal s'est avérée appropriée. La rupture des éprouvettes s'est effectuée généralement par arrachement des goujons. Ceux-ci sont demeurés dans la première baguette (selon le sens d'insertion initial) là où le diamètre du goujon est à son maximum (Figures 2.17 et 2.18). La rupture s'est effectuée à l'interface de soudage (Figure 2.19). Ces observations ont été constatées autant pour les assemblages en insertion unidirectionnelle qu'en alternance. Pour quelques éprouvettes, de

l'arrachement de bois a également été observé suggérant une bonne adhérence du joint soudé (Figure 2.20). Un déplacement des goujons a été observé indiquant une rupture au niveau de l'interface de soudage (Figure 2.21). La Figure 2.21 permet également de constater qu'une grande quantité de matériel en fusion a été expulsé hors de la zone de soudage. Chez les échantillons d'érable à sucre avec une insertion en alternance, la rupture était plus progressive que pour les échantillons en insertion unidirectionnelle qui elle était plus nette (Figure 2.22). Une optimisation du système de maintien pneumatique des baguettes sur le banc d'essai serait nécessaire afin de limiter l'expulsion de matière hors de la zone de soudage. L'ensemble des résultats pour les essais en traction d'assemblages soudés sont présentés à l'Annexe 4.

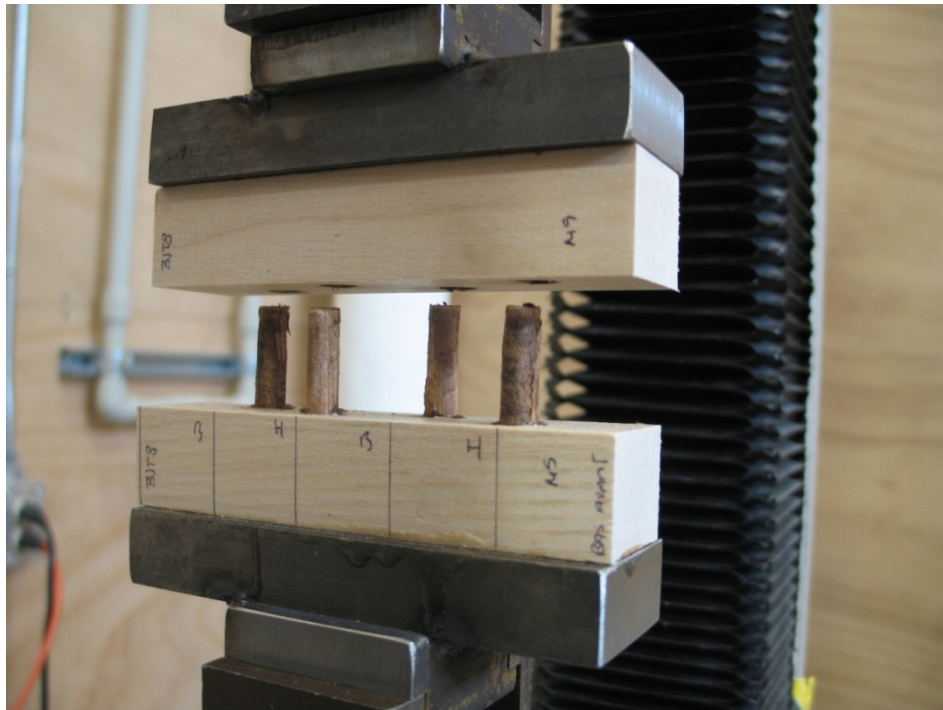


Figure 2.17 Assemblage soudé de bouleau jaune avec insertion unidirectionnelle des goujons suite à un essai en traction linéaire.

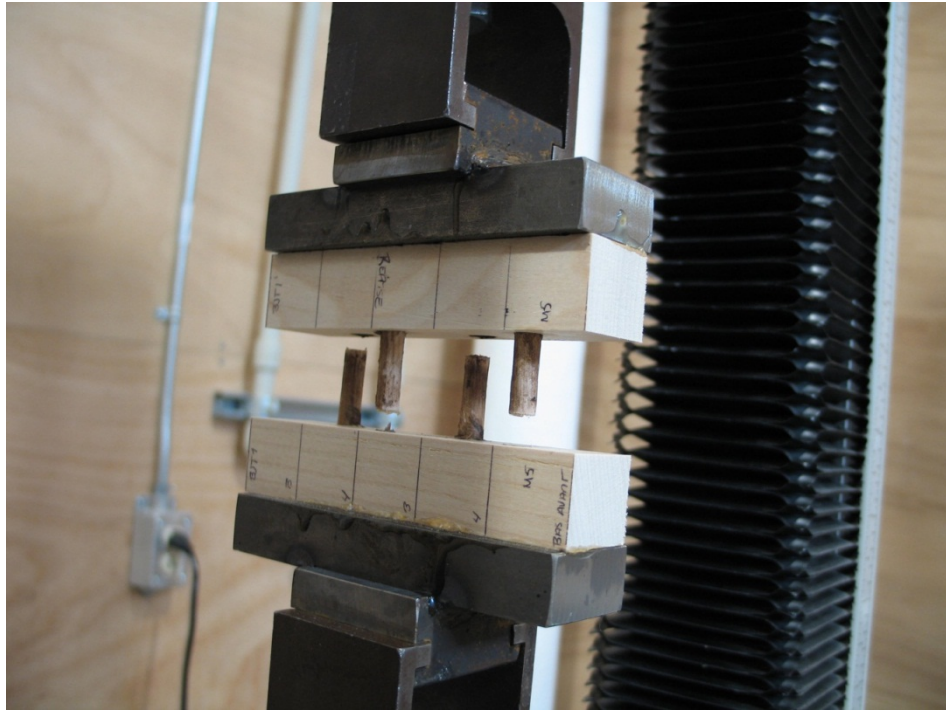


Figure 2.18 Assemblage soudé de bouleau jaune avec insertion en alternance des goujons suite à un essai en traction linéaire.



Figure 2.19 Vue rapprochée d'une section d'assemblage soudé de bouleau jaune avec insertion unidirectionnelle des goujons suite à un essai en traction linéaire.



Figure 2.20 Arrachement de fibre sur un goujon suite à un essai en traction. Assemblage soudé d'érable à sucre avec insertion en alternance des goujons.

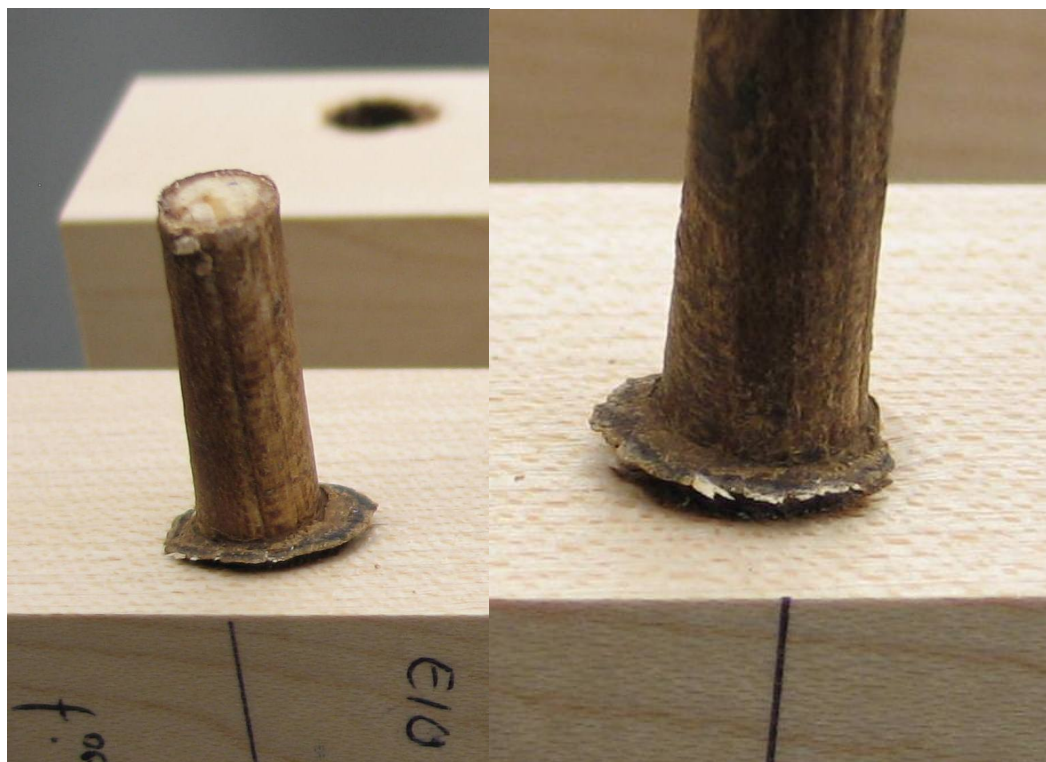


Figure 2.21 Déplacement d'un goujon soudé suite à un essai en traction sur une éprouvette d'érable à sucre.

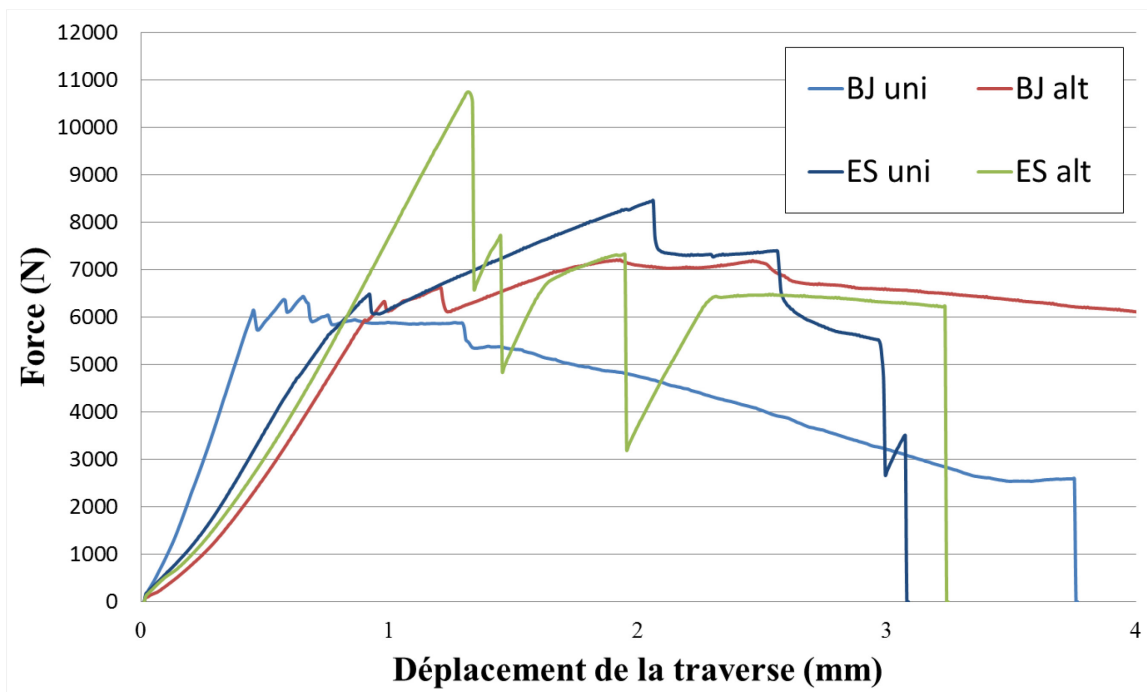


Figure 2.22 Courbes typiques d'essai en traction linéaire d'assemblages soudés en fonction de l'essence et du sens d'insertion des goujons dans les éprouvettes lors du soudage. ES: érable à sucre; BJ: bouleau jaune; uni: insertion unidirectionnelle des goujons; alt: insertion en alternance des goujons.

Une charge maximale en traction de 10,0 kN a été obtenue pour les assemblages d'érable à sucre avec une insertion en alternance des goujons. L'assemblage le moins performant s'est avéré celui de bouleau jaune avec une insertion unidirectionnelle des goujons (6,3 kN). Pour les deux essences étudiées, une insertion en alternance a produit des résultats légèrement supérieurs à une insertion unidirectionnelle des goujons (Tableau 2.3).

Tableau 2.3 Chargement maximale en traction (kN) pour les assemblages soudés en fonction de l'essence et du sens d'insertion des goujons.

Essence/Sens d'insertion	Unidirectionnelle	Alternance
Érable à sucre	9,8 ^a (0,7) ^b	10,0 (0,7)
Bouleau jaune	6,3 (0,8)	7,3 (0,9)

^a Moyenne de six échantillons; ^b Écart-type.

Dans la plupart des cas, la rupture de l'éprouvette s'effectuait à l'interface de soudage. Une fois l'interface de soudage fracturée, les goujons s'arrachaient progressivement de l'une ou l'autre des baguettes selon le type d'insertion. À l'occasion, une rupture par éclatement de goujon a été observée. Ces observations suggèrent que la force de cisaillement à l'interface serait le principal indicateur de la résistance des assemblages en traction linéaire.

Une ANOVA a été effectuée sur les résultats d'essai en traction à l'aide du logiciel statistique Design-Expert 6.0.4 (MN, États-Unis). Un effet très significatif de l'essence sur la résistance en traction linéaire des assemblages a été observé. Le sens d'insertion des goujons ne s'est pas avéré un facteur significatif sur la résistance en traction des assemblages malgré les tendances observées. Les résultats de l'analyse des variances sont présentés au Tableau 2.4.

Le calcul de la contrainte à l'arrachement pour les assemblages soudés s'est avéré le même que celui utilisé pour la détermination des paramètres optimaux (Chapitre 3, équation 42) à la différence que la surface (S) devait tenir compte du nombre de goujons (4). S est alors déterminé à partir de la formule suivante:

$$S = N(2\pi r h) \quad [40]$$

où N : nombre de goujons; r : rayon du goujon; h : profondeur d'insertion du goujon. La contrainte à l'arrachement pour chacun des assemblages est présentée au Tableau 2.5.

Tableau 2.4 ANOVA de l'effet de l'essence et du sens d'insertion des goujons sur les propriétés mécaniques d'assemblages soudés en arrachement.

Facteur	Valeur de F	Prob > F
Essence	64,54	<0,0001
Sens d'insertion	2,43	0,1358

Tableau 2.5 Contrainte à l'arrachement (MPa) en traction linéaire d'assemblages soudés en fonction de l'essence et du sens d'insertion des goujons.

Sens d'insertion\Essence	Bouleau jaune	Érable à sucre
Insertion unidirectionnelle ↓↓	1,31 ^a (0,17) ^b	1,79 (0,45)
Insertion en alternance ↓↑	1,51 (0,19)	2,08 (0,15)

^a Moyenne de six échantillons; ^b Écart-type.

En comparant les résultats obtenus pour les assemblages en traction à ceux présentés au Chapitre 3 sur des échantillons composés d'un seul goujon nous constatons que les valeurs obtenues pour les assemblages sont moins élevées et ce, malgré une augmentation de la surface de soudage. Une explication possible de cette différence serait une variation de la contribution des différentes zones établie en fonction de la profondeur d'insertion sur la résistance totale de l'assemblage. Ainsi la contribution des différentes zones de l'interface de soudage pourrait varier selon la profondeur d'insertion du goujon. Une plus grande surface de soudage n'entraînerait pas systématiquement une meilleure résistance en traction de l'assemblage. Cette diminution de contribution des zones plus en profondeur porte à croire que la limite de profondeur maximale pour un soudage rotationnel optimal serait plus près de 25 mm que 50 mm. Ainsi, au-delà d'une certaine profondeur d'insertion, il n'y aurait plus d'augmentation de la surface de soudage effective contribuant à la cohésion entre les pièces soudées. Pour une vitesse d'insertion fixe, une insertion de 50 mm comparativement à une insertion de 25 mm entraînerait une augmentation du temps d'exposition à des températures élevées et donc une plus grande dégradation du matériel ligneux à l'interface.

En résumé, les conclusions suivantes peuvent être tirées à partir des essais préliminaires pour des assemblages soudés:

- Tenir compte de l'aspect *profondeur d'insertion du goujon* lors du prélèvement du matériel soudé pour la portion de caractérisation de l'interface de soudage. Effectuer les prélèvements toujours à un même niveau prédéterminé.

- Une profondeur d'insertion de goujon de 50 mm a permis de souder convenablement des composantes en vue de la conception de panneaux lamellés-soudés.
- La configuration des goujons dans les assemblages s'est avérée adéquate alors qu'aucune fissure dans les baguettes n'a été observée.
- L'ajout de goujons dans un assemblage en traction permet d'augmenter la charge maximale à la rupture. Cependant, une augmentation de la profondeur d'insertion n'augmenta pas systématiquement la contrainte maximale en traction de celui-ci.
- Le sens d'insertion des goujons (unidirectionnel ou en alternance) n'a pas d'effet significatif sur les propriétés mécaniques en traction d'assemblage soudé.
- Le système de maintien pneumatique des baguettes sur le banc d'essai a été optimisé afin de réduire la quantité de matière expulsée hors de la zone de soudage entre les 2 baguettes en prévision de la conception des panneaux lamellés-soudés.

2.7.2 Fabrication des panneaux lamellés-soudés

Douze panneaux lamellés-soudés de 30 mm x 225 mm x 300 mm ont été fabriqués pour chacune des essences étudiées à partir du banc d'essai automatisé (Figures 2.23 et 4.1). Deux séries de paramètres pour le soudage ont été appliquées basées sur les résultats obtenus durant la phase d'optimisation (Chapitre 3): vitesse rotationnelle de 1000 tours min^{-1} et vitesse d'insertion de 25 mm s^{-1} pour l'érable à sucre et 1000 tours min^{-1} à 16 mm s^{-1} pour le bouleau jaune. Des goujons commerciaux lisses d'érable à sucre et de bouleau jaune de 9,67 mm de diamètre et 96 mm de longueur ont été insérés dans des trous pré-perçés de 7,67 mm de diamètre à une profondeur d'insertion de 50 mm afin de joindre deux baguettes adjacentes. Aucun mélange entre les essences (baguette & goujon) n'a été effectué pour ces essais. L'espacement entre les goujons (S_c) était de 50 mm et de 25 mm entre le dernier goujon et l'extrémité du panneau (S_e). Une insertion de type *zig zag* des goujons avec une distance entre la rive de la baguette et la bordure du goujon de 5 mm a

également été prévue. Après l'insertion du goujon, l'excédent était nettoyé avec le banc d'essai au moyen d'un foret. Avec la même procédure, des baguettes supplémentaires ont été attachées en décalant la rangée de goujonage de 25 mm (Figure 2.24). Une fois assemblé, les panneaux ont été retournés à 20 °C et 60 HR durant sept jours.



Figure 2.23 Panneaux lamellés-soudés conçus à partir de la technique de soudage du bois par friction rotationnelle et agrandissement d'une vue de coupe d'un assemblage composé de deux baguettes soudées à l'aide d'un goujon.

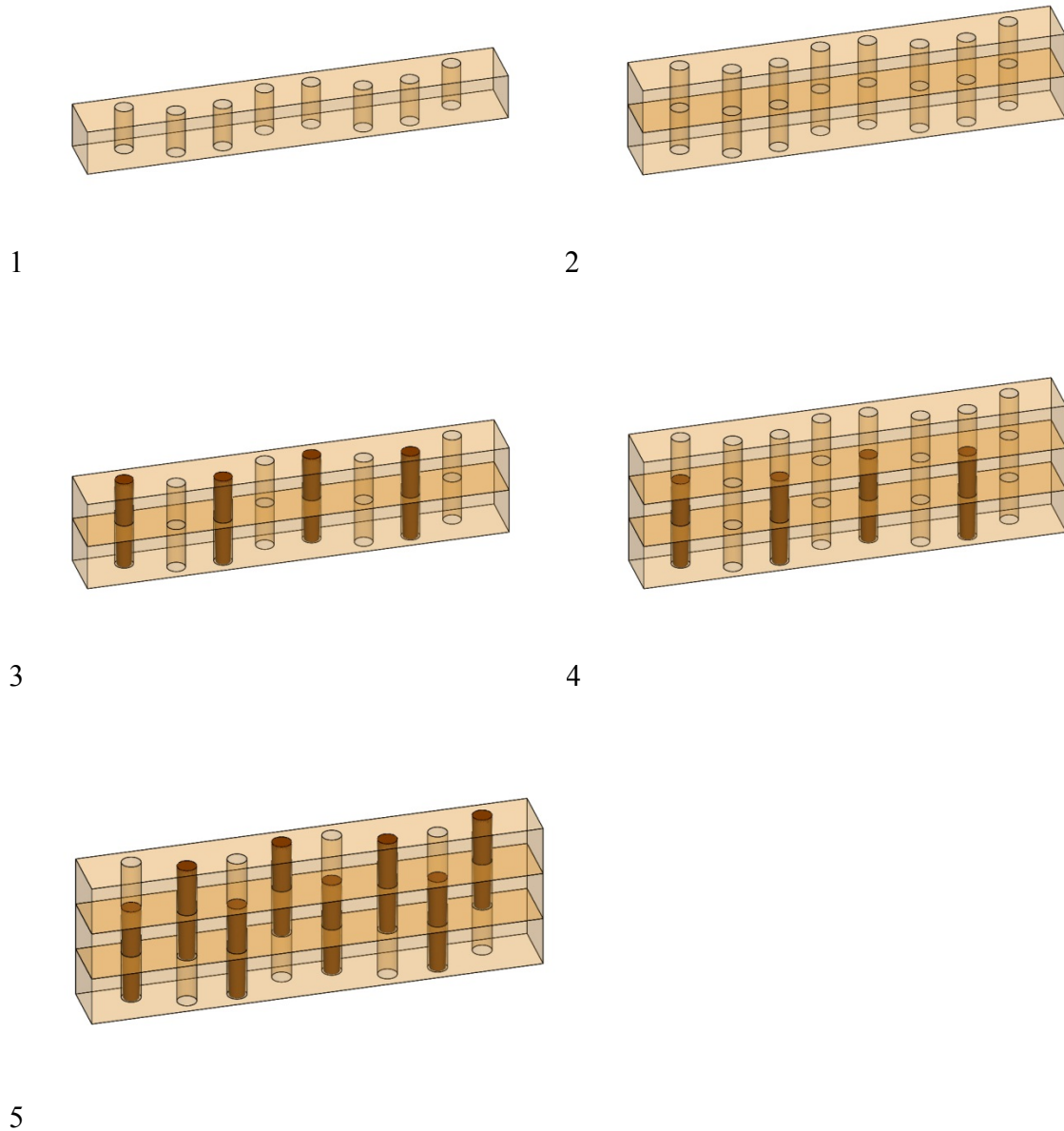


Figure 2.24 Étapes d'assemblage d'un panneau lamellé-soudé.

2.7.3 Fabrication des panneaux lamellés-collés

Des panneaux lamellés-collés de même dimension que les panneaux lamellés-soudés ont été préparés pour fins de comparaison. L'assemblage de ces panneaux a été effectué chez

EQMBO-Entreprises en se basant sur les méthodes de panneautage utilisées dans l'industrie du meuble. Une émulsion de type acétate de polyvinyle (Resicol 360, Halltech, Scarborough, Canada) a été appliquée manuellement avec un rouleau en mode simple face à raison d'un film de 0,127 mm d'épaisseur sur le chant des baguettes. Le pressage des panneaux a été effectué dans une serre de type araignée pour une durée de deux heures (Figures 2.25 et 2.26). Les éléments à coller sous presse ne sont maintenus, en général, que pendant la durée minimale nécessaire pour assurer une tenue de collage permettant la manipulation des panneaux à assembler. Dans le cas présent, le temps de prise était d'environ 30 à 60 minutes à température ambiante (20 °C). Le passage de l'état liquide à l'état solide ou durcissement des acétates de polyvinyle s'est effectué par évaporation de l'eau vers l'air ambiant ou encore par diffusion à l'intérieur du bois.



Figure 2.25 Insertion d'un panneau lamellé-collé dans une serre une fois l'application de l'adhésif effectuée.

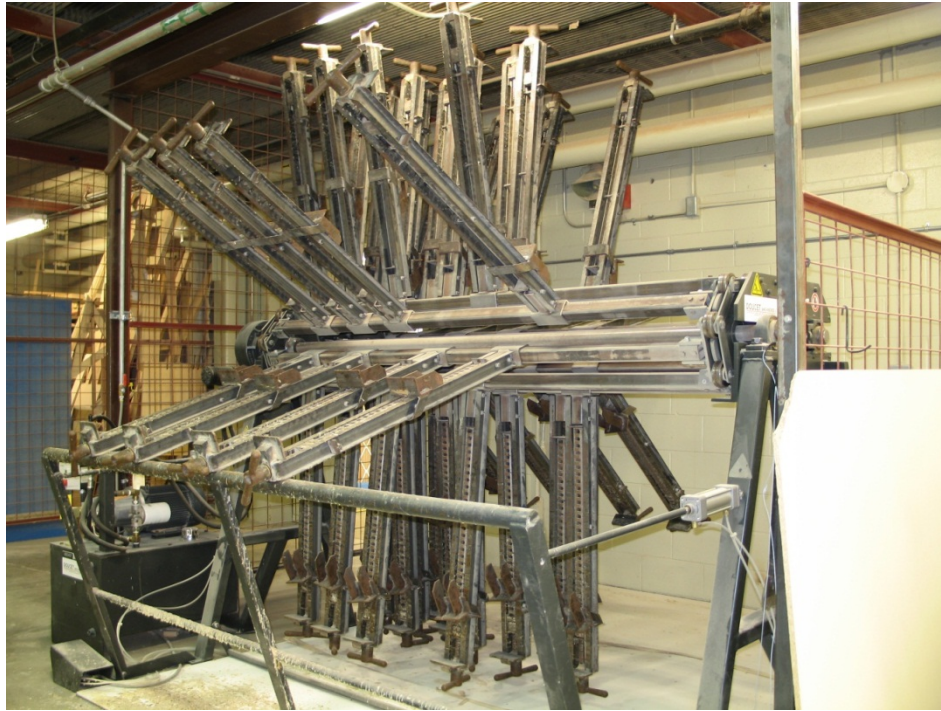


Figure 2.26 Serre de type araignée utilisée pour la préparation des panneaux lamellés-collés.

Les panneaux ont ensuite été conditionnés à 20 °C et 60% HR pendant 7 jours. Le conditionnement visait à éliminer l'excédent d'humidité apportée par la colle et de répartir l'humidité restante de façon régulière dans le bois. Le temps de conditionnement a également permis à la colle de parvenir à un durcissement complet et ainsi atteindre sa résistance maximale avant d'être usinée ou testée. Enfin, le conditionnement a permis d'éliminer ou de répartir de façon régulière les éventuelles tensions développées dans l'assemblage. Une fois conditionnés, les panneaux ont été sablés afin d'obtenir une surface lisse au moyen d'une sableuse à bandes larges. Des sablages avec un grain 80 puis 100 ont été utilisés afin de prélever un peu moins de 0,5 mm.

2.7.4 Essai de flexion statique en 3 points

Une fois la caractérisation des propriétés mécaniques complétée, les premiers panneaux lamellés-soudés conçus à partir d'essences canadiennes ont été assemblés. Des essais de flexion statique en 3 points ont été effectués sur les panneaux lamellés-soudés et lamellés-collés afin d'étudier leur comportement en réponse à une sollicitation mécanique (Voir

Figure 4.6). Ces essais ont fournis de l'information sur la rigidité et la résistance des panneautages. Les essais ont été effectués selon la norme ASTM D1037 (ASTM 2006)

Quelques détails concernant l'essai en flexion statique :

- Machine à essai universelle MTS QT 5 kN (MTS Systems Corporation, Eden Prairie, MN);
- Distance entre les appuis (*span*) de 25,5 cm;
- Vitesse d'application de la charge de 2 mm min⁻¹.

2.7.5 Cycle de conditionnement

Un séjour en caisson climatiseur a été réalisé afin d'évaluer la stabilité dimensionnelle des panneaux lamellés-soudés dans des conditions atmosphériques variables et de les comparer avec leur équivalent collé. Cet exercice a permis de vérifier la tenue des panneautages dans des conditions reflétant celles retrouvées à l'intérieur des maisons au Québec. L'objectif spécifique ici était de s'assurer que les assemblages lamellés-soudés préservent leur apparence visuelle initiale et ce, malgré des conditions de vie utile difficiles.

Une fois les panneaux assemblés, une laque claire précatalysée ayant un degré de lustre de 95% (Prélak 95%, Les produits Merlin, Daveluyville, Canada) a été appliquée sur la surface des panneautages lamellés-soudés afin de faire ressortir les déformations à l'œil nu. Ce traitement de finition a également été appliqué sur les comparatifs lamellés-collés soumis au même cycle de conditionnement. Au total, six panneaux lamellés-soudés d'érable à sucre et autant de bouleau jaune ont été soumis à un cycle de conditionnement. Trois panneaux comparatifs lamellés-collés de mêmes dimensions ont également été préparés et soumis à ce même type de cycle soit deux d'érable à sucre et un de bouleau jaune.

L'atmosphère humide était une atmosphère de 20°C et 80% HR correspondant aux conditions estivales alors que l'atmosphère sèche était une atmosphère de 20°C et 20% HR pour les conditions hivernales. Les panneautages ont été soumis à un cycle de conditionnement tel que présenté à la Figure 4.7, à savoir: 24 heures à 20°C et 80% HR; 24 heures à 20°C et 20%; 72 heures à 20°C et 80%; 72 heures à 20°C et 20%. Avant de lancer

le cycle de conditionnement, les panneaux ont été inspectés visuellement afin de noter tout potentiel délaminage suite à la conception. Une inspection visuelle a été effectuée tout au long de ce cycle afin d'observer toutes déformations possibles pouvant être produites sur les panneautages.

2.8 Caractérisation de l'interface de soudage

Selon Rowell (2005), les propriétés de surface peuvent être divisées en deux catégories soit physiques et chimiques. Les propriétés physiques de surface incluent notamment la morphologie, la rugosité, la perméabilité et la tension de surface. Les propriétés chimiques, quant à elles, touchent les aspects élémentaires, moléculaires ou fonctionnels.

La caractérisation des propriétés de surface se divise en trois groupes soit microscopique (morphologie de surface), spectroscopique (chimie de surface) et thermodynamique (énergie de surface). La prochaine section traite de la caractérisation spectroscopique.

Cette portion d'étude visait à saisir les aspects fondamentaux du soudage par friction grâce aux méthodes chromatographiques et spectroscopiques. La zone de soudage a ainsi été étudiée afin de comprendre les phénomènes physico-chimiques en cause et de les mettre en relation avec les performances mécaniques des assemblages.

2.8.1 Pyrolyse analytique par chromatographie gazeuse et spectroscopie de masse (Py-GC/MS)

Les méthodes d'analyses thermiques permettent d'évaluer des différentes liaisons créées lors d'une augmentation de la température. La pyrolyse analytique (Py) peut se définir comme la transformation d'un composé non-volatile en un produit de dégradation volatil par la chaleur en absence totale d'oxygène (phase primaire) (Meier et Faix 1992). La pyrolyse entraîne la formation de charbon de bois, de gaz incondensables et de produits pyrolytiques. Une fois pyrolysés, les produits générés par la dégradation des polysaccharides et de la lignine issues du matériel cellulosique ligneux peuvent être séparés puis identifiés par chromatographie gazeuse (GC) et/ou spectroscopie de masse (MS).

La GC permet de séparer les molécules d'un mélange complexe de nature diverses. Elle s'applique principalement aux composés gazeux ou susceptibles d'être vaporisés par

chauffage sans décomposition. Le mélange à analyser est d'abord vaporisé à l'entrée d'une colonne renfermant une substance active solide ou liquide appelée phase stationnaire. Il est transporté à travers celle-ci à l'aide d'un gaz porteur (ou vecteur). Les différentes molécules du mélange vont ainsi se séparer et sortir de la colonne les unes après les autres en fonction de l'affinité de la phase stationnaire avec ces molécules. La MS permet de détecter et d'identifier des molécules selon leur masse et de caractériser leur structure chimique. Le principe réside dans la séparation en phase gazeuse de molécules chargées (ions) en fonction du rapport de la masse sur la charge. Le résultat est un pyrogramme dont chaque pic, caractérisé par son temps de rétention spécifique (durée du séjour d'un composant dans la colonne) est représentatif pour un composant déterminé. La hauteur et l'aire de ces pics donnent également une idée de la concentration des composants libérés (Van Parys 2007).

2.8.1.1 Transformation pyrolytique

La pyrolyse rapide ou *flash* fait généralement référence à une pyrolyse en absence d'oxygène ayant une montée en température de l'ordre de 1000 K s^{-1} . Le terme *rapide* ou *flash* est cependant arbitraire. Les conditions physiques de la pyrolyse rapide de la biomasse telles que la température, le taux de montée en température et le temps de traitement ont un effet significatif sur les produits formés et leur composition. La pyrolyse *flash* est généralement associée à une forte réduction des résidus solides. Une montée rapide en température jusqu'à $650 \text{ }^\circ\text{C}$ favorise la formation d'un produit liquide goudronné, à base de matériel organique et d'eau, et minimise la formation de charbon et de gaz. Au-delà de $650 \text{ }^\circ\text{C}$, la formation de produits gazeux est favorisée au détriment des liquides. Les produits liquides formés sont notamment étudiés dans une optique d'utilisation comme carburant. Les gaz ont quant à eux une valeur calorifique dite plus faible comparativement aux liquides. Homogènes et peu visqueux, la composition chimique des produits liquides est très complexe alors qu'on dénombre des centaines de composants (Doat et Deglise 1982, Horne et Williams 1996).

Le procédé de pyrolyse *flash* offre l'avantage de convertir des résidus ligneux de faible valeur en liquides ayant un potentiel énergétique intéressant ou encore en produits à valeur ajoutée. Le liquide obtenu est un mélange complexe de composés aromatiques et aliphatiques oxygénés. La séparation des produits dans une optique commerciale demeure

toutefois un défi de taille. Le temps de réaction ne dépasse pas quelques millisecondes pour la production de produits chimiques contre 2-3 secondes pour la production de carburant de faible viscosité (Meier et Faix 1999).

La pyrolyse conventionnelle ou lente est caractérisée par un traitement de la biomasse jusqu'à 500 °C durant une période de 5 à 30 minutes (Mohan 2006). Le taux d'accroissement en température y est beaucoup moins élevé que pour la pyrolyse *flash* qui implique un taux de l'ordre de 1 000 à 10 000 °C s⁻¹ à des températures allant jusqu'à 650 °C. Les vapeurs produites ne pouvant pas s'échapper aussi aisément que lors d'une pyrolyse *flash*, celles-ci réagissent les unes avec les autres, aboutissant à la formation de charbon et de liquides. Les produits formés sont sous forme de liquide (60-75%), de solide (15-25% de charbon) et de gaz incondensables (10-20%). Le Tableau 2.6 présente les différentes méthodes de pyrolyse et leurs compositions.

La proportion massique des différents produits formés lors de pyrolyse *flash* à différentes températures sont présentés au Tableau 2.7. La proportion de liquide obtenu est supérieure à 65% pour chacune des températures à l'essai avec un maximum de 67,8% à 550 °C. La

Tableau 2.6 Différentes méthodes pyrolytiques et leurs caractéristiques variables (Mohan 2006).

Technologie de pyrolyse	Temps de traitement	Taux de réchauffement	Température °C	Produits obtenus
Carbonisation	Jours	Très faible	400	Charbon
Conventionnelle	5-30 min	faible	600	Huile, gaz, charbon
Rapide	0,5-5 s	Très rapide	650	Huile
Flash-liquide ^a	< 1 s	Rapide	< 650	Huile
Flash-gaz ^b	< 1 s	Rapide	< 650	Prod. Chim., Gaz
Ultra ^c	< 0,5 s	Très rapide	1000	Prod. Chim., Gaz
Sous-vide	2-30 s	Modéré	400	Huile
Hydro-pyrolyse ^c	< 10 s	Rapide	< 500	Huile
Méthano-pyrolyse ^d	< 10 s	Rapide	> 700	Prod. Chim.

^a Liquide obtenu suite à une pyrolyse pour un temps < 1 s; ^b Matériel gazeux obtenu suite à une pyrolyse pour un temps < 1 s; ^c Pyrolyse en présence d'eau; ^d Pyrolyse avec du méthanol; ^e Pyrolyse avec un taux de dégradation très élevé.

Tableau 2.7 Proportion massique (%) des produits formés suite à la pyrolyse flash de bois en fonction de la température (Horne et Williams 1996).

Température (°C)	Charbon	Liquide	Gaz
400	24,1	65,5	10,2
450	21,4	65,7	11,1
500	18,9	66,0	14,6
550	17,3	67,0	14,9
550	16,7	67,8	15,7
550	17,1	66,2	15,2

production de charbon quant à elle diminue avec une augmentation de la température alors qu'on observe l'inverse pour les produits gazeux. L'augmentation proportionnelle de produit gazeux en fonction de la température s'expliquerait par le craquage secondaire des vapeurs issues de la pyrolyse à haute température.

Les principaux gaz formés lors d'une pyrolyse *flash* sont présentés au Tableau 2.8. La proportion de CO et CO₂ augmente en fonction de la température bien que la production de CO est beaucoup plus prononcée comparativement au CO₂. La proportion de gaz hydrocarbures augmente avec une augmentation de la température de traitement (Horne et Williams 1996, Demirbas 2002).

La composition élémentaire du charbon et de l'huile suite à une extraction de l'eau contenue dans le produit liquide issue de la pyrolyse à différente température est présentée au Tableau 2.9. La température n'influence pas la composition de l'huile. Ceci peut s'expliquer par une température adéquate de décomposition au-delà de 400 °C et un temps

Tableau 2.8 Proportion massique (%) des gaz provenant de la pyrolyse flash du bois en fonction de la température (Horne et Williams 1996).

Température (°C)	CO	CO ₂	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₄	C ₃ H ₈	C ₃ H ₆
400	3,75	6,02	0,02	0,21	0,05	0,05	0,03	0,05
450	4,20	6,32	0,02	0,35	0,05	0,08	0,02	0,08
500	6,76	6,61	0,02	0,58	0,09	0,26	0,05	0,19
550	6,71	6,86	0,02	0,69	0,16	0,26	0,04	0,45

de pyrolyse court ($\sim 2,5$ s) qui limite les réactions secondaires. La concentration en produits hydrocarbures polycycliques aromatiques augmente en fonction de la température mais demeure inférieure à 120 ppm pour une température de pyrolyse de 550 °C. Les liquides contiennent quant à eux une quantité significative de composés phénoliques (Horne et Williams 1996).

Les principaux hydrocarbures aromatiques hydrocarbonés sont présentés au Tableau 2.10. Les composés majeurs présents dans les liquides suite à une pyrolyse sont des composés monocycliques (benzène, toluène, diméthyl-éthylbenzène). Une fois l'eau extraite, la valeur calorifique moyenne des liquides est de 21,2 MJ kg⁻¹ comparativement à 17,7 MJ kg⁻¹ pour le bois à l'état original (Horne et Williams 1996). Pour le liquide provenant de la pyrolyse *flash*, Bridgwater et al. (1999) ont observé une valeur calorifique typique de 22,5 MJ kg⁻¹.

Demirbas (2002) a analysé les produits liquides issus de la pyrolyse *flash* de biomasse. Le méthanol proviendrait de groupement méthoxyle (éther) de l'acide uronique et de méthyle esters de la pectine. L'acide acétique tirerait son origine de l'élimination de groupements acétyles liés à l'origine aux unités xylose pour les xylanes de feuillus.

Le caractère plus prononcé de la lignine guaïacyl de l'érable à sucre expliquerait sa plus grande réactivité lors de la pyrolyse rapide. Cet aspect la rend plus susceptible aux réactions de condensation avec les composés dégradés de type formaldéhyde et furane

Tableau 2.9 Composition massique élémentaire (%) des produits issues de la pyrolyse flash du bois (Horne et Williams 1996).

Température (°C)	C	H	O
<i>Produit liquide après extraction de l'eau</i>			
400	58,1	6,10	34,6
450	58,0	6,24	35,0
500	57,2	6,12	35,2
550	59,6	6,05	33,5
<i>Charbon</i>			
400	68,1	3,23	28,2
450	71,9	3,16	24,2
500	73,0	3,17	22,9
550	71,6	2,65	24,4

libérés par la lignine et les glucides. La présence d'un complexe lignine-glucide nouvellement formé à l'interface de deux pièces de bois suite à un soudage expliquerait la miscibilité améliorée de la lignine et des hémicelluloses (les xylanes chez les feuillus). Cependant, les changements chimiques dans la structure de la lignine lors du soudage ne seraient pas uniquement basés sur le ratio S/G (Tableau 2.11).

Tableau 2.10 Concentration (ppm) des composés aromatiques présents dans les huiles issues de la pyrolyse à différentes températures (Horne et Williams 1996).

	Température (°C)			
	400	450	500	550
Benzène	7	14	55	97
Toluène	5	12	35	67
Diméthylbenzène	1	1	2	7
Ethylbenzène	2	2	7	24
Triméthylbenzène	5	5	7	9
Dihydroindène	<1	<1	<1	4
Indène	2	3	6	2
Benzofurane	1	2	4	10
Méthylbenzofurane	3	2	5	13
Tétraméthylbenzène	<1	<1	<1	<1
Méthylindène	<1	<1	<1	2
Naphthalène	3	5	4	11
Méthyl-naphthalène	3	4	9	14
Biphényle	1	1	1	2
Acénaphthène	<1	1	1	3
Diméthyl-naphthalène	3	5	9	15
Triméthyl-naphthalène	<1	3	5	7
Tétraméthyl-naphthalène	<1	<1	<1	<1
Fluorène	<1	<1	1	1
Méthylfluorène	<1	<1	1	<1
Phénanthrène	3	5	6	11
Anthracène	2	2	4	6
Diméthylfluorène	<1	<1	<1	<1
Méthylphénanthrène	7	7	10	16
Diméthylphénanthrène	3	7	8	12
Triméthylphénanthrène	<1	1	1	2
Tétraméthylphénanthrène	<1	<1	<1	2
Pyrène	<1	<1	<1	1
Méthylpyrène	<1	<1	<1	<1
Diméthylpyrène	<1	<1	<1	<1
Chrysène	<1	<1	<1	<1
Méthylchrysène	<1	<1	<1	<1
Benzopyrène	<1	<1	<1	<1

ppm: particules par million.

Tableau 2.11 Proportion (%) de lignine et de produits glucosiques obtenus pour le bois de référence et lors du soudage chez le bouleau jaune et l'érable à sucre par pyrolyse GC/MS (Sun et al. 2010).

	Érable à sucre		Bouleau jaune	
	Référence	Matériel soudé	Référence	Matériel soudé
Unité G	22.0 (1.2) ^a	20.3 (3.0)	14.9 (1.0)	16.3 (1.6)
Unité S	50.2 (1.2)	47.6 (2.1)	46.6 (2.4)	45.6 (2.7)
C	27.8 (1.8)	32.1 (2.7)	38.6 (3.2)	38.1 (2.2)
S/G	2.3 (0.2)	2.2 (0.1)	3.1 (0.1)	2.8 (0.4)
L/C	2.6 (0.2)	2.1 (0.3)	1.6 (0.2)	1.6 (0.2)

^a Écart type; Unité G: lignine de type guaiacyl; Unité S: lignine de type syringyl; L: lignine; C: Glucides.

Une analyse a été effectuée au moyen de la méthode Py-GC/MS afin de déterminer les modifications chimiques à l'interface lors du soudage pour chacune des essences. Les échantillons, sous forme de 1 à 2 mg de sciure, ont été prélevés par grattage avec une lame à l'interface de soudage (*WM* pour *welding material*) et dans la zone de référence dite sans traitement thermique (*Ref* pour *Reference material*) (Voir Figure 5.1). Trois échantillons *Ref* et trois échantillons *WM* ont été pyrolysés pour chacune des essences.

La vitesse de montée en température et la température maximale ont préalablement été déterminées grâce au système d'acquisition couplé à des thermocouples durant les essais de détermination des paramètres optimaux (Chapitre 3 et Annexe 3). Les échantillons ont été pyrolysés à 550 °C sous atmosphère d'hélium en utilisant un pyrolyseur Pyroprobe 2000 (CDS analytical, PA, États-Unis) couplé à un chromatographe en phase gazeuse (GC) (Varian CP 3800) et un spectromètre de masse (MS) (Varian Saturn 2200 MS / MS, 30-650 uma) (Figure 2.27). Le débit du gaz vecteur est de 1,0 ml min⁻¹. L'interface de pyrolyse et l'injecteur GC ont été maintenus à 250 °C. Les produits de pyrolyse ont été séparés à l'aide d'une colonne capillaire FactorFour Varian (VF-5 ms, 30 m x 0,25 mm x 0,25 µm). La pyrolyse a été réalisée à partir de 250 °C jusqu'à la température de pyrolyse (30 s) avec une vitesse de chauffage de 6 °C ms⁻¹. Le four GC a été maintenu à 45 °C pendant 4 minutes, puis chauffé à 280 °C à 4 °C min⁻¹. La température finale a été maintenue pendant 15 minutes. Le spectromètre de masse a été utilisé en mode impact électronique avec une énergie de 70 eV et la gamme de masse m/z 35-450 (Sun et al. 2010).

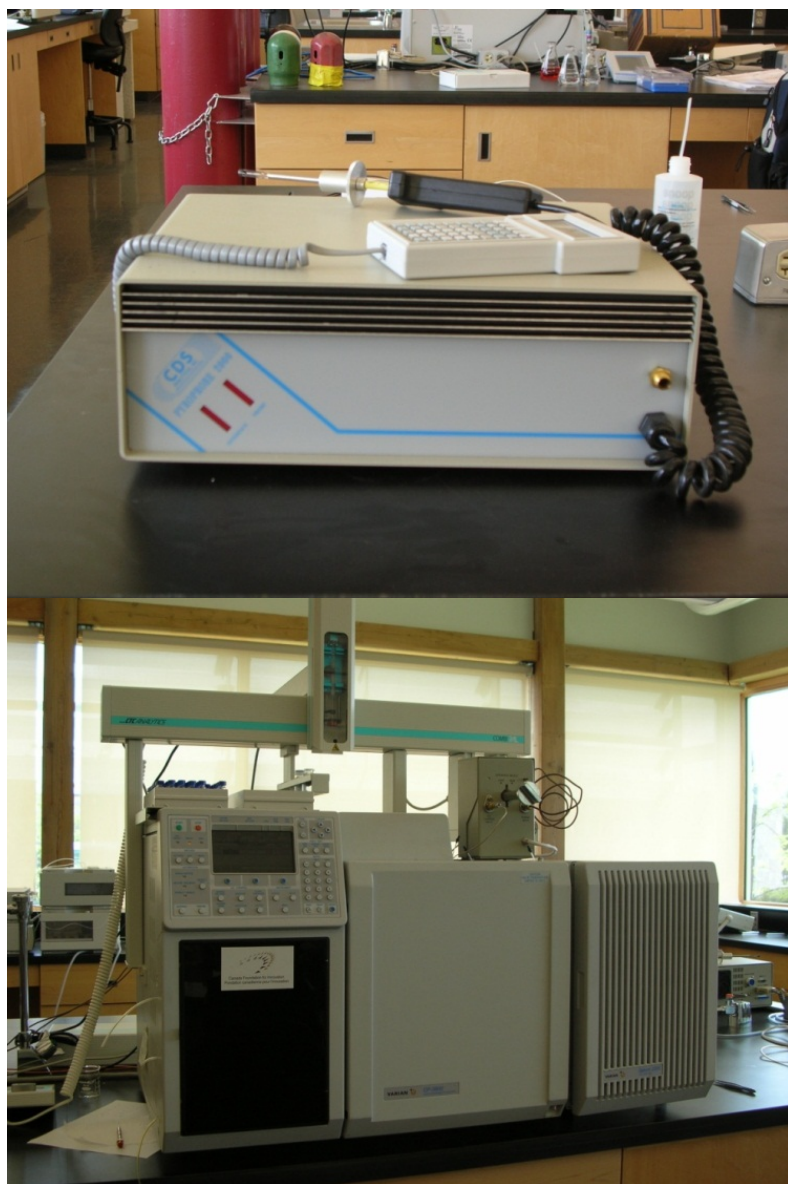


Figure 2.27 Pyrolyseur (photo du haut), chromatographe en phase gazeuse et spectromètre de masse (photo du bas) pour les analyses par Py-GC/MS.

2.8.2 Spectrométrie de photoélectrons induits par rayons-X (XPS)

La spectrométrie photoélectronique par rayon-X (XPS) est une méthode physique de caractérisation spectroscopique électronique. Cette technique quantitative permet une analyse superficielle des liaisons chimiques en surface. L'irradiation par rayon-X provoque

l'ionisation des atomes par effet photoélectronique. L'énergie cinétique (E_c) des photoélectrons est mesurée et donne ainsi le spectre de l'intensité des électrons en fonction de l'énergie mesurée. L'émission de l'énergie du photon X donne alors les pics essentiellement caractéristiques de la nature de l'atome.

Sous l'effet d'un faisceau X approprié, les atomes à la surface d'un échantillon solide subissent une ionisation photoélectronique, résultant en l'expulsion d'un électron d'une couche profonde. L'énergie cinétique de cet électron dépend de la longueur d'onde du faisceau primaire, de l'énergie de liaison du photoélectron émis et du travail d'extraction. L'énergie de liaison du photoélectron émis est caractéristique de l'atome émetteur. La spectrométrie de photoélectrons X permet en outre de distinguer les états de liaison chimique de cet atome (environnement). C'est ainsi que les fonctions peuvent être discriminées dans le cas du carbone.

Un spectromètre Kratos Axis-Ultra de (Kratos Analytical, Royaume-Uni) a été utilisé pour effectuer une analyse XPS (Figure 2.28). L'équipement était pourvu d'un analyseur électrostatique de grand rayon, d'un système de détection à 8 canaux, d'une source de rayons-X double Al-Mg sans monochromateur et d'une source Al avec monochromateur. Le système disposait également d'un canon à électrons de très basse énergie pour neutraliser la charge électrostatique importante apparaissant sur les échantillons (électriquement isolants) lors de leur exposition au faisceau de rayons-X monochromatique. Ce spectromètre était installé dans un système à vide dont la pression de base était de 5×10^{-10} Torr. La chambre d'analyse était reliée à une chambre de transport/préparation à usages multiples, elle-même reliée à un sas pour une introduction rapide des échantillons en position d'analyse. Le spectromètre a été calibré à partir des standards suivants: Au4f_{7/2}: 83.95eV; Ag3d_{5/2}: 368.2eV; Cu2p_{3/2}: 932.6eV (Seah et al. 1998).



Figure 2.28 Spectromètre AXIS-ULTRA (Kratos UK) pour l'analyse chimique XPS.

La composition élémentaire de 3 échantillons *Ref* et 3 *WM* a été effectuée pour chacune des essences (Voir Figure 5.1). Les échantillons ont été montés par groupe de 4 sur un porte-échantillon au moyen de ruban adhésif double-face; les échantillons n'ont subi aucun traitement autre que la mise sous vide. Lors de l'analyse, la pression était de l'ordre de 5×10^{-8} à 10^{-7} Torr, suite à un dégazage important.

Tous les spectres ont été enregistrés avec une source Al monochromatique à une puissance de 300 W. Le faisceau de rayons-X monochromatique était incident à 30° par rapport à la surface. L'analyse des photoélectrons a été effectuée à un angle moyen de 90° par rapport à la surface. Les échantillons étant électriquement isolants, il a été nécessaire d'utiliser le canon de neutralisation, dont les paramètres ont été ajustés pour maximiser la résolution et l'intensité.

Les spectres de survol servant à déterminer la composition élémentaire ont été enregistrés avec une énergie de passage dans l'analyseur de 160eV, un pas d'énergie de 1eV (160eV/1eV) et des lentilles en mode hybride permettant de maximiser la sensibilité tout en

fournissant une résolution en énergie moyenne. Les spectres détaillés à haute résolution ont été enregistrés avec les paramètres 20 ou 10eV/0.025eV et les lentilles en mode hybride. Pour un certain nombre d'échantillons, un spectre de contrôle C1s après le survol a été également enregistré afin de détecter une éventuelle dégradation qui se serait manifestée par une modification de la forme du spectre. La constatation de l'absence de dégradation significative a conduit à supprimer cet enregistrement de contrôle.

2.8.3 Spectroscopie infrarouge par transformé de Fourier de type réflexion totale atténué (ATR-FTIR)

L'une des méthodes de caractérisation spectroscopique moléculaire est la spectrométrie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR). Les radiations infrarouges (IR) se situent dans la partie du spectre électromagnétique comprise entre la région visible et celle des micro-ondes. La région limitée entre 4000 et 400 cm^{-1} est celle qui suscite de façon générale le plus d'intérêt. Les IR sont absorbés et converties par une molécule organique en énergie de rotation moléculaire. Les IR comprises entre 10 000 et 100 cm^{-1} sont absorbées par une molécule organique en tant qu'énergie de vibration moléculaire. La position des bandes dans un spectre IR est présentée en unités de nombre d'onde ($\bar{\nu}$, cm^{-1}). Les intensités des bandes peuvent être exprimées soit en transmittance (T) ou en absorbance (A). La transmittance est le rapport de la puissance radiative transmise par l'échantillon sur la puissance radiative incidente. L'absorbance est le logarithme, en base 10, de l'inverse de la transmittance.

La radiation contenant toutes les longueurs d'onde IR (5000 à 400 cm^{-1}) est divisée en deux faisceaux. Un des faisceaux est à trajectoire fixe alors que l'autre doit parcourir une distance variable (miroir mobile). Quand la différence de chemin optique entre les faisceaux correspond à un multiple entier de la longueur d'onde, on parle d'interférence constructive; une interférence destructive apparaît quand cette différence est un multiple entier impair d'un quart de la longueur d'onde. Le résultat d'une variation des intensités est une série oscillante de combinaisons destructives ou constructives: un interférogramme. La transformation de Fourier convertit cet interférogramme se trouvant dans le domaine du temps en un spectre dans le domaine des fréquences.

Il existe deux types de vibrations des atomes dans les molécules autour des liaisons covalentes: les élongations et les déformations angulaires. Une élongation est un mouvement rythmique le long de l'axe de la liaison de sorte que la distance interatomique est croissante ou décroissante. Une déformation angulaire consiste en une variation de l'angle formé entre deux liaisons successives, c'est-à-dire ayant un atome en commun, ou le mouvement des atomes du groupe les uns par rapport aux autres.

Les attributions des fréquences d'élongation peuvent être approximées par l'application de la loi de Hooke. Dans l'application de cette loi, deux atomes et leur liaison se traitent comme un simple oscillateur harmonique composé de deux masses reliées par un ressort. L'équation suivante, dérivée de la loi de Hooke, établit la relation entre la fréquence d'oscillation, les masses atomiques et la constante de force de la liaison.

$$\bar{\nu} = \frac{1}{2\pi c} \left[\frac{f}{(M_x M_y)/(M_x + M_y)} \right]^{1/2} \quad [41]$$

où $\bar{\nu}$: la vitesse de vibration ou nombre d'onde (cm^{-1}); C : la vitesse de la lumière (cm s^{-1}); f : la constante de la liaison (dyne cm^{-1}); M_x et M_y : masses (g) de l'atome x et de l'atome y respectivement. Les différents types de liaison en fonction de la région d'adsorption sont présentés au Tableau 2.12.

Tableau 2.12 Type de liaisons en fonction de la région d'adsorption (Silverstein et al. 1998).

Type de liaison	Région d'absorption (cm^{-1})
C-C, C-O, C-N	1300-800
C=C, C=O, C=N, N=O	1900-1500
C≡C, C≡N	2300-2000
C-H, O-H, N-H	3800-2700

Une analyse par infrarouge a été effectuée afin d'analyser la composition de la zone à l'interface de soudage et de la comparer avec le bois de référence. Des mesures infrarouge à transformée de Fourier ont été effectuées à partir d'un spectromètre Spectrum 400 (Perkin Elmer, Royaume-Uni, Figure 2.29) dans le domaine compris entre 4000 et 400 cm^{-1} . Un total de 3 échantillons *Ref* et 3 *WM* ont été analysés pour chacune des essences (Voir Figure 5.1).

La profondeur d'analyse de l'absorption du rayonnement infrarouge par le matériau analysé était de l'ordre de 0,3 à 3 μm . Tous les spectres ont été mesurés à une résolution de 4 cm^{-1} et la moyenne de 64 passages a été enregistrée. La position et l'intensité des spectres ont été déterminées à l'aide du logiciel PerkinElmer. Les spectres liés à la vapeur d'eau ont été éliminés avec la fonction *Atmospheric Vapor Compensation*. La ligne de base des spectres a été corrigée (*baseline correction*) avec le logiciel *Origin Pro 8.5.1* à 785, 1816, et 3700 cm^{-1} selon Nuopponen et al. (2004). La bande d'adsorption assigné à l'étirement CO (1036 cm^{-1}) a été retenue afin de normaliser les spectres obtenus (Delmotte et al. 2008).



Figure 2.29 Spectromètre Spectrum 400 (Perkin Elmer, Royaume-Uni) utilisé pour les analyses ATR-FTIR.

2.9 Analyse des émanations volatiles produites lors du soudage

2.9.1 Étude préliminaire

Durant une séquence typique de soudage du bois, des émanations gazeuses et de la vapeur d'eau se forment avant d'être expulsées hors de la zone de soudage sous la forme de fumées. La caractérisation de ces émissions visait à déterminer leur impact potentiel sur l'être humain et l'environnement afin de valider l'aspect *vert* du procédé d'assemblage par soudage du bois dans une optique d'éco-conception pour l'industrie du meuble.

2.9.1.1 Caractérisation des émissions volatiles par GC/MS

Une analyse préliminaire a permis de connaître les divers constituants sous forme gazeuse produits lors du soudage. Un dispositif composé d'une pompe de prélèvement universelle (SKC 224-PCXR4, PA, États-Unis) avec un débit de $2,5 \text{ L min}^{-1}$ ($\pm 5\%$ de la valeur de référence à débit constant) a permis de capter les émissions volatiles et de les diriger vers un sac étanche Tedlar® (Figure 2.30). Les sacs ont été préalablement purgés à l'azote à 3 reprises. Le contenu des sacs a ensuite été analysé façon qualitative par chromatographie en phase gazeuse (GC) couplée à un spectromètre de masse (MS). La GC a permis de séparer les substances volatiles et la MS de les identifier par ionisation. Le MS donne ainsi la masse de chaque composant entrant dans la structure des molécules correspondantes à chaque pic. Trois sacs par essence ont été préparés. Chaque sac contenait les fumées dégagées de 5 soudages.

2.9.1.2 Caractérisation des émissions volatiles par adsorbant solide

L'utilisation d'adsorbants solides (*SPA* pour *solid phase adsorbent*) permet simultanément l'échantillonnage et l'enrichissement de l'échantillon. Après élution, les composés piégés à l'intérieur de l'adsorbant sont analysés par la GC. Deux types de désorption sont principalement utilisés par les agences environnementales pour l'analyse des émissions volatiles: par solvant ou encore par désorption thermique (TD) (Dettmer et Engelwald 2003).

La désorption par solvant est une méthode relativement simple qui utilise principalement du charbon activé comme adsorbant. La technique permet d'extraire des composés de haut poids moléculaire, parfois instables, ainsi que la pré-concentration de grande quantité d'air.

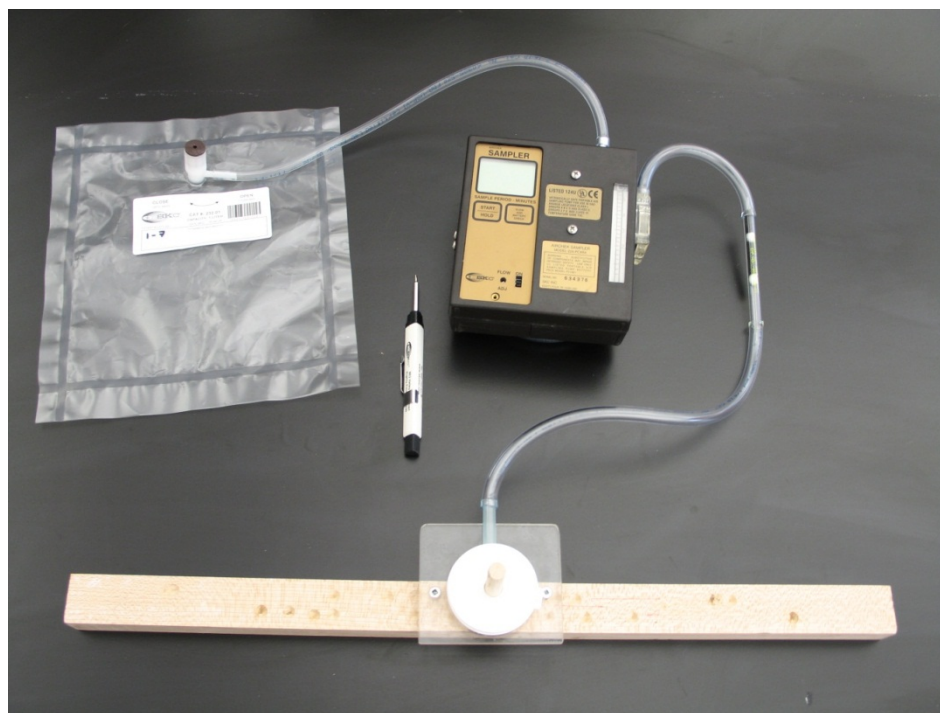


Figure 2.30 Dispositif servant à capter les émissions volatiles produites lors du soudage.

Le sulfure de carbone, le méthanol, le toluène et l'acétone peuvent servir à titre de solvant. La technique SPA permet le passage d'un grand volume d'air à travers la cartouche contenant l'adsorbant lors de la captation des émissions volatiles. Cependant, la dilution à l'aide d'un solvant limite la détection subséquente des composés. La TD, quant à elle, est plus sensible et ne nécessite aucun solvant mais la dégradation des cartouches peut entraîner la production d'artefacts. Les cartouches se composent à la base de charbon graphité (Dettmer et Engelwald 2003, Barro et al. 2009).

Une analyse des émissions volatiles a été effectuée par adsorption directe des fumées produites lors du procédé de soudage à partir des paramètres optimaux obtenus lors de la première partie. Les émissions volatiles produites durant une séquence typique de soudage par friction rotationnelle ont été captées puis analysées (Figures 2.31 et 2.32). Les émissions de 30 soudages par essence ont été captés sur des tubes Anasorb 747 (charbon synthétique, 8 OD x 110 mm, SKC, PA, États-Unis) et d'une pompe de prélèvement (SKC,

PA, États-Unis) avec un débit de $2,5 \text{ L min}^{-1}$. Les cartouches ont ensuite été éluées avec 5 ml de sulfure de carbone et injectés dans la GC (Varian CP3800) couplée à un MS (Varian Saturn 2200 MS/Ms). La température d'injection de la colonne (VF-5 ms, $30 \text{ m} \times 0,25 \text{ mm} \times 0,25 \mu\text{m}$) était de $200 \text{ }^\circ\text{C}$ avec un split ratio de 1:2. Le programme de température du four était le suivant: $40 \text{ }^\circ\text{C}$ pendant 5 minutes, $40\text{-}270 \text{ }^\circ\text{C}$ avec une vitesse de $5 \text{ }^\circ\text{C min}^{-1}$ et enfin $270 \text{ }^\circ\text{C}$ pendant 5 minutes. De l'hélium a été utilisé comme gaz vecteur avec un débit de 1 ml min^{-1} ($0,1 \text{ psi}$).

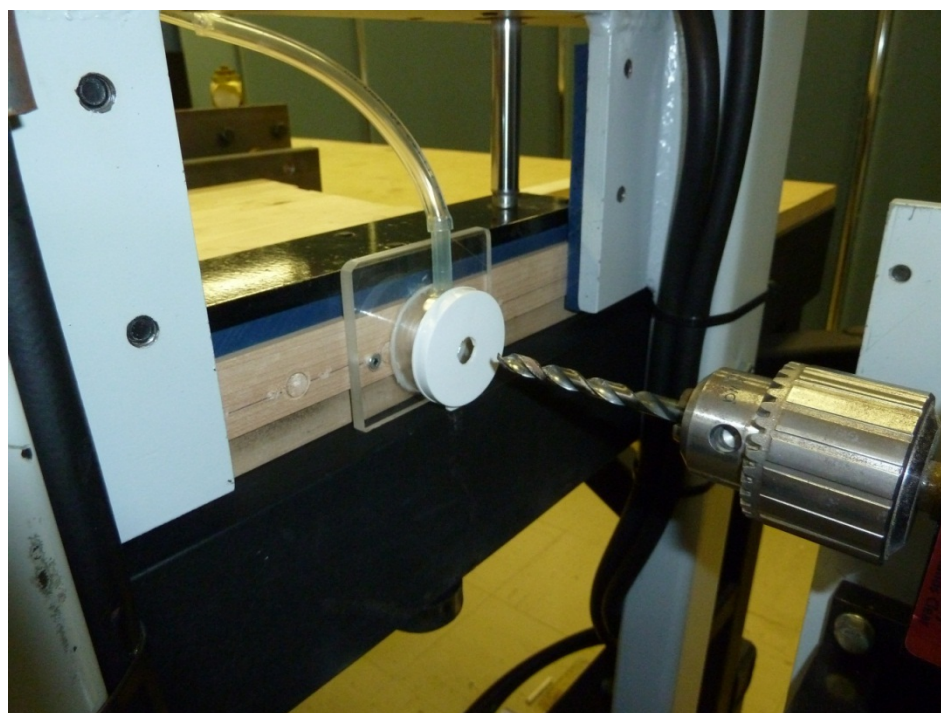


Figure 2.31 Séquence de pré-perçage et chambre de captation des émissions volatiles.

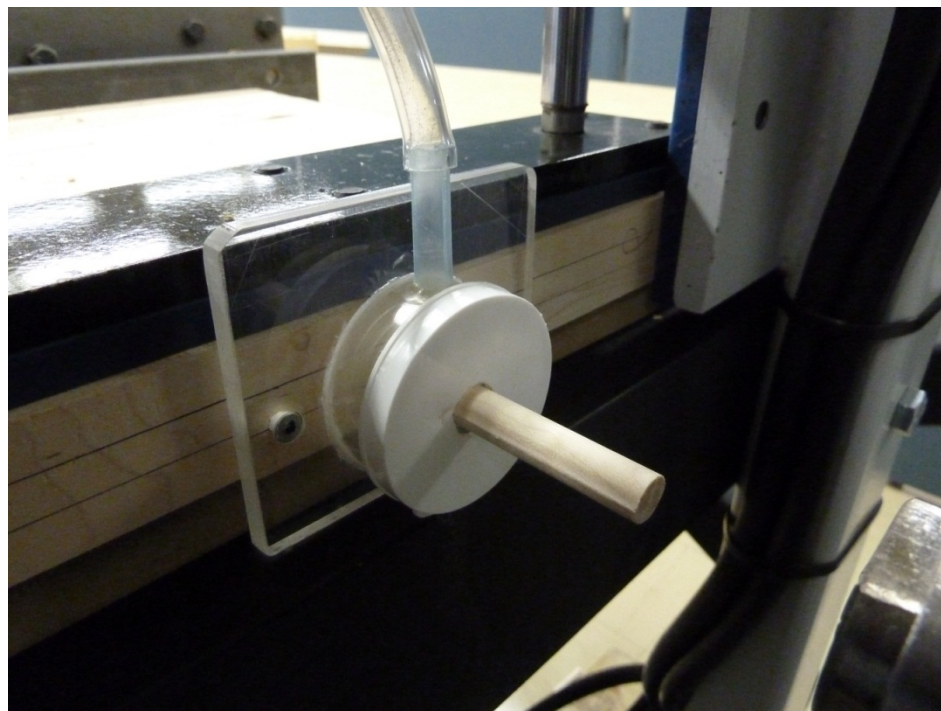


Figure 2.32 Fin de la séquence de soudage et captation des émissions volatiles.

Ces types d'analyse nécessitent généralement une longue durée d'exposition afin de concentrer suffisamment les composés volatiles à l'intérieur de la cartouche ce qui n'est pas possible en raison des temps de soudage courts (de l'ordre de 1 à 2 s). Ces techniques d'analyse ne se sont donc pas avérées appropriées pour l'identification des émissions volatiles en raison de la faible quantité de fumée dégagée. Même en augmentant le nombre de captages de *fumée de soudage* par cartouche la quantité de molécules identifiées et la résolution de pics demeuraient insuffisantes. À cet effet, la faible intensité du signal (kCounts) s'explique par les faibles concentrations d'analytes adsorbés (Figures 2.33 et 2.34) alors que la désorption par solvant peut entraîner une dilution des molécules jusqu'au millième (Barro et al. 2009, Ramirez et al. 2010).

En résumé, les conclusions suivantes peuvent être tirées à partir des essais préliminaires pour des assemblages soudés:

- Cette portion d'analyse préliminaire a permis de détecter des produits de dégradation du bois tel que le 3-furaldehyde (temps de rétention: 8,06 min), le furfural (8,23 min), et le P-xylène (10,13, 11,51 min) pour le bouleau jaune et le furfural (8,29 min), le xylène (10,25, 1,54 min) et le furan (14,49 min) pour l'érable à sucre.
- Le soudage du bois par friction rotationnelle produit une quantité insuffisante de fumée pour ces types d'analyses. Une analyse de type par chromatographie en phase gazeuse avec détection de conductivité thermique et d'ionisation de la flamme (Py-GC-TCD) serait probablement plus appropriée en raison de la plus grande sensibilité de la TD.

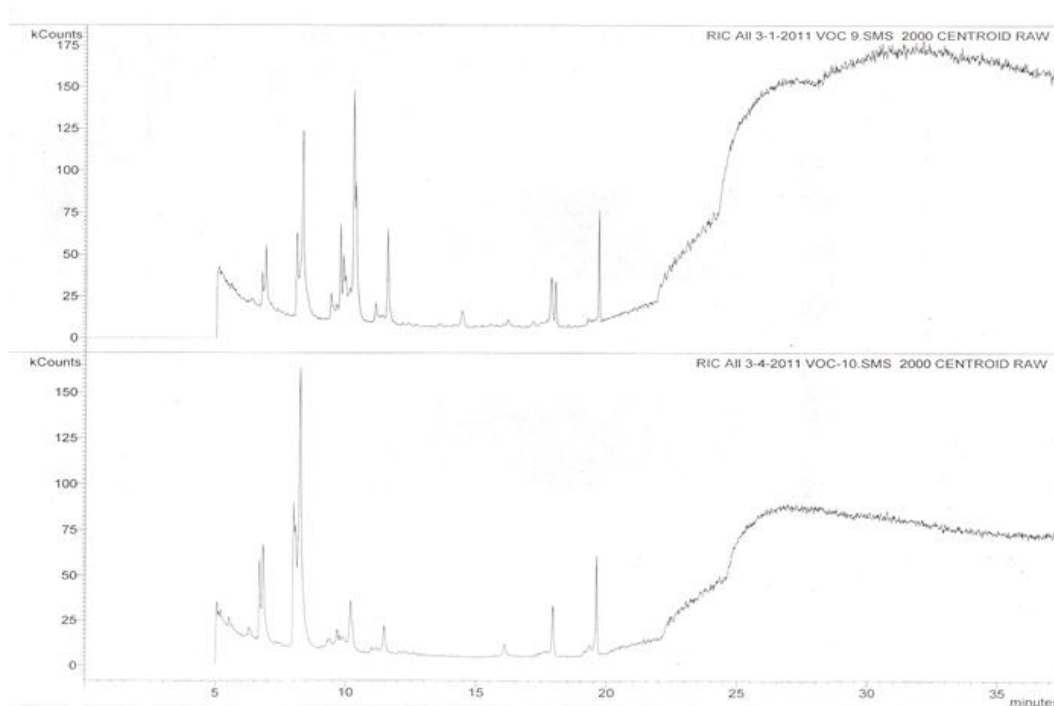


Figure 2.33 Chromatogramme des émissions volatiles pour le bouleau jaune lors du soudage par la méthode Py-GC/MS.

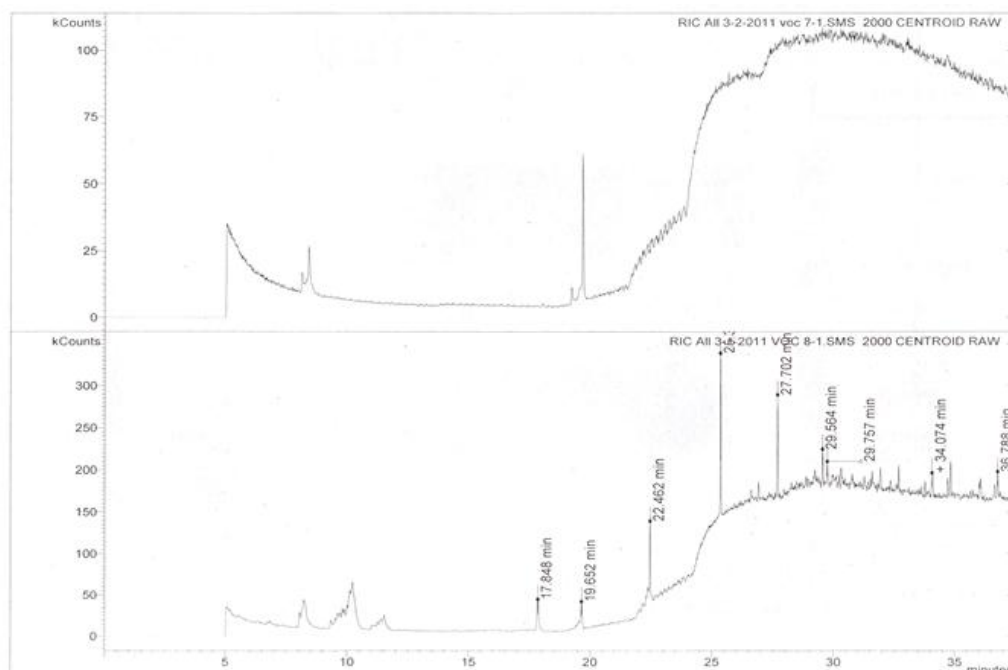


Figure 2.34 Chromatogramme des émissions volatiles pour l'érable à sucre lors du soudage par la méthode Py-GC/MS.

2.9.2 Pyrolyse analytique par chromatographie gazeuse et spectroscopie de masse (Py-GC/MS)

La pyrolyse a été utilisée afin de simuler les gaz émis lors du soudage. À cet effet, les conditions de montée en température et de température maximale à l'interface mesurées au Chapitre 3 ont été imposées ici (Voir également Annexe 3). De la sciure provenant de la section identifiée *Ref* sur les goujons a été pyrolysée selon le profil moyen de température à l'interface de soudage pour chaque essence. Les échantillons se composaient de 1-2 mg de sciure pyrolysés jusqu'à 244 °C pour l'érable à sucre et 282 °C pour le bouleau jaune avec de l'hélium comme gaz vecteur avec un pyrolyseur (Pyrolyzer 2000, CDS analytical, PA, États-Unis). Le pyrolyseur était couplé à un GC (Varian CP3800) et un MS (Varian Saturn 2200MS /MS, 30-650 a.m.u). Le débit du gaz vecteur était de 1 ml min⁻¹.

La pyrolyse a été effectuée selon le programme suivant: montée en température de 130 °C s⁻¹ pour le bouleau jaune et 139 °C s⁻¹ pour l'érable à sucre jusqu'à température maximale pendant le soudage pour chaque essence suivi d'un plateau pendant 30 secondes. Le programme du four était le suivant: 45 °C pendant 4 minutes; montée de 4 °C min⁻¹ jusqu'à

la température maximale pour chacune des essences; température finale maintenue pendant 15 min. Trois injections ont été effectuées pour chacune des essences étudiées.

2.9.3 Chromatographie en phase gazeuse avec détection de conductivité thermique et d'ionisation de la flamme (GC/TCD-FID)

Les gaz non-condensables et les hydrocarbures légers émis directement lors du soudage ont été récupérés puis analysés par GC/TCD-FID. Les émissions volatiles ont été récupérées avec des sacs Tedlar FlexFoil® de 5 L au moyen d'une pompe de prélèvement (SKC, PA, États-Unis) à un débit de $2,5 \text{ L min}^{-1}$ puis transférés directement dans la colonne de la GC. Un chromatographe en phase gazeuse avec détection de conductivité thermique et d'ionisation de la flamme (GC/TCD-FID, PerkinElmer Clarus480, Royaume-Uni) a été utilisé. Cet appareil comportait une boucle d'injection de 1 mL et une pression de 0,15 MPa, un système d'injection à deux valves (une de 10 voies et l'autre de 6), deux colonnes de séparation (colonne polaire HayeSep N et colonne Molecular Sieve 13X) ainsi que les détecteurs TCD et FID montés en série. Le gaz vecteur était un mélange d'hélium et hydrogène (91,5/8,5). La température du four était de $60 \text{ }^\circ\text{C}$ à une pression de 150 KPa.

La colonne HayeSep N mesurait 1,83 m de long avec un diamètre extérieur de 3,175 mm. Le polymère que comportait cette colonne était du DVB/EGDM très polaire (polarité de 9). La taille des particules de la HayeSep était de 60-80 mesh de $0,355 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$. Cette première colonne était traversée par le mélange d'échantillon et de gaz vecteur. Elle a permis de séparer le mélange gazeux en deux groupes: un premier groupe comprenant H_2 , O_2 , N_2 , CO et CH_4 ; un second groupe comprenant CO_2 , C_2H_2 , C_2H_4 et C_2H_6 . La colonne Molecular Sieve 13X était un tamis moléculaire de 2,74 m de longueur et 3,175 mm de diamètre extérieur. La taille des particules de cette deuxième colonne était de 40 - 60 mesh. Le tamis moléculaire était la seconde colonne traversée par les gaz. Trois injections pour chacune des espèces ont été effectuées.

La TCD et la FID sont deux détecteurs couramment utilisés avec la GC. Le choix s'effectue en fonction de la méthode de séparation requise. La TCD, bien que pour les études initiales sur des échantillons inconnus, est moins sensible que la FID. Il permet cependant l'analyse de gaz (*permanent gases*) tels que l'argon, l'oxygène, l'azote et le dioxyde de carbone ou encore l'eau ce que ne peut détecter la FID. Il offre également l'avantage d'être non

destructif. Tous les composés organiques et inorganiques présentent une conductivité thermique différente de celle de l'hélium, le gaz porteur dans la colonne. Le détecteur peut ainsi signaler les changements de conductivité thermique à l'intérieur de la colonne et comparer ces changements à ceux d'une liste de référence.

2.10 Analyse statistique

Le dispositif expérimental pour le Chapitre 3 a été un plan factoriel. Les résultats des essais en traction de même que les essais de détermination de la température maximale à l'interface lors du soudage essais ont été analysés comme des ANOVA, comme des mesures répétées. Une transformation de type racine carrée a été effectuée sur les données de traction afin de corriger l'hétérogénéité de la variance. Les analyses ont été faites avec le logiciel Design-Expert® 6.0.4. (Design-Expert 2001).

La structure expérimentale pour le Chapitre 5 a été un plan en tiroirs et variations ou split-plots avec des pseudo-répétitions. Les résultats des essais ont été analysés individuellement pour chaque produit par une analyse de variance (ANOVA) simple par la procédure MIXED. Les analyses ont été faites avec le logiciel SAS® 9.2 (SAS 2007).

Chapitre 3 Détermination des paramètres optimaux de soudage du bois par friction rotationnelle pour deux essences nord-américaines.

3.1 Résumé

L'assemblage de composants en bois à partir de la technique de soudage du bois par friction rotationnelle permet de produire des joints très résistants. La technique représente une opportunité afin d'améliorer la productivité et de réduire les coûts dans l'industrie du meuble. L'objectif de l'étude était de définir les paramètres optimaux de soudage rotationnel pour deux essences nord-américaines fréquemment utilisées pour des produits d'apparence d'intérieur : l'érable à sucre (*Acer saccharum*) et le bouleau jaune (*Betula alleghaniensis*). Les paramètres optimaux pour chacune des essences étudiées ont été déterminés à partir d'une machine conçue spécifiquement pour le soudage par friction rotationnelle. Une analyse comparative des différents paramètres de soudage par friction rotationnelle a été effectuée pour les deux essences. Les paramètres à l'étude pour chaque essence étaient : l'orientation du fil du bois, la vitesse rotationnelle et la vitesse d'insertion. Des mesures à l'interface de soudage ont été effectuées afin de déterminer le profil de températures du lors du soudage. Les propriétés mécaniques optimales de soudages ont été déterminées à partir d'un essai en traction standard. Les résultats ont démontré une interaction significative entre l'espèce, la vitesse de rotation et la vitesse d'insertion. L'érable à sucre a procuré des joints soudés avec de meilleures propriétés mécaniques en traction que le bouleau jaune. Les meilleurs résultats ont été obtenus à une vitesse rotationnelle de 1000 tours min^{-1} tant pour l'érable à sucre que le bouleau jaune. Une vitesse d'insertion de 25,0 mm s^{-1} a produit des joints soudés significativement plus solides qu'une vitesse de 12,5 mm s^{-1} pour l'érable à sucre. Dans le cas du bouleau jaune, une vitesse d'insertion de 16 mm s^{-1} a produit les joints soudés affichant les meilleurs résultats. L'essence et la vitesse rotationnelle ont eu un effet significatif sur la température maximale à l'interface lors du soudage. La température maximale à l'insertion à partir des paramètres optimaux était de 244 °C et 282 °C pour l'érable à sucre et le bouleau jaune, respectivement.

3.2 Abstract

Rotational wood-dowel welding has been shown to rapidly produce wood joints of considerable strength without any adhesive. The technique offers an opportunity to increase productivity and reduce costs in the furniture industry. The objective of the study was to define optimal wood-dowel welding parameters for two North American hardwood species frequently used for indoor appearance products: sugar maple (*Acer saccharum*) and yellow birch (*Betula alleghaniensis*). Optimized parameters for individually studied species were determined using a rotational wood-dowel welding machine designed for the technique. A comparative analysis of wood-dowel welding parameters was performed. The investigated parameters for both species were grain orientation, rotational speed, and insertion speed. Temperature profile measurements at the interface during rotational wood-dowel welding were also carried out. Optimal welding mechanical properties were determined from the dowel withdrawal strength using a standard tensile strength test. Results revealed a significant interaction between species, rotational speed, and insertion speed. Sugar maple produced wood joints with higher withdrawal strength than yellow birch. The best results for sugar maple and yellow birch were obtained with a rotational speed of 1000 rpm. A 25 mm s⁻¹ insertion speed produced significantly stronger welded joints in sugar maple than at 12.5 mm s⁻¹. For yellow birch, a 16.7 mm s⁻¹ insertion speed provided the best results. Both species and rotational speed had a significant effect on peak temperature at the interface during welding. Peak welding temperatures with optimal parameters were 244 °C and 282 °C for sugar maple and yellow birch, respectively.

3.3 Introduction

The Canadian domestic market for furniture and the related product manufacturing industry represented USD 12.1 billion in 2008 (Statistics Canada 2010). From the same source, the industry was comprised of 6,985 establishments employing 88,791 workers in 2009. Canadian total exports of commercial and domestic wooden furniture represented USD 991 million in 2010, and in that same year the U.S. market was the main destination for Canadian furniture exports, at USD 962 million. However, the Canadian furniture industry is now facing heavy competition on the world market. Once a major furniture exporting country, ranked with China, Germany, and Italy, Canada has recently been overtaken by

countries such as Poland and the U.S. (CSIL 2010). Although U.S. imports rose from USD 6.1 to 8.3 billion between 2001 and 2010 (US Census Bureau 2011), Canadian exports dropped by 53% in that period, resulting in a 12% market share loss. This can be explained, in part, by the recent U.S. economic crisis and the emergence of new players worldwide.

According to Govoni (2011), it is vital to focus on efficient manufacturing processes and to offer specialized cutting-edge products and reliable customer service. Response to customer needs, innovation, and cost reduction strategies are some of the main factors for success. In order to regain its competitive edge, the Canadian furniture industry needs to apply some of these principles by improving manufacturing processes and introducing innovations, along with cost reduction strategies.

Gluing is a valid and extensively used alternative to paneling in the furniture industry. However, adhesives, which are generally produced by the petrochemical industry, require curing times (up to 24 h) and multiple handling, which limits the production flow and flexibility required for customized production. Air pollution and harmful working conditions are also major problems that raise production costs.

Rotational wood-dowel welding could provide an efficient alternative for the furniture industry. The technique has been shown to rapidly produce wood joints of considerable strength without any adhesive (Pizzi et al. 2004, Ganne-Chedéville et al. 2005, Belleville et al. 2011). It can also increase productivity and reduce petrochemical adhesive-related costs.

The process consists of inserting dowels into smaller-diameter pre-drilled holes at rapid rotation. The friction between the dowel and substrate during insertion combined with high-speed dowel rotation causes high temperatures that induce the lignin to soften and the wood to weld. There must be contact between the dowel and the wall hole of the substrate. Thus, the greater the friction, the stronger the welded joint (Pizzi et al. 2004). Many studies on European and North American species confirm that the optimal ratio of dowel diameter to receiving hole is 1.25 (Pizzi et al. 2004, Kanazawa et al. 2005, Rodriguez et al. 2010).

Dowel rotation rate has been demonstrated to influence the tensile strength of the welded joint (Ganne-Chedéville et al. 2005, Rodriguez et al. 2010). This parameter affects the

temperature rise and the softening temperature of amorphous wood polymers (mainly lignin). If the welding time is unduly prolonged, the bond formed will break and only partly re-form. The longer the high-temperature welding time, the greater the odds of burning the wood at the welding interface. Mansouri et al. (2009) reported less charring in the interface region and no fibres expelled from the interface for a short welding time. Segovia and Pizzi (2009) noted improved mechanical properties for a 2-3 s welding time.

Zoulalian and Pizzi (2007) and Kanazawa et al. (2005) studied the correlations between welding interface temperature and bondline mechanical properties in European beech (*Fagus sylvatica*). According to these authors, 183 °C would be optimal for good wood joint mechanical properties. In a study with yellow birch (*Betula alleghaniensis*) and sugar maple (*Acer saccharum*), Rodriguez et al. (2010) measured peak temperatures of 263 °C and 274 °C, respectively, in the welding zone. Both studies were performed with a manually operated fixed drill.

The insertion rate is a determinant parameter for welded joint tensile strength (Auchet et al. 2010). For an accelerating insertion rate, the greater the acceleration, the higher the joint strength. For a constant insertion rate without acceleration, tensile strength increased with increasing insertion rate up to a maximum (18-20 mm s⁻¹) and decreased thereafter. A constant insertion rate without acceleration produced the best joints, although no optimization was performed.

The width and shape of a linear welded bondline differ depending on the species (Leban et al. 2004, Wieland et al. 2005). Following rotational wood-dowel welding tests performed with a manually operated drill on sugar maple and yellow birch, Rodriguez et al. (2010) reported species as the most significant parameter influencing tensile strength. Chemical composition and anatomical and wood polymer structures (particularly lignin and hemicelluloses) would explain these differences. So far, studies on rotational wood-dowel welding have investigated mostly European species commonly used for furniture and structural applications such as European beech and Norway spruce (*Picea abies*). Less attention has been paid to North American species, except by Rodriguez et al. (2010), or to automatic insertion methods.

The objectives of the present study were *i*) to define, for a specific rotational wood-dowel welding machine, optimal wood-dowel welding parameters for two North American hardwood species frequently used for indoor appearance products: sugar maple and yellow birch; and *ii*) to determine temperature profiles at the interface during rotational wood-dowel welding.

3.4 Materials and methods

3.4.1 Welding conditions

The wood material was pre-conditioned until constant mass was reached in a conditioning room at 20 °C and 60% relative humidity (RH) before testing. Sugar maple and yellow birch wood slats with dimensions 30 mm x 30 mm x 400 mm were selected, prepared, and conditioned and used to form wood panels. Commercially manufactured smooth sugar maple and yellow birch wood dowels (A. Lapointe & Fils Ltée, Saint-Romain, QC, Canada) 9.68 mm in diameter and 82 mm in length were inserted into pre-drilled holes 25 mm in depth and 7.67 mm in diameter using a rotational wood-dowel welding machine. Following insertion, the dowel excess was kept to provide a grip for tensile strength testing. A predetermined 36.5 mm center-to-center dowel spacing was maintained to prevent the wood slats from splitting during insertion.

A comparative analysis of wood-dowel welding parameters was performed. The investigated parameters for both species were grain orientation (tangential or radial), rotational speed (1000, 1500, and 2500 rpm) and insertion speed (12.5, 16.7, and 25.0 mm s⁻¹), for 36 possible combinations. The automated welding machine (11.3 N·m moment of force, 2 kN thrust) was expected to ensure repeatability, unlike a manually operated drill. Ten samples were prepared, with each parameter set used only once on a single slat to avoid unwanted external effects caused by the wood's natural heterogeneity. Species were not mixed between slats or dowels in this test phase.

Following welding, the wood slats with welded dowels were cut into smaller specimens and conditioned at 20 °C and 60% RH for 7 days prior to testing. Each specimen consisted of one dowel inserted into a wood substrate.

3.4.2 Mechanical properties determination

Optimal welding mechanical properties were determined from the dowel withdrawal strength using a standard tensile strength test (ASTM D 1037) (ASTM 2006) on a universal testing machine (MTS QT 5 kN, MTS Systems Corporation, Eden Prairie, MN). During a test sequence, the dowel excess was retained by a fixed chuck while a load was applied parallel to the wood substrate surface (Figure 3.1). Under a constant rate of 2 mm min^{-1} , the withdrawal strength (σ_k , MPa) was calculated from the maximum load measured at break (F_{max} , N) and the welded surface (S , m^2) by the following equation:

$$\sigma_k = \frac{F_{\max}}{S} = \frac{F_{\max}}{2\pi rh} \quad [42]$$

where r = the pre-drilled hole radius (mm) and h = the insertion depth (mm).

For comparative purposes, a cylinder shape profile was used for surface area S , in accordance with a previous work (Rodriguez et al. 2010). However, the actual shape of a welded dowel is slightly conical.

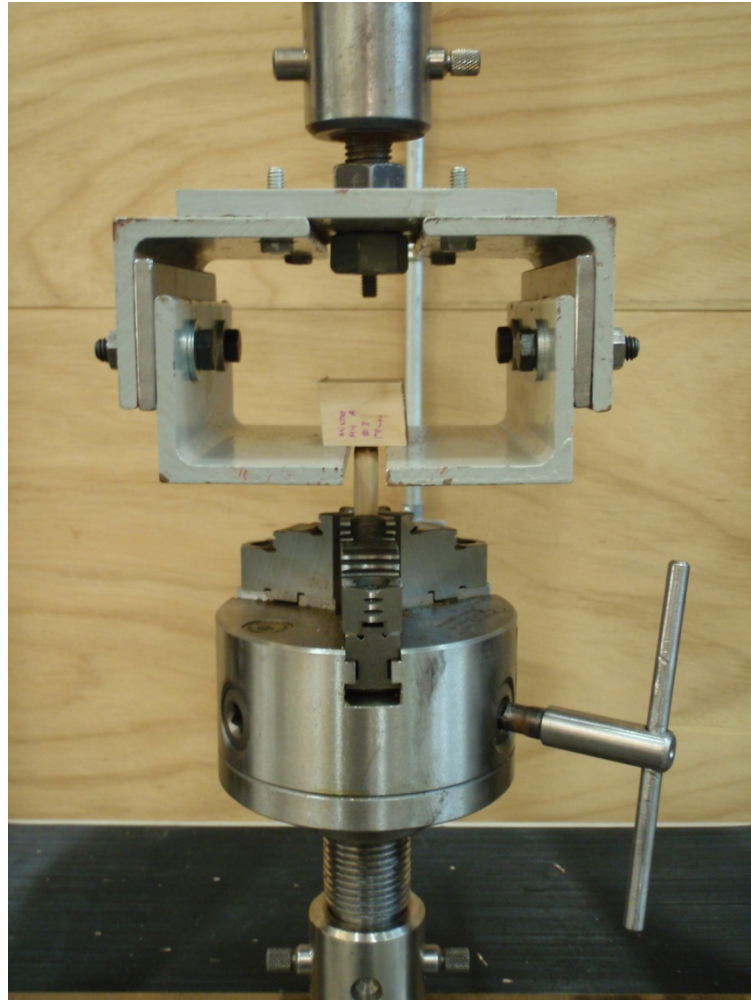


Figure 3.1 Tensile strength test setup.

3.4.3 Welding interface temperature measurement

Temperature was measured at the interface during welding using a data acquisition system (Strainsmart 5000, Vishay Micro-measurements, Raleigh, NC, USA) at 100 Hz frequency and connected to type T thermocouples. Based on previous studies (Kanazawa et al. 2005, Rodriguez et al. 2010), the selected temperature measurement system provides a quick response and adequate measurement of the welding temperature. The thermocouples were installed inside pre-drilled holes 0.89 mm in diameter at 1 and 2 mm insertion depths. Temperature was continuously measured during the welding process (Figure 3.2). Twelve interface temperature measurements were performed for each parameter set.

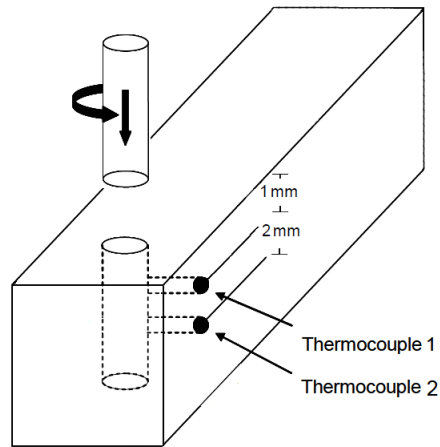


Figure 3.2 Temperature measurement setup at the welded interface during rotational wood-dowel welding.

3.4.4 Species combinations

Additional species combinations were tested using the optimized parameters for individually studied species. Dowels made of one species were welded into wood slats of the other species and vice versa (e.g., yellow birch dowel in sugar maple substrate). Two parameter sets based on the optimized results were used (optimized sugar maple and yellow birch parameters). Other experimental welding conditions remained unchanged. The mechanical properties of welded dowels were determined using the above-described dowel withdrawal strength method. Both sets of optimized parameters were tested for each species combinations. Twelve replicates were prepared for each scenario. The test design is presented in Table 3.1.

Table 3.1 Test design summary for species combinations.

Substrate	Dowel	Welding parameters	Number of replicates
Sugar maple	Yellow birch	Optimized sugar maple parameters	12
Sugar maple	Yellow birch	Optimized yellow birch parameters	12
Yellow birch	Sugar maple	Optimized sugar maple parameters	12
Yellow birch	Sugar maple	Optimized yellow birch parameters	12

Factorial testing was used to analyze the effects of wood-dowel welding parameters on the mechanical properties of welded joints. The parameters were grain orientation (tangential or radial), rotational speed (1000, 1500, and 2500 rpm), insertion speed (12.5, 16.7, and 25.0 mm s⁻¹), and species (sugar maple or yellow birch). Ten replicates per parameter set were prepared for a total of 360 wood-dowel welded joints. Test results were subjected to analyses of variance (ANOVA) using Design-Expert.

3.5 Results and discussion

3.5.1 Welding performance

The statistical analysis revealed a significant interaction between species, rotational speed, and insertion speed (Table 3.2). It is known that a good bondline in welded wood requires a fine balance between peak temperature at the interface, welding time at high temperature, charring, and the quantity of material expelled from the interface. This delicate balance might explain the interaction, as each parameter affects all the others.

Table 3.2 Analysis of variance (F-values) results for wood-dowel bonded specimens mechanical properties as a function of welding parameters.

Source of variation	F-value	<i>Pr</i> > F ^a
Species	125.89	<0.0001*
Rotational speed (R)	29.98	<0.0001*
Insertion speed (I)	31.50	<0.0001*
Grain orientation (G)	3.73	0.0541
Species x R	31.42	<0.0001*
Species x I	16.80	<0.0001*
R x I	3.45	0.0088*
Species x R x I	4.84	0.0008*

^a Asterisk indicates significance at $\alpha=0.01$.

Considered individually, species, rotational speed, and insertion speed had a significant effect on wood dowel bonding properties. However, this was not the case for grain orientation (*Pr* = 0.0541). Species showed an F-value of 125.89, followed by insertion speed at 31.50. Rotational speed (F-values = 29.98) also appeared to have an impact on the mechanical properties of welded joints. Results are in accord with previous studies (Rodriguez et al. 2010, Leban et al. 2004, Wieland et al. 2005).

Average and individual maximal withdrawal strengths as a function of the welding parameters are presented in Table 3.3. The fracture consistently occurred at the welded interface. The best results for sugar maple and yellow birch were obtained with a rotational speed of 1000 rpm. At 2500 rpm, lower tensile strengths were obtained than for counterparts at 1000 rpm. The rotational speed and peak temperature at the welding interface might explain this, because higher temperatures may cause charring, which reduces the mechanical properties at the welded joint (Omrani et al. 2009a).

A 25 mm s^{-1} insertion speed produced significantly stronger welded joints in sugar maple than at 12.5 mm s^{-1} . This result is in accord with a previous study on welding time (Segovia and Pizzi 2009). For yellow birch, a 16.7 mm s^{-1} insertion speed provided the best results, but no significant difference was observed between 16.7 and 25 mm s^{-1} . A high insertion speed decreases the welding time and limits the welded material's exposure to high temperatures. However, some dowel insertions could not be completed for yellow birch specimens at 1000 rpm and 25 mm s^{-1} insertion speed. This suggests that we had approached the limit where the material melting becomes insufficiently rapid to allow inserting the dowel into the pre-drilled hole. At the other end of the spectrum, at 2500 rpm and 12.5 mm s^{-1} insertion rate, substantial charring and smoke was produced, whereas no dowel welding was observed. A shorter welding time should therefore produce stronger joints, depending on the anatomical and chemical structure of the wood species.

Sugar maple produced wood joints with higher withdrawal strength (7.9 MPa) than yellow birch (4.6 MPa). These results are in accord with those reported by Rodriguez et al. (2010) for manual welding. Variability in chemical composition, different wood polymer structures (Sun et al. 2010), and different anatomical structures would be plausible explanations for this. The best results for sugar maple were obtained with the following parameter set: dowel inserted radially at 1000 rpm and 25 mm s^{-1} . For yellow birch, the best welding performance (4.6 MPa) was obtained with the following parameter set: dowel inserted tangentially at 1000 rpm and 16.7 mm s^{-1} . Our tensile strength results are similar to or better than those obtained for European species (Pizzi et al. 2004, Ganne-Chedéville et

Table 3.3 Average and individual maximal withdrawal strengths obtained for each set of welding parameters for sugar maple and yellow birch.

Species	Grain orientation	Rotational speed (rpm)	Insertion speed (mm s ⁻¹)	Mean withdrawal strength ^a ±SE ^b (MPa)	Max.withdrawal strength (MPa)
Sugar maple	Radial	1000	25.0	7.9±0.8	10.2
Sugar maple	Radial	1000	16.7	5.2±0.6	9.5
Sugar maple	Radial	1000	12.5	5.4±0.5	9.1
Sugar maple	Radial	1500	25.0	7.3±0.6	11.3
Sugar maple	Radial	1500	16.7	4.7±0.4	7.0
Sugar maple	Radial	1500	12.5	2.7±0.2	3.5
Sugar maple	Radial	2500	25.0	3.7±0.4	6.8
Sugar maple	Radial	2500	16.7	2.8±0.3	4.0
Sugar maple	Radial	2500	12.5	2.3±0.0	2.4
Sugar maple	Tangential	1000	25.0	7.3±0.6	9.9
Sugar maple	Tangential	1000	16.7	5.6±0.6	8.0
Sugar maple	Tangential	1000	12.5	4.8±0.5	7.1
Sugar maple	Tangential	1500	25.0	5.5±0.4	6.9
Sugar maple	Tangential	1500	16.7	5.4±0.2	6.2
Sugar maple	Tangential	1500	12.5	3.5±0.6	7.0
Sugar maple	Tangential	2500	25.0	4.1±0.2	5.4
Sugar maple	Tangential	2500	16.7	2.9±0.2	3.7
Sugar maple	Tangential	2500	12.5	2.7±0.2	3.5
Yellow birch	Radial	1000	25.0	2.0±0.3	3.7
Yellow birch	Radial	1000	16.7	3.1±0.5	5.8
Yellow birch	Radial	1000	12.5	2.9±0.3	4.1
Yellow birch	Radial	1500	25.0	2.9±0.3	4.8
Yellow birch	Radial	1500	16.7	3.5±0.4	6.0
Yellow birch	Radial	1500	12.5	2.7±0.2	4.1
Yellow birch	Radial	2500	25.0	3.4±0.3	4.9
Yellow birch	Radial	2500	16.7	3.3±0.2	4.2
Yellow birch	Radial	2500	12.5	2.3±0.1	2.9
Yellow birch	Tangential	1000	25.0	3.0±0.4	5.2
Yellow birch	Tangential	1000	16.7	4.6±0.4	6.1
Yellow birch	Tangential	1000	12.5	3.1±0.3	4.4
Yellow birch	Tangential	1500	25.0	4.2±0.4	7.1
Yellow birch	Tangential	1500	16.7	3.2±0.3	6.0
Yellow birch	Tangential	1500	12.5	2.7±0.3	4.0
Yellow birch	Tangential	2500	25.0	4.0±0.3	5.3
Yellow birch	Tangential	2500	16.7	2.6±0.2	3.2
Yellow birch	Tangential	2500	12.5	2.6±0.2	3.7

^a Average of 10 replicates for each measurement; ^b Standard error.

al. 2005, Kanazawa et al. 2005), but slightly inferior to those obtained for manual welding in a previous study on sugar maple and yellow birch (Rodriguez et al. 2010). Rodriguez et al. (2010) using a 15 mm depth of insertion compared to 25 mm in the present study. Because the welded bond is continuously formed and destroyed during welding (Pizzi et al. 2004), the longer the welding time at high temperatures, the greater the odds of burning the wood at the interface. Ganne-Chedéville et al. (2005) studied the mechanical properties of welded dowels at 15 and 40 mm depths of insertion into European beech. Using optimized parameters obtained with a 15 mm depth of insertion, for a withdrawal strength of 8.4 MPa (3184 N), a two-block welding of 40 mm provided a withdrawal strength of only 3.8 MPa (3858 N). Unlike with gluing, deeper dowel insertion might not translate into an improvement in welded dowel tensile strength. A manual or an automatic dowel insertion into the wood substrate could also alter the final properties of the welded bondline. During manual insertion, the operator induces acceleration, which could push the dowel more tightly into the pre-drilled hole. Species also appears to significantly affect the mechanical properties at the welded interface. Anatomically, the wood rays in European beech wood are larger than in sugar maple or yellow birch. This tends to limit the insertion speed in European beech substrate, preventing splitting and producing more charring.

3.5.2 Temperature measurement at the interface during welding

The effects of species, dowel rotation and insertion rate on temperature measured at the interface (welding zone) were studied. Each parameter mentioned in the previous section was investigated, except for grain orientation, due to inconclusive results in a preliminary study. The results from the analysis of variance are presented in Table 3.4. As no significant interaction was found, only the main effects were examined. The statistical analysis showed that both species and rotational speed had a significant effect on peak temperature at the interface during welding, with rotational speed having the most significant effect. Insertion speed had no influence on peak temperature during welding. These results suggest that, although insertion speed determines charring at the interface and fibre expulsion from the welded interface, the peak temperature during wood welding is the main influencing factor for bondline quality in wood welding.

Table 3.4 Statistical analysis of variance results for the effect of welding parameters on peak temperature at the interface.

Source of variation	F-value	<i>Pr</i> > F ^a
Species	5.86	0.0178*
Rotational speed (R)	16.71	<0.0001*
Insertion speed (I)	0.50	0.6090
Species x R	1.60	0.2080

^a Asterisk indicates significance at $\alpha=0.01$.

Peak temperature at the welded interface increases progressively with increasing rotational speed for both species. For sugar maple, an average temperature of 244 °C was measured at 1000 rpm, 281 °C at 1500 rpm, and 329 °C at 2500 rpm. For yellow birch, average temperatures were 282 °C at 1000 rpm, 297 °C at 1500 rpm, and 327 °C at 2500 rpm (Table 3.5). Higher average temperatures were reached with yellow birch than with sugar maple. Rodriguez et al. (2010) reported higher average temperatures for sugar maple during the welding process than for yellow birch (266-323 °C and 244-308 °C, respectively). The main differences appear at low rotation speed. Anatomical and chemical differences due to heterogeneity in the wood material could influence the temperature during welding and the final physical properties of the welded joint. A constant machine-dowel insertion rate versus a variable manually-operated drill speed could also explain this difference.

Table 3.5 Experimental results for peak temperature (*T*) during rotational wood-dowel welding.

Rotational speed (rpm)	Sugar maple		Yellow birch	
	Mean <i>T</i> ± SE ¹ (°C)	Max <i>T</i> (°C)	Mean <i>T</i> ± SE ¹ (°C)	Max <i>T</i> (°C)
1000	244 ^a (12) ^b	303	282 (11)	337
1500	281 (11)	326	297 (9)	333
2500	329 (10)	380	327 (17)	371

^a Mean of 5 replicates; ^b Standard error.

Peak welding temperatures with optimal parameters (244 °C and 282 °C for sugar maple and yellow birch, respectively) were generally reached in less than 1 s, after which the temperature stabilized. This is correlated with reduced friction due to the presence of molten material at the dowel-hole interface (Zoulalian and Pizzi 2007). As soon as the

dowel rotation stopped, the temperature decreased. Temperature profiles in the present study were similar to those previously obtained for manual rotational dowel welding with sugar maple and yellow birch (Rodriguez et al. 2010). Peak temperatures were higher than those for European beech (183 °C) (Kanazawa et al. 2005, Zoulalian and Pizzi 2007). Temperature measurement methods and anatomical differences between species might explain these results.

3.5.3 Species combinations

Species combinations tests between sugar maple and yellow birch were conducted to gain additional information on wood-dowel welding. Two parameter sets were used based on optimized results: 1000 rpm and 25 mm s⁻¹ (optimized sugar maple parameters) and 1000 rpm and 16 mm s⁻¹ (optimized yellow birch parameters).

Sugar maple dowel and yellow birch substrate with the optimized sugar maple parameter set (SM-YB-SM) provided a 5.8 ±0.2 MPa (standard error) withdrawal strength. This was the best combination for tensile strength, representing a 26% improvement over a standard yellow birch welding without combination (4.6 MPa). The fracture consistently occurred at the welded interface, except for a few specimens, where the fracture resulted from ruptures of both the wood and the welded interface. The same species combination with optimized yellow birch parameters (SM-YB-YB) provided a 5.1±0.2 MPa withdrawal strength. The improvement for yellow birch could not be reproduced with sugar maple. The YB-SM-SM combination provided an average 3.7±0.3 MPa withdrawal strength. Using optimized yellow birch parameters (YB-SM-YB), the withdrawal strength dropped to 3.4±0.4 MPa, and half the prepared specimens were incompletely welded.

Welding of yellow birch substrate was improved using sugar maple dowels, which appear to be better suited for wood dowel welding. Optimized sugar maple parameters appeared to be more appropriate for all combinations tested. Therefore, the parameter set that corresponds to the dowel (species) and not the substrate should be selected. The proportion of major cell types is relatively similar for the two diffuse-porous hardwoods studied, with the exception of ray cells (17.9% for sugar maple and 10.8% for yellow birch) (Panshin and de Zeeuw 1980). However, a nominal density difference between sugar maple and yellow

birch was observed by Jessome (2000) (659 kg m^3 and 608 kg m^3 , respectively). This suggests a correlation between wood density and the friction at the welded bondline that causes a temperature increase. Species welding performance could also be related to lignin structure differences. In a study on chemical changes in wood welding using sugar maple and yellow birch, Ying et al. (2010) noted a more pronounced guaiacyl character of sugar maple wood lignin. This would be responsible for the higher reactivity of this lignin, which would lead to differences in condensation reactions in the wood polymer composition during welding.

3.6 Conclusion

This study was conducted to define the optimal rotational wood-dowel welding parameters for sugar maple and yellow birch, two hardwood species commonly used in Canada for indoor appearance applications. A wood-dowel welding machine was used to investigate the parameters grain orientation, rotational speed, and insertion speed. An interaction was found between species, rotational speed, and insertion speed. A good wood welded bondline requires a fine balance between peak temperature at the interface, welding time at high temperature, charring, and the quantity of material expelled from the interface. This complex combination of factors might explain the interaction, because each parameter affects the others. Species appears to be one of the most influential variables, as it affected welded bondline strength in sugar maple, which showed stronger joints than yellow birch. Insertion speed and rotational speed also had a significant influence on joint strength. Species and rotational speed were the only parameters that influenced both peak temperature at the welded interface and tensile strength at the welded bondline.

The welded interface appears to have been influenced more by dowel species than substrate species. Because the dowel diameter was larger than the substrate hole diameter, most of the welded material would derive from the dowel. A good species mix welding appears to be influenced mostly by dowel species. These results could find useful application through a hardwood-softwood combination that would potentially produce a strong welded joint for structural purposes. However, further studies are needed to confirm the potential of wood welding for structural applications.

Based on these results, high-speed rotation-induced wood-dowel welding appears suitable for producing panels with sugar maple and yellow birch. Wood-dowel welded panels produced by inserting dowels into the side of wood substrate slats using rotational wood-dowel welding could be used for a range of applications. The technique could be appropriate for wood-welded pallets made with ungraded wood or furniture components, flooring, and cabinets made with smaller cuttings. However, further research is needed to determine the behaviour of welded interfaces with moisture variations and to develop new applications.

Chapitre 4 Fabrication et propriétés de panneaux lamellés-soudés conçus à partir d'essences feuillues canadiennes.

4.1 Résumé

Cette étude examine la faisabilité du panneautage à partir de la technologie de soudage du bois par friction rotationnelle à partir d'érable à sucre et de bouleau jaune pour des applications d'apparence intérieures. Pour chacune des essences étudiées, douze panneaux de 30 mm x 225 mm x 300 mm ont été fabriqués avec une panneauteuse automatisée conçue spécifiquement pour le soudage rotationnel à partir des paramètres optimaux déterminés lors de travaux précédents. Six panneaux lamellés-collés de mêmes dimensions pour ces essences ont été assemblés pour fins de comparaison avec une émulsion de type acétate de polyvinyle (PVA) couramment utilisé dans l'industrie pour ce type d'assemblage. Des essais de flexion statique en 3 points ont été effectués afin d'adresser la performance mécanique des assemblages. Des essais non destructifs sous caisson climatiseur ont également été effectués afin comprendre le comportement d'un panneautage lamellé-soudé sous atmosphère alternativement humide (20 °C et 80 % HR) correspondant aux conditions estivales et sèche (20 °C et 20 % HR) pour des conditions hivernales. Une inspection visuelle a été effectuée à chaque étape de ce cycle afin d'observer les déformations ou délaminations possibles pouvant se produire sur les panneautages. L'objectif étant ainsi de s'assurer que les assemblages lamellés-soudés conservent leur apparence visuelle initiale et ce, malgré des conditions de vie utile difficiles. Des contraintes maximales moyennes à la rupture en flexion de 1,79 kN et 1,70 kN ont été obtenues à des conditions de teneur en humidité standards pour les panneaux lamellés-soudés de bouleau jaune et d'érable à sucre, respectivement. La fracture se produisait généralement dans la section transversale du goujon et aucun déplacement des goujons n'a été observé à l'interface de soudage. De la délamination dans les panneautages a été constatée au terme des cycles à atmosphère variable autant pour les constructions soudées que collées sans toutefois affecter les propriétés en flexion de celles-ci. Les résultats confirment le potentiel du soudage par friction rotationnelle pour la production de panneaux lamellés-soudés à partir d'essences feuillues canadiennes. Des travaux

supplémentaires sont cependant nécessaires afin de concevoir des panneaux ayant une position plus efficace des goujons permettant d'obtenir des propriétés mécaniques comparables ou supérieures à celles de leur équivalent collé.

4.2 Abstract

This study examines the suitability of wood welding technology for producing composite panels for furniture applications with two Canadian hardwood species, sugar maple (*Acer saccharum*) and yellow birch (*Betula alleghaniensis*). For each species, twelve 30 mm x 225 mm x 300 mm panels were manufactured using a panelling machine specifically designed for rotational wood-dowel welding with optimized parameters obtained from a previous study. Six edge-glued panels of the same size were manufactured from each species using a non-structural polyvinyl acetate (PVA) adhesive and tested for comparative purposes. The experimental program included three-point bending at 255-mm span and visual inspection of the panels to assess performance at standard moisture conditions and after an aging cycle with variable relative humidity. Average breaking load of 1.79 kN and 1.70 kN was obtained at standard moisture conditions for welded panels of yellow birch and sugar maple, respectively. Fractures consistently occurred in the dowel's cross-section, whereas no slippage was observed along the welded interface. Delamination between wood slats occurred after the aging cycle, but did not affect the bending properties. Results confirm the suitability of wood-dowel welding for producing furniture panelling with Canadian hardwood species. Further research is needed to design panels with a more efficient position and use of welded dowels and with panel product properties that are comparable or superior to those of glued counterparts.

4.3 Introduction

Rotational wood-dowel welding without an adhesive has recently been shown to rapidly produce wood joints of considerable strength (Pizzi et al. 2004, Ganne-Chedéville et al. 2005, Kanazawa et al. 2005). Previous studies have investigated structural applications of wood products assembled by dowel welding, such as suspended wood flooring (Bocquet et al. 2007a), mortise and tenon wood joints (Mougél et al. 2011), and laminated wood beams (Bocquet et al. 2007b). Wood furniture joints (Segovia and Pizzi 2009), wood-welded chairs (Renaud 2009), wood-dowel welding in wood composite panels (Resch et al. 2006),

and more recently, sustainable wood-welded panels with European species (Belleville et al. 2011) are some other successful product developments.

Rotational wood-dowel welding offers a promising alternative for panelling applications in the furniture industry. Friction between the dowel and substrate during insertion (less than 3 s) combined with high-speed dowel rotation causes the temperature to rise, which induces the lignin to soften and the wood to weld. The usual adhesive used in hardwood panelling is polyvinyl acetate (PVA), which requires curing time (up to 24 hours) and multiple handling. These constraints limit the production flow and flexibility required for customized production. In addition, wood-dowel welding can reduce the use of petrochemicals, increase productivity, and lower production costs.

Most studies to date on rotational wood-dowel welding have considered European species such as European beech (*Fagus sylvatica*), European ash (*Fraxinus excelsior*), or Scots pine (*Pinus sylvestris*), with less attention paid to North American species. The objectives of the present study were therefore 1) to produce wood-welded panels made from sugar maple (*Acer saccharum*) and yellow birch (*Betula alleghaniensis*), two Canadian hardwood species that are frequently used for indoor appearance products, using a specifically designed panelling machine; 2) to assess the flexural properties of the wood-welded panels, considering the required load-bearing capacity for a typical standard panel used for furniture components; 3) to assess the performance of the wood-welded panels at standard moisture conditions and after humidity cycling; and 4) to compare the flexural properties of the wood-welded panels with those of PVA-glued counterparts.

4.4 Material and methods

4.4.1 Test specimen preparation

All wood material was pre-conditioned in a conditioning room at 20 °C and 60% relative humidity (*RH*) until constant mass was reached. To prepare panel specimens, 25 mm x 30 mm x 225 mm slats of sugar maple and yellow birch wood were cut from clear wood material. For each panel, 12 slats were attached by 44 wood-welded dowels to assemble a 30 mm x 225 mm x 300 mm panel (Fig. 4.1). Twelve wood-welded panels per species were assembled and then stored at 20 °C and 60% RH for 7 days prior to testing.

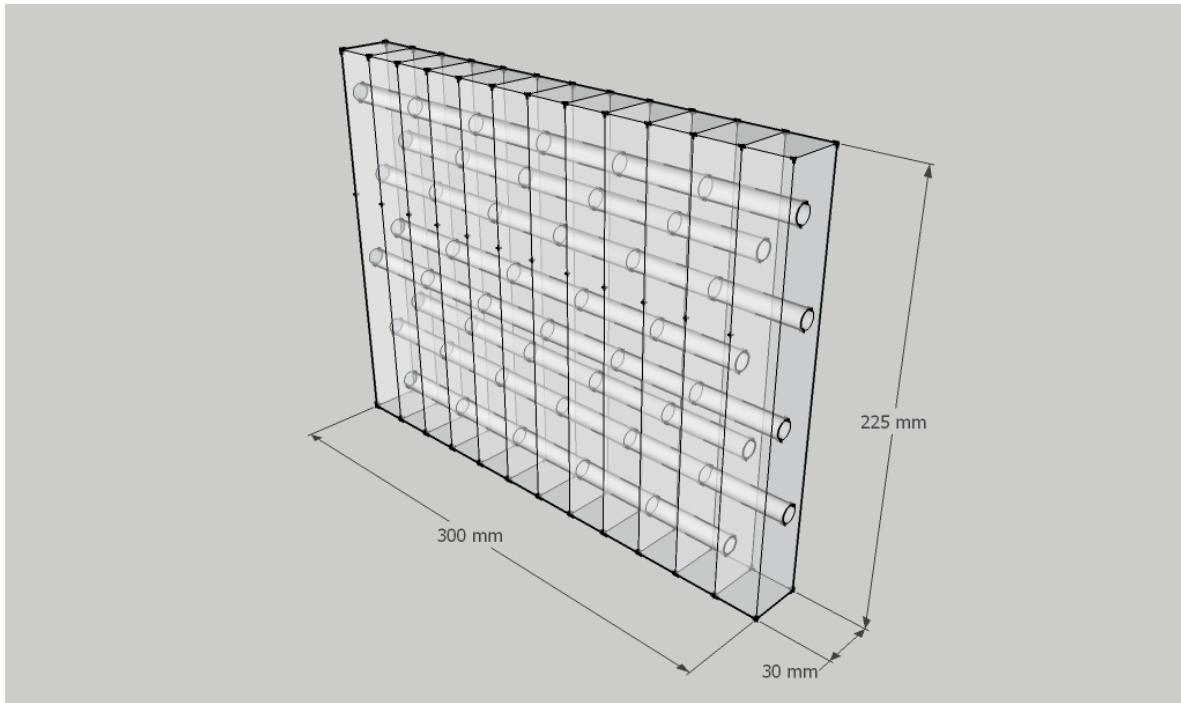


Figure 4.1 Schematic view of a wood-welded panel.

4.4.2 Wood welding parameters

High-speed rotation-induced mechanical friction wood-dowel welding was performed using a panelling machine specifically designed at the *Centre de Recherche Industrielle du Québec*. The machine included a multi-functional rotational system coupled with a pneumatic supporting device to hold the wood slats together during welding. The multi-functional rotational system was mounted on a vertical shaft and equipped with a drill to bore a hole, a chuck to hold the dowel during insertion, and an end mill to remove the excess dowel. Two welding parameter sets were applied, based on results of our previous study (Belleville et al. 2012): 1000 rpm rotational speed and 25 mm s^{-1} insertion speed for sugar maple and 1000 rpm and 16 mm s^{-1} for yellow birch.

Plain-shank dowels of sugar maple and yellow birch wood, 9.68 mm in diameter and 96 mm in length, were commercially manufactured by a local supplier. Dowels were welded by inserting them into pre-drilled holes 7.67 mm in diameter and 50 mm deep into two adjacent slats. The same species was used for each dowel and slat combination (Fig. 4.2). Holes were positioned at 50-mm centre-to-centre distance and 25-mm distance from the end. Each pair of dowels was placed in offset position, with one dowel 5 mm above and the

other 5 mm below the centre of the panel. After insertion, the excess dowel was removed with the end mill. Using the same procedure, successive slats were attached using a row of dowels positioned at 25 mm offsets along the length and at staggered vertical positions. The placement of wood-welded dowels were inspired from CSA standard CSA-086 (CSA 2005).



Figure 4.2 Cross-cut wood dowel welded through two wood slats.

4.4.3 Edge-glued panels

Edge-glued panels with identical dimensions to the wood-welded panels were produced for comparative purposes. A cold-set non-structural polyvinyl acetate (PVAc) emulsion was used as the adhesive. Glued panels were prepared according to typical industrial assembly parameters and techniques. The adhesive film thickness was 0.127 mm. The pressure applied was 1.38 MPa for 2 h at 20 °C as suggested by the manufacturer.

4.4.4 Three-point bending tests

4.4.4.1 Panel bending properties estimation

The normal stress (σ) distribution in a solid or edge-glued panel under transverse load can be modelled using beam theory. It is assumed that within the elastic limit the compressive and tensile stresses develop in the cross-section of the beam in proportion to the distance

from the neutral axis. Fibres in the upper part of the beam are in compression, whereas fibres in the lower part are in tension (Fig. 4.3). Although no data on bending of wood perpendicular to the grain is available in the literature, we can assume the following equation (USDA 2010):

$$E_{90} \cong \frac{E_0}{15.4} \quad [43]$$

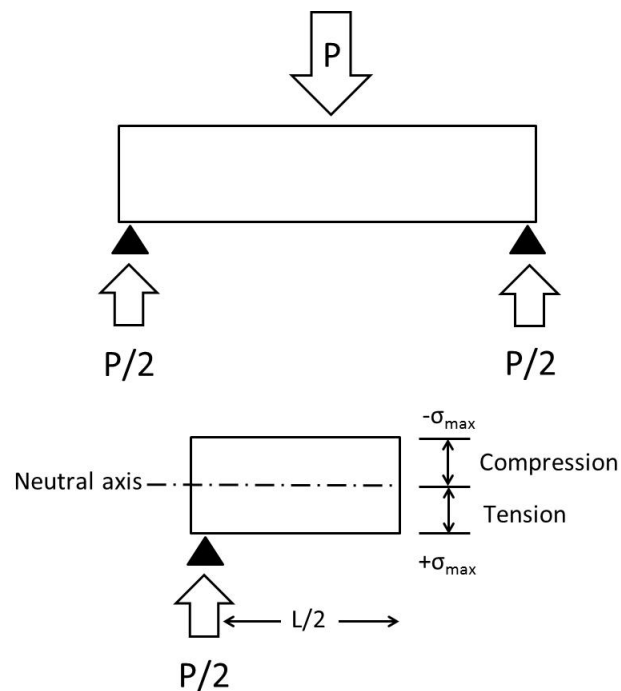


Figure 4.3 Schematic view and type of stress in a clear wood beam tested in three-point bending. P : load; σ : bending stress; L : span.

The stress distribution in a wood-welded panel under a transverse load is somewhat complex, and potentially similar to that for a reinforced concrete plate: the compressive stress develops in the upper part through the contact between the adjacent slats, whereas the tensile stress in the lower part is resisted by the dowels only (Fig. 4.4). However, given the geometry of the panel, the dowels in the lower part would not be in simple tension, but instead in a complex stress–strain state. Due to their low slenderness ratio ($L/D \cong 7$) and position in the panel, these dowels would be subjected to combined bending and shear. In the upper part of the panel, the compressive stress would act perpendicular to the grain of

the slats and parallel to the grain of the dowels. Therefore, these dowels would be expected to provide compression reinforcement and to be subjected to combined bending and shear stresses. The stresses would be transferred to the dowels in both parts through the welded interface. The depth of the compression zone and hence the bending properties of the wood-welded panel would depend on 1) the number and vertical positioning of the dowels, 2) the elastic properties of the wood slats (in particular, MOE perpendicular to the grain), 3) the welded bond shear strength, and 4) dowel strength and stiffness. The following model was developed to determine these properties:

The panel's maximum bending stress (σ_{max}) can be obtained with the following equation:

$$\sigma_{max} = \frac{M}{I} * Y \quad [44]$$

where M is the bending moment; I is the moment of inertia; and Y is the position along the y axis in the section area in which the stress is calculated. The moment of inertia (I) for the dowels (D_i) and the substrate section between D_i and the panel's top surface (S_i) can be determined from eqs. 45 and 46:

$$I_{d_i} = \frac{\pi d^4}{64} \quad [45]$$

$$I_{S_1} = \frac{B t_1^3}{12} \quad [46]$$

where d is the dowel diameter at neighbouring slat junctions (7.67 mm); B is the panel width (mm); and t_1 is the depth of the contact area (mm) which can be found by trial and error until equivalent to the distance between the neutral axis (Z) and the panel's top surface.

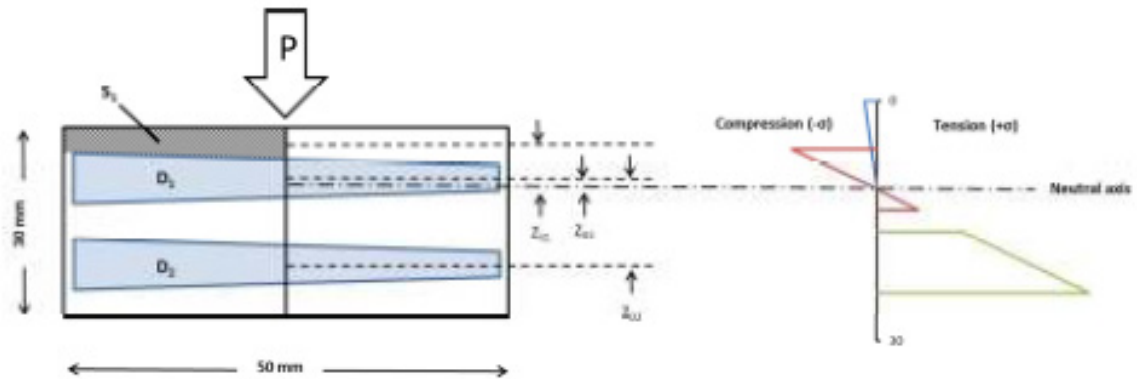


Figure 4.4 Schematic view and stress distribution in two wood slats held together by two wood-welded dowels ($D1$ and $D2$) tested in three-point bending. SI : substrate section between $D1$ and the panel's top surface (hatched); P : load; σ : bending stress; Z_i : distance between the central axis of an element and the neutral axis.

M can be calculated using the following equation:

$$M = \frac{P_{max} L}{4} \quad [47]$$

where P_{max} is the load at break (N) and L is the span (255 mm).

The position along the y axis in the section area in which the stress is calculated is shown in Fig. 4.5. Assuming a load concentrated at the centre of the wood-welded panel, the neutral axis (Z) can be calculated as follows:

$$Z = \frac{\sum(E_i A_i Y_i)}{\sum(E_i A_i)} \quad [48]$$

where E_i is the bending properties of component i (MPa) and A_i is the section area of component i (mm^2).

The bending stiffness ($E_i A_i$) for SI and d_i can be obtained from eqs. 49 and 50, respectively.

$$E_{S_1} A_{S_1} = E_{90} A_{S_1} = \frac{E_0}{15.4} * B * t_1 \quad [49]$$

$$E_{d_i} A_{d_i} = E_0 \frac{\pi d^2}{4} N \quad [50]$$

where E_{90} is the bending properties perpendicular to the grain; E_0 is the bending properties parallel to the grain; t_1 is the depth of the contact area (mm); and N is the number of dowels. The parameter t_1 can be found by trial and error. The effective bending stiffness (EI_{eff}) can be calculated using the following equation:

$$EI_{eff} = \sum(E_i I_i + E_i A_i Z_i^2) \quad [51]$$

where Z_i is the distance between the central axis of an element and the neutral axis, as shown in Fig. 4.4.

The section modulus (S_{eff}) was calculated with eq. 52

$$S_{eff} = \frac{EI_{eff}}{E_i} Z_{D_2} \quad [52]$$

Then σ_{max} can be obtained with eq. 53

$$\sigma_{max} = \frac{M * E_i}{EI_{eff}} Z_{D_2} \quad [53]$$

and introducing eqs. 47 and 52 into eq. 53, eq. 54 is obtained:

$$\sigma_{max} = \frac{M}{S_{eff}} = \frac{L P_{max}}{4 S_{eff}} \quad [54]$$

Based on the static bending properties for each species (Jessome 2000), P_{max} for yellow birch and sugar maple wood-welded panels would be 2.1 and 2.3 kN, respectively.

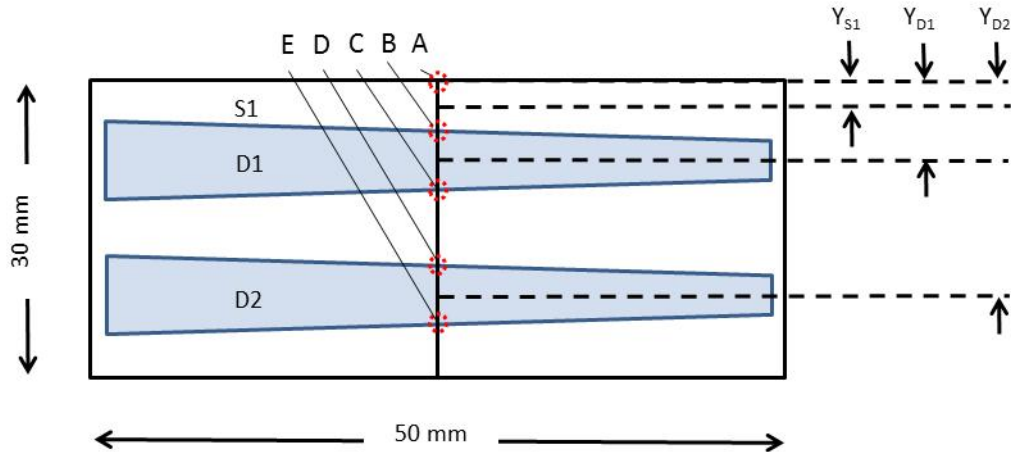


Figure 4.5 Schematic view of two wood-welded dowels ($D1$ and $D2$) holding two wood slats together. Y_i : position along the Y axis on the section area in which the stress is calculated; $S1$: substrate section between $D1$ and the panel's top surface; A to E: Distance (mm) from surface (point A) of a specific point inside the wood-welded panel (A: 0; B: 6; C: 13.67; D: 16.33; E: 24).

4.4.4.2 Panel bending properties determination

Panels were subjected to three-point bending tests using a universal testing machine (MTS QT 5 KN, MTS Systems Corporation, Eden Prairie, MN) based on ASTM D1037 (ASTM 2006) (Fig. 4.6). The test procedure was slightly modified to account for panel thickness and the manufacturing equipment used (span-depth ratio: 8.5). The load (P) was applied at the centre of the panel under a constant 2 mm min⁻¹ head displacement and 255-mm span (S). The first panel of each series was tested until fracture to determine P_{max} . Five panels for each series were then tested at the same speed but according to a loading program: once 0.4 of the predetermined P_{max} was reached, the load was decreased to 0.1 P_{max} for 30 s and then increased until panel rupture occurred. Panel deflection was calculated with TestWorks 4.11 B. A linear regression of the load-deflection curve ($\Delta F/\Delta \delta$) from 0.1 to 0.4 of P_{max} was calculated. The slope of the resulting linear elastic portion of this curve provided valuable information on panel stiffness.

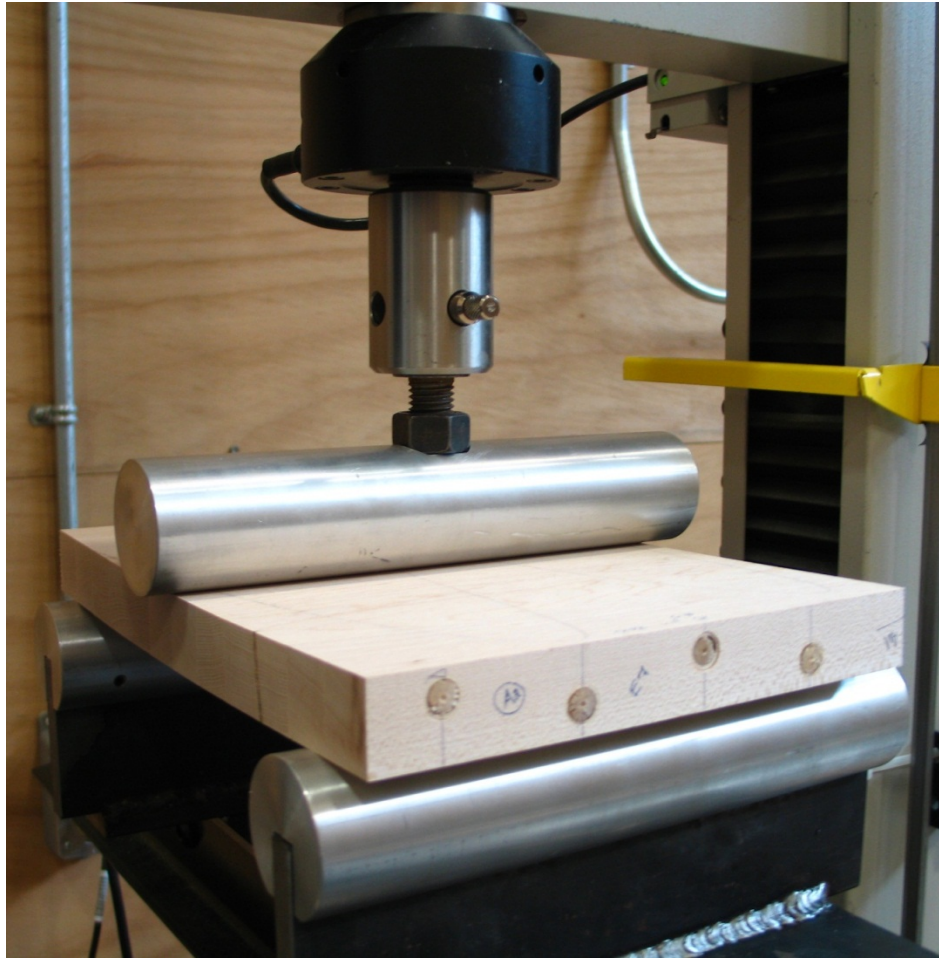


Figure 4.6 Three-point bending test.

4.4.5 Humidity cycle

Panels were tested according to a specifically developed protocol for indoor wood-composite panels in North American conditions (Blanchet et al. 2003). The humidity cycling test provides valuable information on wood-welded panel delamination under typical Canadian climate changes. Six wood-welded and three PVA-glued panels were assembled for each species. Panels were varnished with a 95% gloss precatalyzed clear lacquer to facilitate visual inspection and pre-conditioned at 20 °C and 60% RH. Panels were then submitted to a relative humidity cycling test (Fig. 4.7) and then visually inspected. Cycling conditions were: 1) 20 °C and 80% RH for 24 h; 2) 20 °C and 20% RH for 24 h; 3) 20 °C and 80% RH for 72 h; and 4) 20 °C and 20% RH for 72 h. The visual inspection aimed to detect delamination and/or distortion in the panels. After humidity

cycling, the wood-welded panels were again stored at 20 °C and 60% RH for 14 days prior to static bending testing, as described above.

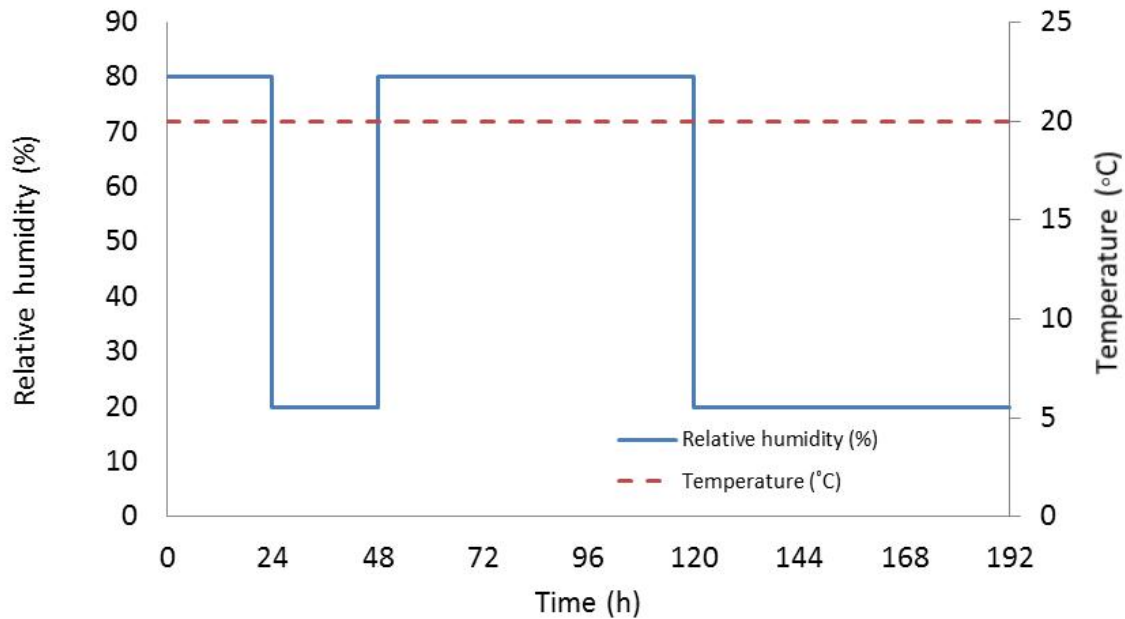


Figure 4.7 Relative humidity cycle used to force deformation of the wood-welded panels.

4.5 Results and discussion

4.5.1 Three-point bending tests

Test results at standard moisture conditions and after humidity cycling are presented in Table 4.1. Wood-welded panels showed failure in the joints at the midspan of the panel or in the lamination next to it (Fig. 4.8). Fractures consistently occurred as splintering tension in the dowels (ASTM 2009, Fig. 4.9), which usually occurs in wood at low moisture content (Bodig and Jayne 1993). No slippage was observed along the welded interface. Signs of compression deformation perpendicular to the grain were occasionally observed in the upper part of the wood slats (above *DI*), indicating that the welded dowel joint was not the weakest element, and therefore did not have the greatest effect on panel stiffness.

Table 4.1 Load at break (P_{max}) and slope of the straight line portion of the load deflection curve ($\Delta F/\Delta\delta$) during three-point bending testing for sugar maple and yellow birch wood-welded or edge glued panels under constant or varying hygrometric conditions.

Species	Joint type	Hygrometric conditions					
		At equilibrium			After humidity cycling		
		$P_{max} \pm SE^1$ (kN)	$\Delta F/\Delta\delta^2 \pm SE$ (kN mm ⁻¹)	$\delta_{max}^3 \pm SE$ (mm)	$P_{max} \pm SE$ (kN)	$\Delta F/\Delta\delta^2 \pm SE$ (kN mm ⁻¹)	$\delta_{max} \pm SE$ (mm)
Sugar maple	Welded	1.70 (0.14)	0.37 (0.04)	11.1 (3.8)	2.13 (0.05)	0.45 (0.01)	9.2 (0.7)
	Glued	5.75 (0.76)	1.52 (0.05)	3.9 (1.1)	-	-	-
Yellow birch	Welded	1.79 (0.04)	0.34 (0.01)	14.0 (2.1)	1.82 (0.06)	0.34 (<0.01)	13.1 (2.4)
	Glued	5.21 (0.52)	0.98 (0.04)	6.2 (0.8)	-	-	-

¹Standard error; ²Linear regression of the load-deflection curve from 0.1 to 0.4 of P_{max} ; ³Average deflection at failure.



Figure 4.8 Failure of a wood-welded panel in the joints at the midspan or in the lamination next to it following bending tests.



Figure 4.9 Fractured dowels with no slippage along the welded interface.

The average P_{max} at standard moisture conditions was slightly higher for yellow birch (1.79 kN) than for sugar maple (1.70 kN), although the difference was not statistically significant ($\alpha = 0.05$). Better overall elastic stiffness results were obtained for sugar maple wood-welded panels (0.37 kN mm^{-1}) than for yellow birch (0.34 kN mm^{-1}). However, no significant difference in P_{max} ($\alpha = 0.05$) was found between species. The average deflection at P_{max} for wood-welded panels was 11.1 mm for sugar maple and 14.0 mm for yellow birch.

The elastic stiffness and bending strength results were significantly higher for glued than for wood-welded panels. The dowel's cross-section area, where the stresses were concentrated, was significantly smaller than the edge-glued surface, and dowel placement appeared to be inefficient for the applied load. Results are in accord with those of Vallée et al. (2012) who stated that the load transfer in wood welded joints could be conceptually comparable to adhesively bonded joints with an efficient panel design. As observed previously with wood-welded panels, species was not an influential factor for the mechanical properties of edge-glued panels. The average P_{max} and elastic stiffness of PVA-glued panels was 5.75 kN and 1.52 kN mm^{-1} for sugar maple and 5.21 kN and 0.98 kN mm^{-1} for yellow birch, respectively. The average deflection at fracture for glued sugar maple panels ($3.9 \pm 1.1 \text{ mm}$) was significantly lower than for yellow birch ($6.2 \pm 0.8 \text{ mm}$).

Typical load-deflection profiles for wood-welded and edge-glued panels are presented in Fig. 4.10. Deflection in wood-welded panels was relatively high compared to edge-glued panels, approximately (15 mm and 5 mm, respectively). The elastic limit for both wood-welded and edge-glued panels appeared to be around 4 to 5 mm deflection. While the behaviour of an edge-glued panel was brittle due to rupture of the wood fibers in tension at the bottom, the wood-welded panels showed large plastic deformation beyond the elastic limit (as shown in Fig. 4.10), which corresponds approximately to the stress at proportional limit perpendicular to grain at the upper face of the panel; i.e., at 9.72 MPa and 7.24 MPa for sugar maple and yellow birch, respectively, according to Jessome (2000). Large deflection occurring in wood-welded panel can be explained by the fact that the bottom parts of the wood slats were not welded and were free to separate during the bending test. Plastic deformation and crushing of the fibers in the upper part of the panel would also

translate in a wider gap at the bottom of the panel as bending test progress. The plastic deformation would continue until the rupture of the wood-welded dowels. The dowels ultimately splintered when their tension strength was exceeded, corresponding to a load of roughly 2 kN as depicted in Fig. 4.10.

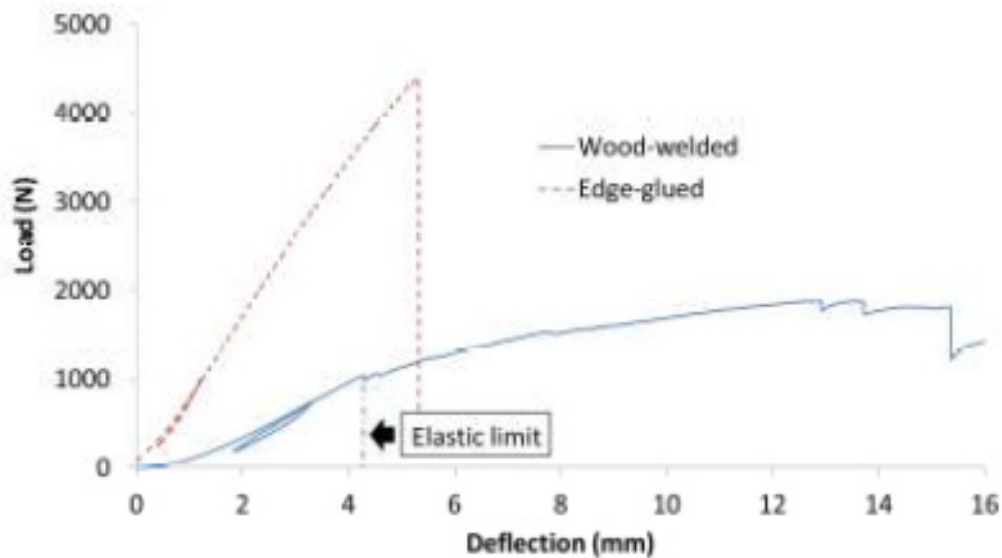


Figure 4.10 Typical three-point bending test load-deformation curve for yellow birch wood-welded and edge-glued panels at equilibrium.

The estimated mechanical properties were higher than the experimentally determined properties for both species. This difference could be due to the wood material density or quality. Wood material density (oven-dry mass/saturated volume) was measured following testing. Results showed lower wood material density than reported in the literature for both species (Jessome 2000). The biggest difference compared to the literature was found for wood dowels (birch: 494 ± 30 kg per cubic meter; maple: 545 ± 70 kg per cubic meter). In fact, commercially manufactured wood dowels are generally made from wood residuals and/or lesser quality tree sections, with lower mechanical attributes than standard clear wood material. This material could also be more heterogeneous and anisotropic than clear wood.

The use of beam theory in the analysis is also an approximation, given the complex interaction between the material properties and the geometry of the welded panel. The development of a numerical model using the finite element method coupled with additional tests on more panels with various configurations (*e.g.*, dowel spacing and/or vertical positioning) could allow a more efficient validation and optimization of the experimental and estimated results. Further research is needed to optimize the panel design, including placement of the wood-welded dowels so that the properties of the produced panel are comparable or superior to its glued counterpart.

At equilibrium, wood-welded panels from both species yielded statistically similar bending properties. However, different behaviour was noted following humidity cycling. After aging cycles with variable humidity, the average P_{max} was significantly affected by species, with sugar maple (2.13 kN) providing better bending properties than yellow birch (1.82 kN). As observed above, the average deflection at failure for sugar maple (9.2 mm) wood-welded panels was lower than for yellow birch (13.1 mm). The elastic stiffness of yellow birch and sugar maple wood-welded panels was 0.34 and 0.45 kN mm⁻¹, respectively. Bending properties of sugar maple wood-welded panels improved significantly from an initial P_{max} and $\Delta F/\Delta\delta$ ratio of 1.70 kN and 0.37 kN mm⁻¹ to 2.13 kN and 0.45 kN mm⁻¹ following the relative humidity cycling. The humidity cycling did not affect the P_{max} or the $\Delta F/\Delta\delta$ ratio for yellow birch wood-welded panels (from 1.79 kN and 0.34 kN mm⁻¹ to 1.82 kN and 0.34 kN mm⁻¹).

Panel bending properties after relative humidity cycling were species dependent, which was not the case at equilibrium. Although P_{max} improved for both species, differences were significant only for sugar maple. The most plausible explanation is tangential swelling, which was greater for sugar maple than for yellow birch (Jessome 2000). Dowel swelling following the hygrometric cycle would provide a better contact between the dowel and substrate at the welded interface and improve the panel's bending properties. These results could also be explained by sorption hysteresis, caused by the desorption of active sorption sites along cellulose chains that form hydrogen bonds with each other as they lose water. During subsequent adsorption, the surface is subjected to a compressive stress that lowers the equilibrium moisture content. In addition, some of the hydrogen bonds between the

chains will not break until the fibres reach saturation, which is followed by another desorption step (Siau 1995). A further possibility, albeit somewhat less likely, is the high concentration of fatty acids and other lipophylic extractives in yellow birch (Dahm 1967, Lavoie and Stevanovic 2005) compared to sugar maple (Rowell 1984). Birch wood is rich in triterpenes and lipophylic extracts such as long chain fatty acids and sterols, which tend to migrate following temperature treatment (Stevanovic and Perrin 2009). The hydrophobic nature of extracts limits water adsorption in wood material. Hemingway (1969) reported reduced yellow birch wettability after thermal treatment from 105 to 220 °C. The temperature increase during welding of yellow birch wood could cause lipophylic components at the welded interface to migrate. A high concentration of those components at the welded zone would prevent water vapour from migrating to or from the welded interface during the conditioning cycle, and therefore limit swelling. This could explain the behaviour of yellow birch after the hygrometric cycle.

4.5.2 Panel appearance after humidity cycling

Wood-welded and glued panels were submitted to humidity cycling to assess the appearance and delamination of aged panels. Dimensional stability is an essential requirement for appearance products. Residual stresses related to manufacturing processes or to nonhomogeneous water vapour adsorption and desorption in service could induce distortion and consequently decrease product value. The objective was to confirm that wood-welded panels would retain their initial appearance after exposure to variable hygrometric conditions in service. No distortion was observed after the humidity cycles for both wood-welded and glued panels. Edge separation along the length of some wood-welded panels was observed after the first step at 20 °C and 20% RH for 24 h (Fig. 4.11). This can be explained by wood slat shrinkage in response to dry conditions. When the panels were reconditioned at 20 °C and 80% RH for 72 h, the splits previously observed at 20% RH disappeared due to wood swelling under moist hygrometric conditions, but reappeared in wood-welded panels and initially appeared in glued panels after the final 72-h step at 20 °C and 20% RH. Deeper separation of slats in the space between the dowels was observed in wood-welded panels (Fig. 4.12). Edge separation also occurred in glued panels at this point in the humidity cycling. After the final 72-h step at 20 °C and 80% RH, panels regained their original appearance. Wood-welded panels retained their solidity



Figure 4.11 Edge separation along the length of a wood-welded panel after 24h at 20 °C and 20% RH.

throughout the cycle. However, the improved assembling technique (*e.g.*, wood slats held under pressure during welding) and the adjustments to the wood material MC before welding would be required to keep delamination splitting to a minimum during the panel's life cycle. Edge separation of unglued edges due to variations in moisture conditions could also be minimized with a surface finishing treatment (*i.e.* varnish) to reduce moisture sorption.

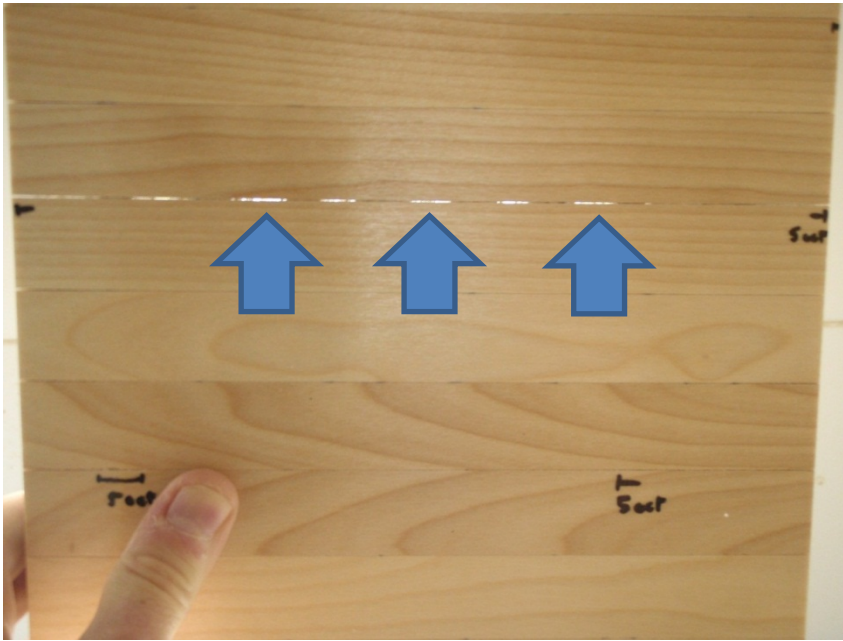


Figure 4.12 Separation of slats in between dowels after 72h at 20 °C and 20% RH.

4.6 Conclusions

The main objective of this study was to assess the suitability of wood welding technology for producing composite panels for furniture applications made with two Canadian hardwood species, sugar maple and yellow birch. Wood-welded panel specimens were produced with a specifically designed panelling machine, tested, and compared with PVA edge-glued counterparts. The behaviour of wood-welded panels in standard moisture conditions and after an aging cycle with variable humidity was also investigated.

Wood-welded panel bending properties were not affected by wood species, with average load at break of 1.79 kN and 1.70 kN for yellow birch and sugar maple, respectively. Fractures consistently occurred in the dowels as splintering tension, and no slippage was observed along the welded interface. From this perspective, the welded dowel joint was not the weakest element, and therefore did not have the greatest effect on panel stiffness. The bending properties of the wood-welded panel appeared to depend on performance criteria such as the number and vertical positioning of the dowels, the elastic properties of the wood slats, the welded bond shear strength, and the strength and stiffness of the dowels. Further research is needed to design panel configurations with more efficient placement and use of wood-welded dowels in order to produce panel products with properties that are comparable or superior to those of their glued counterparts. The development of a numerical model could help shed light on the mechanics of wood-welded panels submitted to a bending effort. Combined with a sensitivity analysis, such models could help optimize the design parameters.

No distortion was observed in wood-welded panels following humidity cycling. The cycling did not negatively affect the panel's bending properties. Edge splitting was observed in both wood-welded and glued panels due to wood slat shrinkage in response to dry conditions. Additional work and/or special treatment on the panel surface is needed to improve the technique and to minimize splitting throughout the product life cycle.

Rotational wood-dowel welding of North American wood species provides a promising alternative to gluing. The results confirm that wood-dowel welding could be suitable for producing panels from certain North American species. The technique could help improve

production flow and flexibility by eliminating curing times for adhesive polymerization as well as multiple handling. Moreover, manufacturers would no longer need to buy or store petrochemically derived adhesives. Furthermore, because welded panels are made entirely of wood, they are also fully and easily recyclable.

Chapitre 5 Étude des changements thermochimiques dans le bois d'essences feuillues canadiennes durant le soudage.

5.1 Résumé

Les changements thermochimiques durant le soudage par friction rotationnelle ont été étudiés chez deux essences feuillues canadiennes couramment utilisées pour des applications d'apparence intérieures: l'érable à sucre (*Acer saccharum*) et le bouleau jaune (*Betula alleghaniensis*). Le matériel ligneux de référence et le matériel à l'interface de soudage de deux pièces de bois, un goujon et un substrat, ont été comparés dans le but d'expliquer les différences de propriétés mécaniques entre les essences. Pour ce faire, les méthodes de pyrolyse couplée à un chromatographe en phase gazeuse et un spectromètre de masse (Py-GC/MS), de spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier sur un montage de réflexion totale atténuée (ATR-FTIR), et de spectrométrie de photoélectrons induits par rayons-X (XPS) ont été utilisées. Les composés volatils libérés durant le procédé de soudage ont été déterminés par Py-GC/MS de même qu'avec un chromatographe en phase gazeuse avec détection de conductivité thermique et d'ionisation de la flamme (GC/TCD-FID). Les résultats démontrent que le procédé thermique lié au soudage du bouleau et de l'érable dégrade les hémicelluloses et affecte les polymères de la lignine via une dépolymérisation. L'efficacité du procédé de soudage est ainsi directement liée aux propriétés initiales des constituants du bois, essentiellement la lignine et les glucides. Les changements liés à la lignine à l'interface de soudage ont été plus nombreux chez l'érable à sucre que le bouleau jaune ce qui corrobore les résultats obtenus lors d'essai mécanique. Les proportions de composés volatils ont été similaires chez les deux essences. L'analyse des composés volatils a permis de conclure que les émanations produites lors du soudage sont négligeables et ne présentent pas de risque pour la santé humaine ou pour l'environnement.

5.2 Abstract

Thermochemical changes during wood-dowel welding were investigated in two Canadian hardwood species commonly used for indoor appearance applications: sugar maple (*Acer saccharum*) and yellow birch (*Betula alleghaniensis*). The original reference wood sample and the welded interface between two bonded wood pieces, a dowel and a substrate, were compared to explain differences in mechanical properties between species. Pyrolysis gas chromatography - mass spectrometry (Py-GC/MS), attenuated total reflection Fourier transform infrared spectroscopy (ATR-FTIR), and X-ray photoelectron spectroscopy (XPS) were used. The gases emitted during wood welding were determined by Py-GC/MS and gas chromatography coupled with a thermal conductivity detector and a flame ionization detector (GC-TCD/FID). Results showed that thermal welding of birch and maple woods degrades hemicelluloses and affects lignin polymer through depolymerisation. Welding effectiveness is therefore directly associated with the properties of the original wood constituents, primarily lignin and carbohydrates. The lignin-related changes at the welded interface were greater for sugar maple than for yellow birch, corroborating mechanical property differences observed between the two species. The gases proportions were similar for both species and no harmful gases were detected in the smoke released during welding process.

5.3 Introduction

Rotational wood-dowel welding by mechanical friction has been shown to rapidly yield wood joints of considerable strength (Pizzi et al. 2004, Belleville et al. 2012). The technique consists in assembling solid wood pieces by fusing the wood constituents at the contact surfaces without interposing an adhesive. This ecological alternative for panelling and assembling wood components offers the potential to increase productivity while reducing costs in the hardwood furniture industry. Commonly used adhesives such as polyvinyl acetate (PVA) require curing time (up to 24 hours). Moreover, they are generally derived from non-renewable fossil resources, making the end product expensive from both an ecological and economic standpoint. They also pose a recovery problem, as they are considered a source of contamination in biomass energy methods and wooden waste recycling (Gilbert 2005, Vallée and Buelna 2006).

Since wood welding shortens the production cycle and reduces dependence on the petrochemical industry, it has received increasing attention. By replacing synthetic resins with the intrinsic lignin binders present in lignocellulosic fibre materials, the depletion of fossil resources could be abated. Wood, which is a renewable, CO₂ neutral raw material, can play a key role in sustainable development and have a significant impact on responsible residual waste management. However, only a few studies on wood welding in North American species are available, and they have not fully addressed the chemical changes that occur during wood welding. A deeper knowledge of this process would enable further improvements in welding techniques and the mechanical properties of the welded joint.

Different thermochemical processes have been examined to deepen our understanding of the wood welding process. Some authors have investigated cross-link formation within lignin following extended heating (*e.g.*, Sanderman and Augustin 1964). Native lignin (in wood) or only slightly modified lignin under dry conditions has been demonstrated to soften at 205 °C (Salmén 1982). Sudo et al. (1985) observed cross-linking reactions while heating beech (*Fagus crenata*) wood chips with pressurized steam. Lignin has also been processed into a plastic material to improve binderless board mechanical properties (Anglès et al. 1999, 2001, Velásquez et al. 2002, 2003, van Dam et al. 2004). Cellulose fibrils can bond together after steam explosion (Tanahashi et al. 1989). Windeisen and Wegener (2008) observed characteristic changes in aromatic skeletal vibrations in European beech (*Fagus sylvatica*), indicating condensation reactions of lignin during different thermal treatments (combustion and thermal treatment).

Differences in wood polymer composition appear to influence wood performance during the welding process, and consequently the mechanical properties of the welded material. In a previous study, Sun et al. (2010) investigated chemical changes occurring at the welding interface of sugar maple (*Acer saccharum*) and yellow birch (*Betula alleghaniensis*) using a manually operated bench drill. The authors suggested that the mechanical performance differences between the two species might be related to lignin structure and welding temperature. The more pronounced guaiacyl character of maple lignin versus birch could explain the preferential condensation reactions of the guaiacyl moieties in maple lignin, implicating formaldehyde and furanic compounds released from lignin and carbohydrates

during the process. However, our recent measurements of peak welding temperatures in the same species using a fully automated machine specifically designed for wood-dowel welding (Belleville et al. 2012) were lower than those observed by Sun et al. (2010).

Temperature differences between these two studies could have resulted in different temperature loads on the wood and chemical changes at the welding interface, as significant lignin degradation reactions occurred at temperatures higher than 280 °C (Kudo and Yoshida 1957, Hill 2006). The aims of the present study were to 1) investigate chemical changes occurring at the welding interface produced by automated machining of sugar maple (*Acer saccharum*) and yellow birch (*Betula alleghaniensis*); and 2) determine the gases released during welding under conditions of optimised welding parameters (Belleville et al. 2012).

5.4 Material and methods

5.4.1 Sample preparation

All wood samples were preconditioned in a conditioning room at 20 °C and 60% relative humidity (RH) until constant mass was reached. Commercially manufactured plain-shank dowels of sugar maple (*Acer saccharum*) and yellow birch (*Betula alleghaniensis*) wood, 9.68 mm in diameter and 82 mm in length, were inserted using a rotational wood-dowel welding machine into pre-drilled holes 25 mm in depth and 7.67 mm in diameter in selected and prepared wood slats of 30 mm × 30 mm × 225 mm. Species were not mixed between slats or dowels. Two welding parameter sets were used based on results from a previous study (Belleville et al. 2012): a rotational speed of 1000 rpm and a 25 mm s⁻¹ speed of insertion for sugar maple; 1000 rpm and 16 mm s⁻¹ for yellow birch. Following welding, the material was again stored at 20 °C and 60% RH for 7 days prior to testing. Each specimen consisted of one dowel inserted into a wood slat substrate. According to standard tensile strength test method ASTM D1037 (ASTM 2006) and using a universal testing machine (MTS QT 5 kN, MTS Systems Corporation, Eden Prairie, MN), the dowel excess was pulled off the wood substrate. Reference wood (*Ref*) and welded material (*WM*) refer to the unwelded wood and the wood at the welded interface, respectively (Fig. 5.1a). Chemical analyses were performed on both species. Samples for pyrolysis (Py-GC/MS) analysis were collected by scraping wood from *Ref* and *WM* samples. Wood-welded dowels

were cut transversally to prepare samples for X-ray photoelectron spectroscopy (XPS) and attenuated total reflection Fourier transform infrared spectroscopy (ATR-FTIR) (Fig. 5.1b).

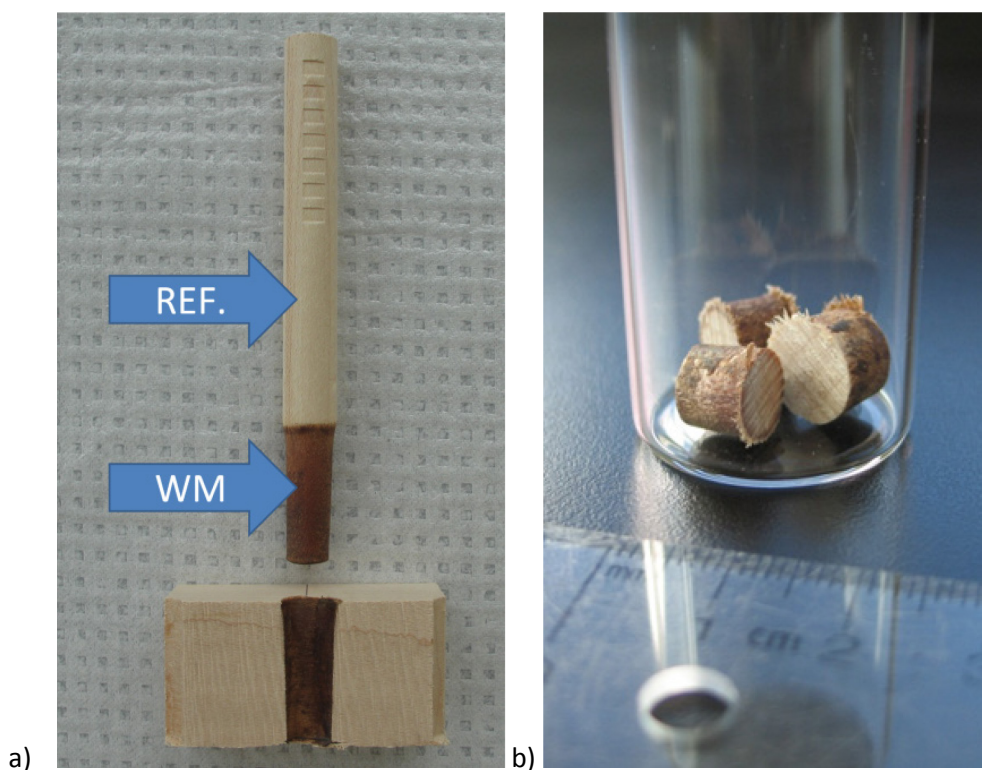


Figure 5.1 Wood-welded dowel and cross-cut section of wood substrate following tensile strength test. The wood reference (*Ref*) and welded material (*WM*) were used for the investigation on thermo-chemical modifications occurring at welded interface (a). Prepared samples from a wood-welded dowel for XPS and ATR-FTIR analysis (b).

5.4.2 Thermochemical changes analysis at the welded interface

5.4.2.1 Pyrolysis gas chromatography - mass spectrometry (Py-GC/MS)

Samples were pyrolysed at 550 °C in a helium atmosphere using a Pyroprobe 2000 pyrolyzer (CDS Analytical, PA, USA) coupled to a gas chromatograph (GC) (Varian CP 3800) and a mass spectrometer (MS) (Varian Saturn 2200 MS/MS, 30–650 a.m.u.). The flow rate of the carrier gas was 1.0 ml min⁻¹. The pyrolysis interface and the GC injector were set at 250 °C. Pyrolysis products were separated in a Varian FactorFour capillary column (VF-5 ms, 30 m × 0.25 mm × 0.25 μm). Pyrolysis was performed from 250 °C (holding for 10 s) to pyrolysis temperature (holding for 30 s) with a heating rate of 6 °C ms⁻¹. The GC oven was kept at 45 °C for 4 min and then heated to 280 °C at 4 °C min⁻¹. The final temperature was held for 15 min. The MS was operated in electron impact (EI) mode

using 70 eV energy and the mass range m/z 35–450 was scanned in 36 s. Compounds were identified by comparing the obtained mass spectra with those from the National Institute Standards and Technology (NIST 2000) mass spectral libraries and those reported in the literature (Faix et al. 1990, 1991, del Río et al. 2005, Nonier et al. 2006, Omrani et al. 2008, Sun et al. 2010). Relative compound distributions were calculated for each carbohydrate and lignin-derived pyrolysis product from the relevant peak areas. The summed areas of the relevant peaks were normalized to 100% (all products) and separate summations were performed for lignin-derived compounds containing oxygenated functions (Oxy) in side chains (aldehydes, ketones, alcohols, and esters) and for lignin-derived compounds with alkyl (Alk) side chains only. Oxy/Alk ratios for both guaiacyl (G) and syringyl (S) compounds were thus calculated for *Ref* and *WM* samples. Data from 3 pyrolysis experiments were used to determine average values.

5.4.2.2 Attenuated total reflection Fourier transform infrared spectroscopy (ATR-FTIR)

ATR-FTIR measurements were performed using a Spectrum 400 spectrometer (Perkin Elmer, UK) in the wavenumber range 4000–600 cm^{-1} . Samples were pressed against a high refractive index crystal (Diamond/ZnSe) to allow the incident radiation to penetrate the sample surface through the crystal. ATR-FTIR sampling depth was in the 0.3–3 μm range. All spectra were measured at 4 cm^{-1} resolution and the average of 64 scans was recorded. Water absorption peaks were automatically eliminated by the Atmospheric Vapor Compensation function, an algorithm performed in real time without the need to generate reference spectra of atmospheric absorptions. Spectra were baseline corrected using Origin Pro 8.5.1 software at 785, 1816, and 3700 cm^{-1} , following Nuopponen et al. (2004). A 1036 cm^{-1} band assigned to CO stretching was used to normalize the obtained spectra (Delmotte et al. 2008).

5.4.2.3 X-ray photoelectron spectroscopy (XPS)

XPS analyses were performed to identify the elements present at the sample surfaces using a Kratos Axis-Ultra spectrometer (Kratos Analytical, UK). Elemental composition was measured on 3 *ref* and 3 *WM* samples for each species. Survey spectra were recorded to provide quantitative data to determine the apparent composition. High-resolution C1s spectra were recorded to investigate the chemistry of the most abundant elements. Four

samples were mounted simultaneously onto the sample holder bar and received no treatment other than normal vacuum pumpdown. The take-off angle of the emitted photoelectrons was adjusted to 30 ° to the surface normal. The base pressure in the analysis chamber during XPS analysis was below 5×10^{-10} Torr. Hybrid lens mode was used to ensure maximum sensitivity, with an analysed spot equivalent in size to the monochromatic X-ray beam (dimensions 800 × 400 μm). The analyser was run in constant pass energy mode. XPS spectra were recorded using a monochromatic Al source operating at 300 W. High-resolution spectra used for chemical analysis were recorded at a nominal energy resolution of 0.5 eV (10 eV pass energy and 0.025 eV steps). The survey spectra used for quantitative elemental analysis were recorded in 1 eV steps and at 160 eV pass energy. The binding energy scale was corrected by referring to the polyaromatic peak in the C1s spectrum as 284.6 eV. Shirley backgrounds were subtracted from the spectra. A mixed Gaussian-Lorentzian product function was applied to curve fit the C1s spectra (Sun et al. 2010). The spectrometer was calibrated against standard reference samples: Au4f_{7/2}: 83.95eV; Ag3d_{5/2}: 368.2eV; Cu2p_{3/2}: 932.6eV (Seah et al. 1998).

5.4.3 Characterisation of gas emissions

5.4.3.1 Analyses of volatile organic compounds

Py-GC/MS was used to predict VOCs evolving from welding process. Wood material scraped from *Ref* samples for each studied species was pyrolysed according to specific wood-dowel welding temperature profiles determined in a previous study (Belleville et al. 2012). Samples were pyrolysed at 244 °C for sugar maple and 282 °C for yellow birch in a helium atmosphere to simulate the welding conditions determined in our previous study using the above-described apparatus. The flow rate of the carrier gas was 1.0 ml min⁻¹. The pyrolysis was performed from ambient temperature to the wood-dowel welding interface peak temperature (holding for 30 s), with a heating rate of 130 °C s⁻¹ for birch and 139 °C s⁻¹ for maple. The GC oven was kept at 45 °C for 4 min and then heated at 4 °C min⁻¹ to peak temperature. The final temperature was held for 15 min. The MS was operated in EI mode using 70 eV energy, and the mass range m/z 35–450 was scanned in 36 s. Compounds were identified by comparing the obtained mass spectra with the literature, as mentioned in section 5.4.2.1. Three injections of 1-2 mg were conducted per species.

5.4.3.2 Analysis of non-condensable gases and light hydrocarbons

Non-condensable gases and light hydrocarbons produced during wood-dowel welding for both species were analysed with a Clarus 480 GC coupled with TCD and FID (PerkinElmer, UK). A universal air sample pump (SKC 224-PCXR4, PA, USA) at a constant flow rate of 2.5 LPM (Anonymous 2010) was used to trap the VOCs released during the wood welding. The non-condensable gases (N_2 , H_2 , CO , CO_2 , CH_4 , and C_2H_4) were collected in 5 L sampling bags (FlexFoil®) flushed three times with nitrogen prior to sampling. The VOCs from 15 wood-dowel welding samples for each species were trapped and injected into the GC-TCD/FID using a 1 mL injection loop and 2 coupled columns (HayeSep N and Molecular Sieve 13X). Oven temperature was 60 °C and pressure was 150 KPa. Three injections were conducted per species.

5.5 Results and discussion

5.5.1 Thermochemical changes at the welded interface

Chemical analysis was performed to determine the thermochemical changes in sugar maple and yellow birch following wood welding.

5.5.1.1 Py-GC/MS

Chromatographic profiles of sugar maple Ref and WM samples obtained by Py-GC/MS are presented in Figures 5.2 and 5.3, respectively. A higher syringyl/guaiacyl ratio (S/G) for birch than for maple was determined for both *Ref* and *WM* (Tab. 5.1), as reported previously for manual wood welding with the same species (Sun et al. 2010). The difference of peak temperatures at the interface determined during welding of maple (244 °C) and birch (282 °C) (Belleville et al. 2012) could be related to the results of Sarni et al. (1990) who found that S/G in oak lignin increased with increasing thermal treatment temperature. Furthermore, G-S lignins with higher G unit content generally have more condensed structures due to the availability of the aromatic C5 position for coupling during lignin biosynthesis. The higher proportion of guaiacyl structures in the native lignin of sugar maple wood than in yellow birch wood could explain the higher susceptibility of sugar maple to condensation reaction during wood welding.

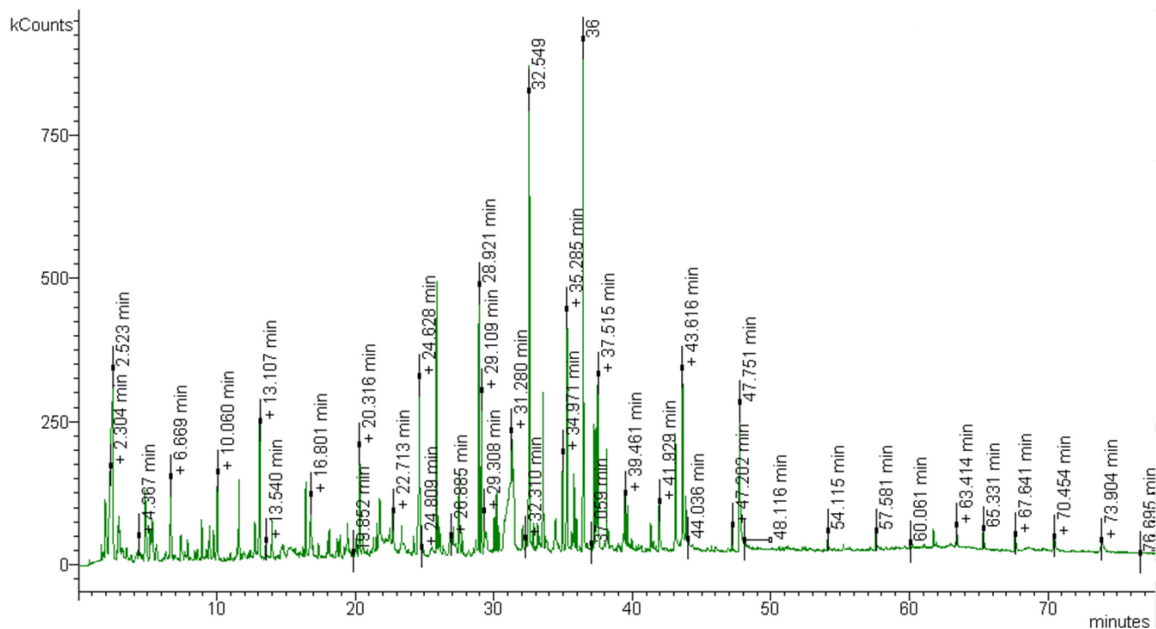


Figure 5.2 Py-GC/MS chromatogram of a representative sugar maple reference wood sample.

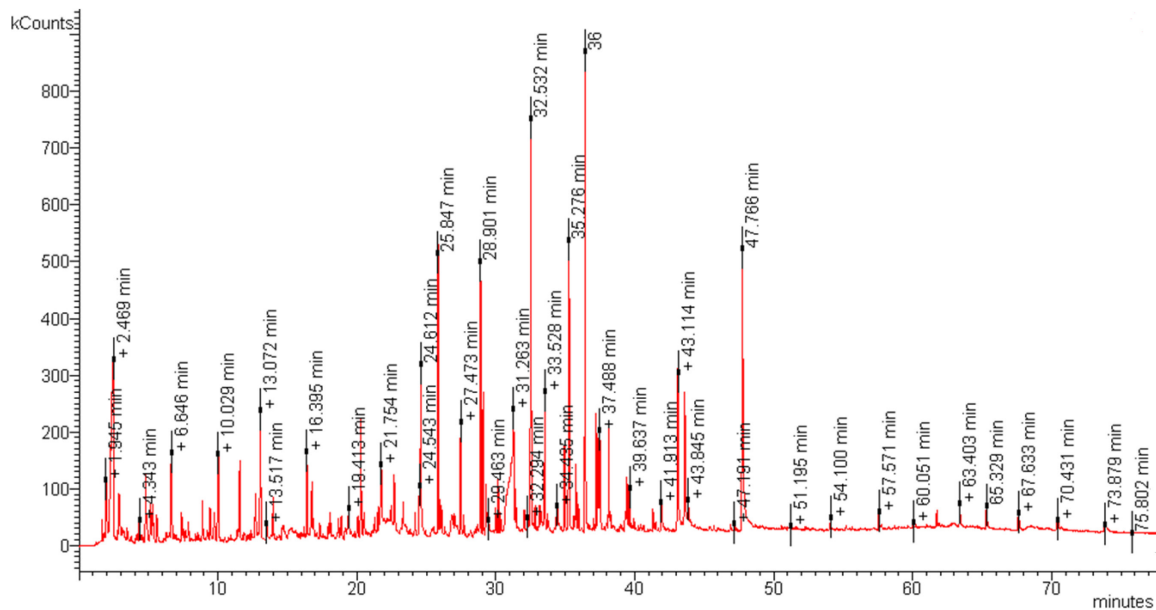


Figure 5.3 Py-GC/MS Chromatogram of a representative sugar maple welded material sample.

Table 5.1 Percentages of lignin and carbohydrate-related products released from reference wood (*Ref*) and welded material (*WM*) of sugar maple and yellow birch.

	Sugar maple		Yellow birch	
	<i>Ref</i>	<i>WM</i>	<i>Ref</i>	<i>WM</i>
<i>G</i> unit	15.1 (0.5)	15.4 (1.0)	10.6 (0.4)	10.2 (1.0)
<i>S</i> unit	51.9 (2.5)	51.6 (2.3)	47.7 (3.4)	50.5 (4.7)
<i>C</i>	33.0 (2.7)	33.1 (1.6)	41.7 (3.4)	39.4 (4.8)
<i>S/G</i>	3.4 (0.2)	3.4 (0.4)	4.5 (0.4)	5.0 (0.7)
<i>L/C</i>	2.0 (0.3)	2.0 (0.1)	1.4 (0.2)	1.6 (0.3)

Standard deviation in parentheses; *G* unit: guaiacyl lignin unit; *S* unit: syringyl lignin unit; *L*: lignin; *C*: carbohydrates.

The lignin-related pyrolysis products from maple and birch *Ref* and *WM* are presented in Table 5.2. More lignin-related pyrolysis products showed significant changes following welding for sugar maple (9) than for yellow birch (6). This observation corroborates the welded mechanical property differences between the two species. More changes at the welded interface suggest that sugar maple has a stronger bond line. Whereas lignin-derived products decreased for maple, the opposite trend was observed for birch.

A significant increase in G-aldehydes (from 3.0 to 3.7%) identified by Py-GC/MS following welding was observed for maple, essentially because the vanillin proportion increased significantly. No significant variation in G-ketones was observed, although a small but significant increase in guaiacyl acetone was noted. A significant increase in S-aldehydes (from 10.4 to 14.6%) following welding was observed due to a significant increase in syringaldehyde (from 6.8 to 9.9%). No significant difference in S-ketones was observed, although a small but significant increase in syringyl acetone (from 1.2 to 1.5%) was noted. A significant increase (from 0.3 to 0.4) in Oxy/Alk (lignin-derived compounds containing oxygenated functions (Oxy) in side chains and alkyl (Alk) side chains only) was observed due to a 40% increase in S-aldehyde and a significant decrease in 4-methyl-syringol (from 7.7 to 3.9%). S units depolymerised more rapidly than the more condensed G units, which could explain the increased Oxy/Alk for S derivatives versus G derivatives. The significant increase in guaiacol and syringol produced by analytical pyrolysis of *WM* versus *Ref* for maple (Table 5.2) could also be explained by lignin depolymerisation through ether bonds cleavage reactions which took place during welding releasing these

phenols. The fact that this increase is more important for maple than birch probably indicated the higher extent of changes in maple lignin taking place during welding of maple wood versus birch wood.

As noted above, fewer significant changes were observed for yellow birch. No significant variation in S-ketone was noted, although propiosyringone decreased significantly (from 2.1 to 1.4%). A significant increase (from 1.3 to 2.5%) in S-alcohols was observed, essentially related to a significant increase in trans-sinapyalcohol (from 0.7 to 1.8%). However, Oxy/Alk remained essentially unchanged between Ref and WM for yellow birch.

Two degradation mechanisms may be proposed during wood welding: (1) cleavage of the side chains in phenylpropane units in maple lignin resulting in an increase in the phenyl units with shortened side chains ($C_6-C_1+C_6-C_2/C_6-C_3$) for both guaiacol and syringol; (2) general oxidation (aldehyde and ketone formation) which was more pronounced in S units for maple. These mechanisms could be related to preferential side-chain oxidation at $C\alpha$ (vanillin and syringaldehyde formation) (Fig. 5.4a). A decrease in C_6-C_3 products determined by analytical pyrolysis of *WM* could be related to a cleavage at $C\beta-C\gamma$, resulting in formaldehyde loss and the formation of a resistant vinyl ether bond (4-vinyl ether-G and 4-vinyl ether-S, mechanism presented at Fig. 5.4d).

A significant increase in guaiacyl unit lignin ($G-C_6C_1+C_6C_2/C_6C_3$, Table 5.2) following welding for sugar maple supports the above-mentioned reports of formaldehyde formation from lignin units (Fig 5.4d). The increase in Oxy/Alk, G-aldehyde and S-aldehyde for sugar maple related to β -O-4 cleavage also supports a depolymerisation route for lignin such as proposed in Figure 5.4c (route 1). The newly acquired mobility of these components then allows cellulose fibrils to bond (Tanahashi et al. 1989).

Table 5.2 Lignin-related pyrolysis products (%) from sugar maple and yellow birch reference wood (*Ref*) and welded material (*WM*).

	Sugar maple		Yellow birch			Sugar maple		Yellow birch	
	<i>Ref</i>	<i>WM</i>	<i>Ref</i>	<i>WM</i>		<i>Ref</i>	<i>WM</i>	<i>Ref</i>	<i>WM</i>
<u>G-type derivatives</u>					<u>S-type derivatives</u>				
Guaiacol ^D	1.4* ^a	2.2*	0.7	0.6	Syringol ^I	8.1*	10.3*	4.5	4.8
4-Methylguaiacol ^D	2.7	2.5	1.0	0.9	4-Methylsyringol ^I	7.7*	3.9*	0.7	0.5
4-Ethylguaiacol ^D	0.5*	0.8*	0.4	0.3	4-Ethylsyringol ^I	0.9	1.1	0.6	0.7
4-Vinylguaiacol ^D	4.4	5.0	3.5	3.0	4-Vinylsyringol ^I	17.8	16.6	15.3	15.3
Eugenol ^D	0.9*	0.7*	0.9	0.7	4-Allylsyringol ^I	2.8	2.8	4.0	3.8
4-Propylguaiacol ^D	0.1	0.2	0.1*	0.3*	4-Propylsyringol ^I	0.2	0.2	0.2	0.1
Vanillin ^A	2.2*	2.8*	1.8	1.6	<i>Cis</i> -4-propenylsyringol ^I	2.1	2.1	2.5	2.5
<i>Cis</i> -isoeugenol ^D	0.6	0.5	0.6	0.5	Syringaldehyde ^E	6.8*	9.9*	9.6	10.1
<i>Trans</i> -isoeugenol ^D	4.0	3.7	3.9	3.6	4-Propenylsyringol ^I	1.7	1.8	3.0*	3.5*
Homovanillin ^A	0.8	0.9	1.2	0.9	4-Propenylsyringol isomer ^I	0.7	0.7	1.4	1.4
1-(4-hydroxy-3-methoxyphenyl) propyne ^D	0.8	0.7	1.0	1.00	<i>Trans</i> -4-propenylsyringol ^I	17.4	17.0	23.8	24.6
	1.2	1.2	1.4*	1.1*		2.6	2.7	3.1	2.8
Acetovanillone ^B	0.4*	0.5*	0.3	0.4		1.2*	1.5*	1.1*	1.6*
Guaiacyl acetone ^B	1.9	1.3	1.4	1.6	Acetosyringone ^F	0.6	0.8	0.4	0.5
<i>Trans</i> -coniferyl alcohol ^C					Syringylacetone ^F	1.2	1.1	2.1*	1.4*
					Syringic acid methyl ester ^H	0.4	0.4	0.6	0.7
					Propiosyringone ^F	3.6	4.7	5.1	7.0
					Dihydrosinapyl alcohol ^G	0.3	0.6	0.7*	1.8*
					<i>Trans</i> -sinapaldehyde ^E				
					<i>Trans</i> -sinapylalcohol ^G				
					S-aldehyde ^E	10.4*	14.6*	14.7	17.1
G-aldehyde^A	3.0*	3.7*	3.0	2.5	S-ketone ^F	5.0	5.3	6.3	5.7
G-ketone^B	1.6	1.7	1.7	1.5	S-alcohol ^G	0.7	1.1	1.3*	2.5*
G-alcohol^C	1.9	1.3	1.4	1.6	S-ester ^H	0.6	0.8	0.4	0.5
Oxy/Alk ^{(A+B+C)/D}	0.4	0.4	0.5	0.5	Oxy/Alk ^{(E+F+G+H)/I}	0.3*	0.4*	0.4	0.5
G-C₆C₁+C₆C₂/C₆C₃	1.6*	2.0*	1.4	1.2	S-C₆C₁+C₆C₂/C₆C₃	1.2	1.1	0.7	0.6
					G-S- C₆C₁+C₆C₂/C₆C₃	1.2	1.2	0.8	0.7

G unit: guaiacyl lignin unit; S unit: syringyl lignin unit; Oxy/Alk: ratio between lignin-derived compounds containing oxygenated functions (Oxy) in their side chains (aldehydes, ketones, alcohols, and esters) and compounds with alkyl side chains (Alk) only; ^a Mean of 3 samples; *significantly different (p <0.05).

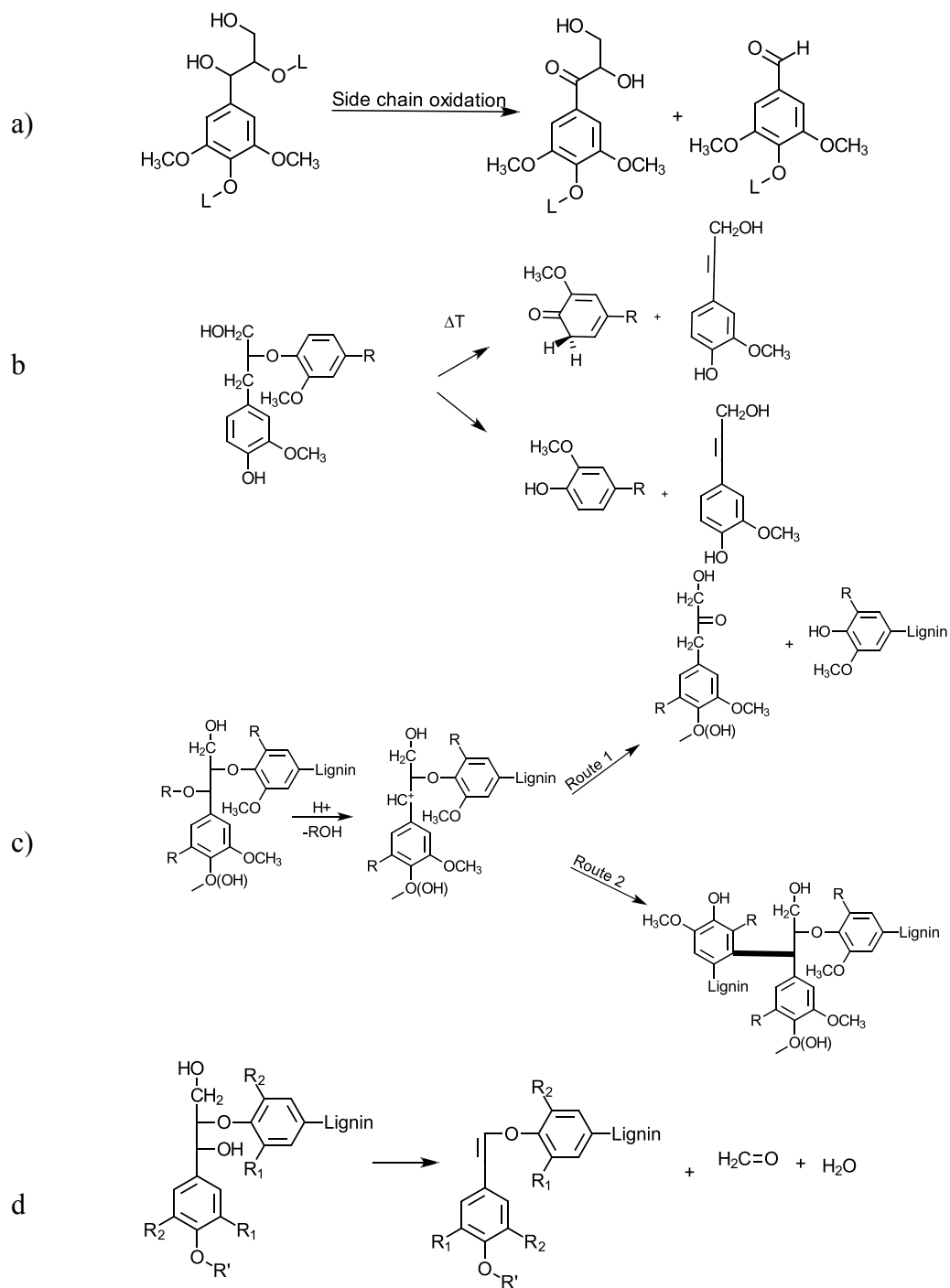


Figure 5.4 Chemical mechanisms related to wood welding: a) Changes in lignin after side chain oxidation (adapted from Geib et al. 2008); b) Free radical thermal degradation pathways of β -O-4-bonded lignin structures (adapted from van der Hage et al. (1993); c) Depolymerisation (route 1) and condensation (route 2) reactions of lignin (Li et al. 2007); d) Formation of formaldehyde from lignin units (adapted from Schäfer et Roffael (2000).

The increased proportion of amorphous carbohydrates following welding was observed previously by Gfeller et al. (2003). These authors suggested that the produced furfural self-polymerised or reacted with lignin aromatic nuclei, whereas hemicellulose deacetylation occurred with free acetic acid, possibly contributing to the formation of furanic compounds by catalysing the hydrolysis of hemicelluloses. In studies on thermally modified wood, Tjeerdsma et al. (1998) mentioned that the formation of acetic acid released from hemicelluloses further catalyses carbohydrate cleavage, reducing the degree of polymerisation of the carbohydrates. Acid catalysed degradation resulted in the formation of furfural and other aldehydes as well as some lignin cleavage at C α and O4, and was believed to cause some aldehyde production from C γ lignin units.

The increased proportion of amorphous carbohydrates following welding was observed previously by Gfeller et al. (2003). The produced furfural self-polymerised or reacted with lignin aromatic nuclei, whereas hemicellulose deacetylation yielded the free acetic acid, which catalysed the formation of furanic compounds from hemicelluloses. A significant increase in 5-hydroxy-2-furfuraldehyde was observed in the pyrolysis products from *WM* compared to *Ref* for maple, whereas furfural content increased but not significantly for both maple and birch (Table 5.3). A general increase in the furfural derived compounds was also observed in our previous study (Sun et al. 2010). The welded area yielded greater amounts of hemicellulose-derived products such as furfural and furfuryl alcohol. Much of the acetic acid released from wood during pyrolysis can be attributed to hemicellulose deacetylation (Tanahashi et al. 1989, Mohan et al. 2006). Consequently, partly degraded wood components become mobile, which loosens the inner stress in the crystalline region of cellulose. The only carbohydrate-related pyrolysis product that decreased significantly in *WM* compared to *Ref* for both species was 3-hydroxy-2-methyl-2-cyclopenten-1-one. Hemicelluloses depolymerisation results in the formation of oligosaccharides and monosaccharides, the dehydration of the latter yielding furfural and hydroxymethylfurfural from pentosans and hexosans respectively. Stamm (2006) investigated chemical reactions and degradation processes in Norway spruce (*Picea abies*) during friction welding and found an increase in phenolic OH groups in the welded area. This has been related to the splitting of lignin macromolecules and the formation of smaller constituents with free phenolic OH groups, which are potential sites for cross-linking reactions with

polysaccharide-derived furfural and hydroxymethyl furfural and other compounds. Furfural generated from hemicelluloses was also proposed as a possible contributor to self-bonding during hot pressing of binderless board (Mobarak et al. 1982, Suzuki et al. 1998). Most hemicelluloses do not yield significant amounts of levoglucosan during decomposition at 200–260 °C (Mohan et al. 2006). Cellulose degradation occurs at 240–350 °C to produce anhydrocellulose and levoglucosan, which means that the maximal welding temperatures determined in our study were insufficiently high to generate a significant amount of levoglucosan.

Table 5.3 Carbohydrate-related pyrolysis products (in %) from reference wood (*Ref*) and welded material (*WM*).

	Sugar maple		Yellow birch	
	<i>Ref</i>	<i>WM</i>	<i>Ref</i>	<i>WM</i>
Acetic acid	5.03 ^a	5.65	5.77	5.81
Furfural	6.28	7.88	6.78	8.98
Furfuryl alcohol	1.39	1.58	0.57*	1.11*
2-Cyclopent-1,4-dione	0.73	0.75	0.69	0.60
5H-Furan-2-one	1.92	1.94	0.72	0.79
2,3-Dihydro-5-methylfuran-2-one	5.27	5.41	2.10	2.54
Methyl-dihydro-2H-pyran-2-one	5.61	6.24	6.34	5.75
4-Hydroxy-5,6-dihydro-2H-pyran-2-one	20.52	19.37	35.35	39.31
3-Hydroxy-2-methyl-2-cyclopenten-1-one	3.60*	2.90*	3.69*	2.08*
2-Hydroxy-3-methyl-2-cyclopenten-1-one	3.10	3.47	0.98	0.95
3-Hydroxy-2-methyl-4H-pyran-4-one	1.44	1.62	1.15	0.86
5-Hydroxy-2-furfuraldehyde	2.35*	3.01*	1.96	1.81
Levoglucosan	44.22	40.50	34.53	30.13

*significantly different ($p < 0.05$); ^a Mean of 3 samples.

5.5.1.2 ATR-FTIR

Attenuated total reflection Fourier transform infrared spectroscopy (ATR-FTIR) was used to analyse wood component structures, more specifically, the chemical functional groups. The overall FTIR spectra of both *Ref* and *WM* samples revealed a number of changes after welding. Comparison of spectra showed significant structural changes between *Ref* and *WM* for both species (Fig. 5.5). The spectra show an increase in absorption in the functional region, particularly from 3700–3000 cm^{-1} (Fig. 5.6 and 5.7), which corresponds to the OH

group and suggests cleavage of the lignin ether bonds (route 1, Fig. 5.4c) and liberation of free phenolic hydroxyls. This is also confirmed by the increase in the band at 1740 cm^{-1} , assigned to the non-conjugated carbonyl group following breakage at β -O-4, as well as the higher peak at 1335 cm^{-1} originating from the phenolic hydroxyl groups, which suggests release of the phenolic hydroxyl groups from lignin splitting (Fig. 5.4b and 5.4c). The increase at 1110 cm^{-1} (OH associated with cellulose) can be explained by the relative increase in cellulose content in the welded area due to hemicelluloses degradation. This finding is confirmed by the increases at 1235 cm^{-1} and 900 cm^{-1} associated with the production of acidic substances in the welded area as the result of acetyl group splitting from hemicelluloses.

According to Delmotte et al. (2008), the 1424 cm^{-1} and 1466 cm^{-1} bands, attributed to CH_2 bending of crystalline and amorphous cellulose and to aliphatic CH bending of lignin (Colom et al. 2003, Hakkou et al. 2005), remain unaltered during welding. A peak shift for *WM* versus *Ref* from 1158 to 1160 cm^{-1} and 1160 to 1162 cm^{-1} was observed for sugar maple and yellow birch, respectively. This suggests that the material in the welded area had greater crystalline cellulose content following the degradation of amorphous polysaccharides from cellulose and hemicelluloses due to rotational friction during welding. Delmotte et al. (2008) reported an apparent increase in cellulose crystallinity and hemicelluloses degradation following linear welding of European beech.

However, the changes that occurred during welding were more pronounced for maple than for birch. For example, a more pronounced peak was observed at 1650 cm^{-1} , associated with a conjugated double bond for maple compared to birch. It appears that the more pronounced chemical changes during welding resulted in a stronger, more resistant welded bond line. The increases in absorptions at 1595 , 1510 , 1650 , and 1425 cm^{-1} observed in spectra for *WM* can be attributed to the increase in relative lignin content in the welded samples, which was more pronounced for maple. The absorptions at these wave numbers were attributed to lignins in other published results (Yang et al. 2007, Delmotte et al. 2008). Comparing *Ref* and *WM* spectra from Figure 5.5, the absorption at 1370 cm^{-1} increased for maple but not for birch. This absorption can be associated with lignin carbohydrate

complexes (LCC), as discussed in previous studies (Kotilainen et al. 2000) and is in agreement with our previous results (Sun et al. 2010).

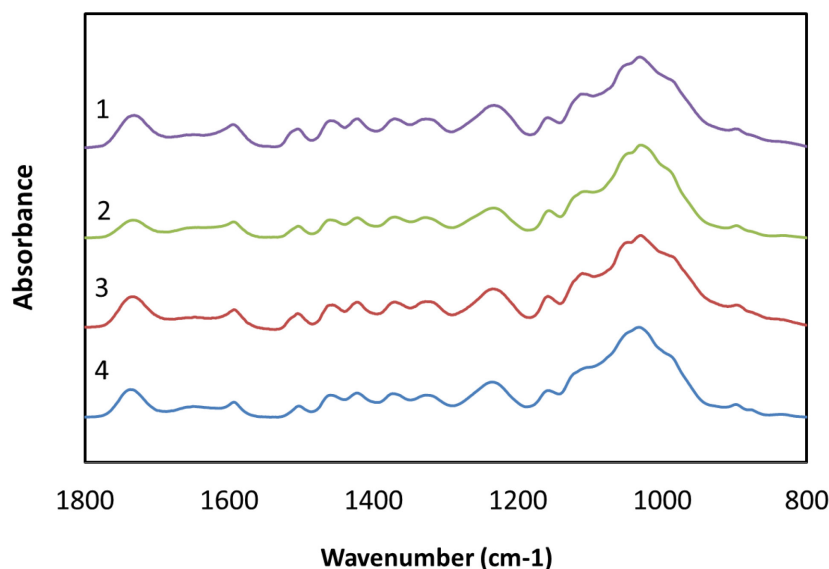


Figure 5.5 ATR-FTIR spectra for sugar maple and yellow birch before (*Ref*) and after (*WM*) wood welding: 1) Sugar maple *WM*; 2) Sugar maple *Ref*; 3) Yellow birch *WM*; 4) Yellow birch *Ref*.

The FTIR spectra results suggest that the more pronounced changes especially related to lignin observed for maple can explain the better mechanical performance of the welded joint for maple over yellow birch (Rodriguez et al. 2010, Belleville et al. 2012). Peaks between 1159 and 1742 cm^{-1} were also observed in our spectra. The increasing peak at 1335 cm^{-1} could be attributed to phenolic hydroxyl groups, due to ether bond splitting mechanisms proposed in Fig. 2a and 2c. We also observed a peak at 1450 cm^{-1} , which supports that lignin was altered as a result of condensation and/or formation of CH_2 bridges between lignin fragments (Lig- CH_2 -Lig). A lower absorption peak at 1649 cm^{-1} was attributed to conjugated double bonds following lignin depolymerisation. Several structures issued from lignin splitting mechanisms proposed at Figure 5.4 contain conjugated double bonds (5.4a, 5.4b, 5.4c).

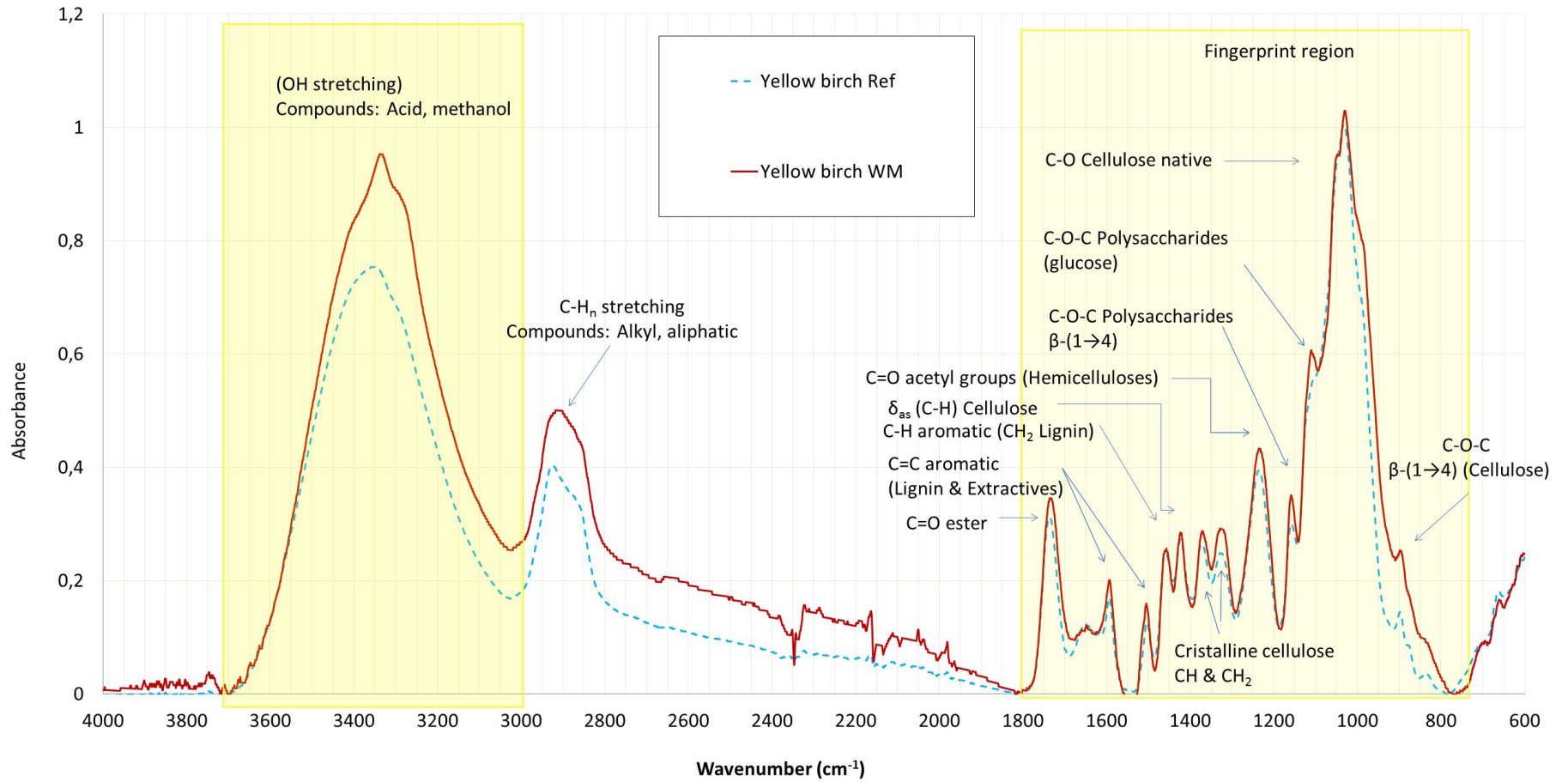


Figure 5.6 ATR-FTIR transmission spectra for yellow birch before (Ref) and after (WM) wood welding.

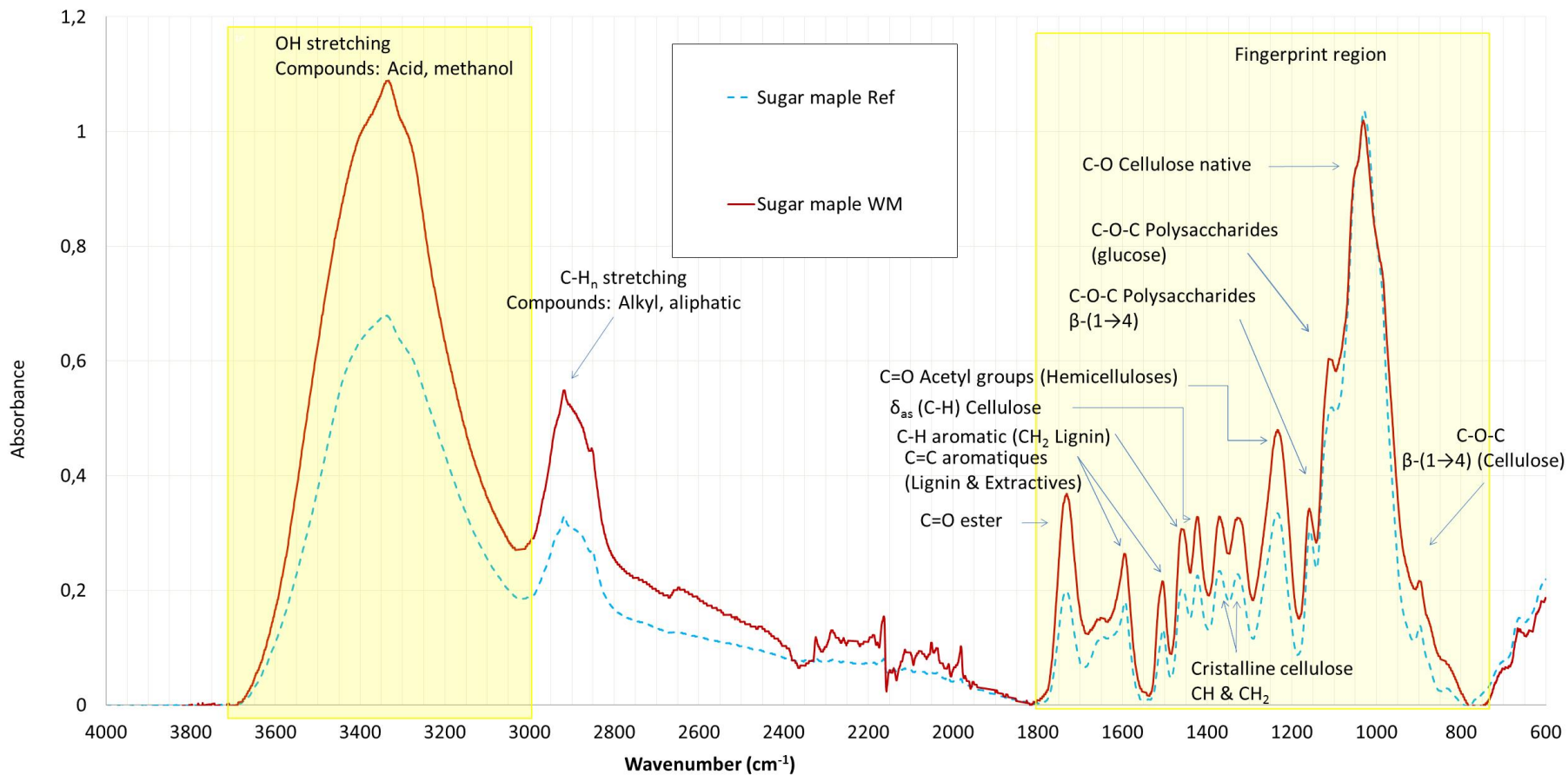


Figure 5.7 ATR-FTIR transmission spectra for sugar maple before (*Ref*) and after (*WM*) wood welding.

5.5.1.3 XPS

The X-ray photoelectron spectroscopy (XPS) results revealed surface changes in yellow birch and sugar maple in the wood dowel welding area. XPS C1s spectra for sugar maple *Ref* and *WM* materials are shown in Figure 5.8. Several XPS survey spectra presented a particularity associated with an O1s peak meaning that the analysed volume was not homogenous in depth and that oxygen was depleted at the surface. The more pronounced the concavity at the surface, the greater the oxygen depletion (Tougaard 1989, Sreemany and Ghosh 1994). Elemental analysis was performed using survey scans, and results on O/C are presented in Table 5.4.

A decrease in O/C for birch and an increase for maple was determined for *Ref*. The O/C increase following welding for sugar maple indicates that chemical substances with oxygenated functionality were formed. This may have been caused by 1) the increase in free phenolic groups, and 2) the decrease in the typical (ether) bonds between the phenylpropane units in lignin, which is consistent with our Py-GC/MS results. On the other hand, the decrease in O/C in *WM* for birch indicated a loss of oxygenated compounds. This could have been caused by the production of carbon-enriched material resulting either from the dehydration of initially present wood polymers or the formation of new components, as reported by Inari et al. (2006). In wood-to-wood welding, the adhesion mechanism requires high applied pressure to keep the pieces together. This reduces the available oxygen at the interface, and appears to have resulted in fast pyrolysis rather than slow or conventional pyrolysis. After slow pyrolysis, O/C would tend to decrease due to more significant cross-bonding via methylenic bridges, resulting in carbon-enriched material. During fast pyrolysis, the pyrolysis liquids, which are rich in oxygenated compounds, are formed by rapidly and simultaneously depolymerising and fragmenting cellulose, hemicelluloses, and lignin during the rapid increase in temperature (Mohan et al. 2006). This also favours the miscibility of these polymers, as discussed above. When the welding process is stopped, rapid quenching “freezes” the intermediate products of the fast pyrolysis degradation of hemicelluloses, cellulose, and lignin.

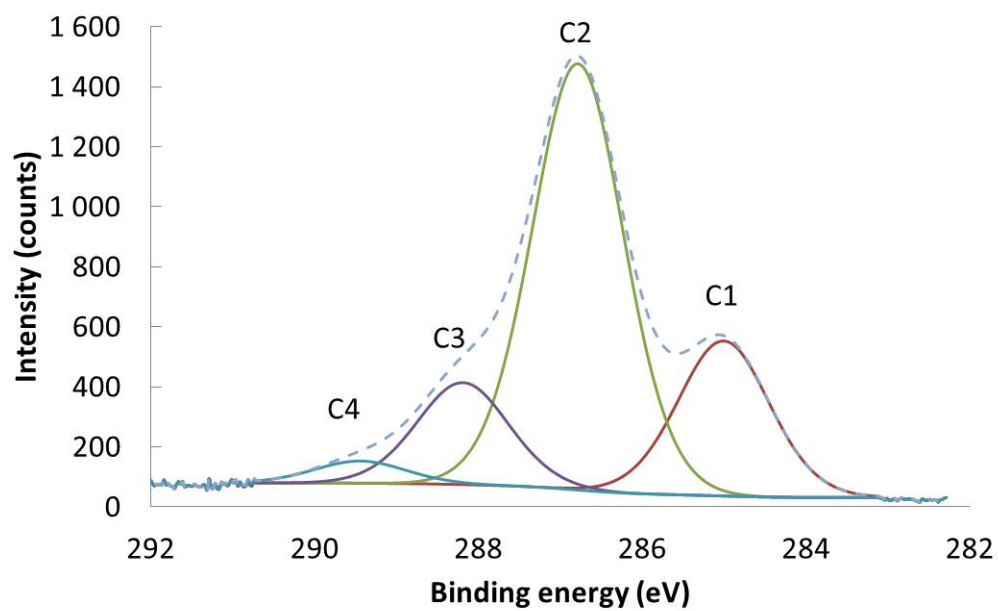
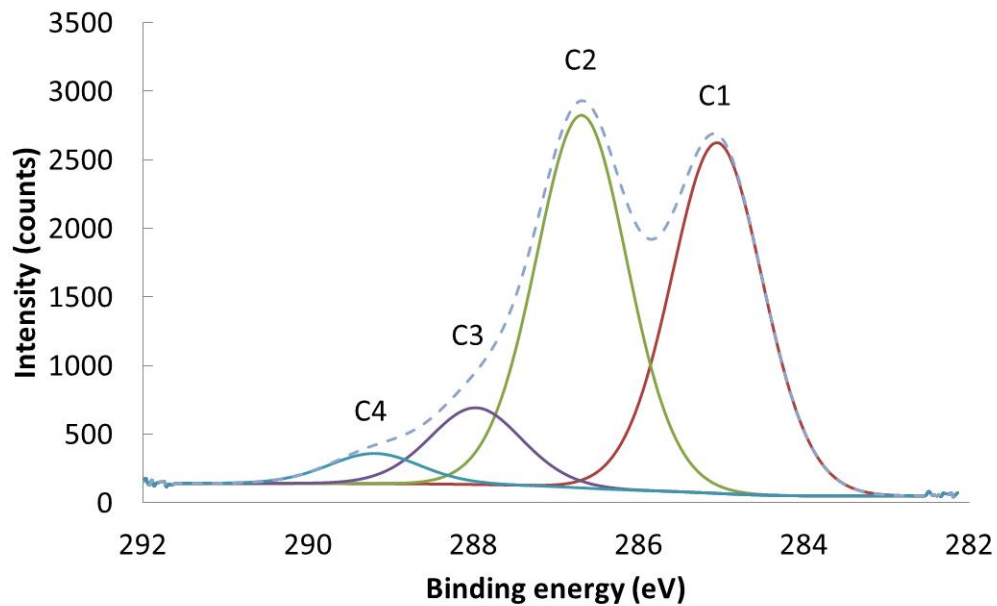


Figure 5.8 XPS C1s of representative reference wood (top) and welded material sample (bottom) spectra for sugar maple.

Table 5.4 Sample surface analysis of reference wood (*Ref*) and welded material (*WM*) for sugar maple and yellow birch obtained by XPS: a) Atomic percentages and oxygen/carbon ratios (O/C); b) Distribution (Area %) of carbon components (C1s).

a)	Yellow birch		Sugar maple	
	<i>Ref</i>	<i>WM</i>	<i>Ref</i>	<i>WM</i>
O 1s	18.1 ^a (3.0) ^b	19.5 (1.5)	28.7 (0.8)	34.8 (1.4)
C 1s	80.3 (3.6)	82.0 (3.9)	70.0 (1.1)	64.5 (1.3)
Others	1.6 (0.5)	0.7 (0.0)	1.3 (0.3)	0.7 (0.1)
O/C	0.23 (0.05)	0.24 (0.02)	0.41 (0.02)	0.54 (0.03)
b)				
C1	69.9 (8.3)	67.3 (4.8)	45.2 (2.8)	22.1 (0.3)
C2	21.5 (7.7)	26.9 (2.7)	43.0 (2.8)	62.8 (2.0)
C3	4.5 (0.9)	4.5 (0.4)	8.4 (0.8)	12.1 (2.1)
C4	4.1 (0.3)	3.7 (0.2)	3.4 (0.9)	3.0 (0.1)

^a Mean of 3 samples; ^b Standard deviation.

The quantitative analysis for *Ref* and *WM* using the results of peak deconvolution of the C1s component is presented in Table 5.4. Based on deconvolution, the types of carbon bonds present in *Ref* and *WM* were determined and surface changes identified. Carbon bands were deconvoluted into four components according to the number of C-bonded oxygen atoms: C1 class, or carbon atoms bonded with carbon or hydrogen atoms only, usually indicating a binding energy (BE) of 284.6 eV (C–C/C–H bonds); C2 class, or carbon atoms bonded with one oxygen atom, and appearing at a higher BE compared to C1 (C–O bonds; 286.5 eV); C3 class, or carbon atoms bonded to a carbonyl or two non-carbonyl oxygen atoms (C=O and O–C–O; 287.9 eV); and C4 class, or carbon atoms bonded to a carbonyl and a non-carbonyl oxygen atom (O–C=O bonds; 289.2 eV).

The C1 contribution decreased in *WM* for both sugar maple and yellow birch as compared to *Ref*. This could be mainly attributed to the general reactions of fragmentation of side chains (release of formaldehyde) and/or their oxidation in the welded interface (products presented in Fig. 5.4). The C2 contribution on the other hand increased in *WM* versus *Ref* for both yellow birch and sugar maple and more importantly so in sugar maple (Table 5.4). This change could be explained by the modification of wood components: 1) the degradation of amorphous polysaccharides which consist of their hydrolysis releasing hydroxyl groups and the increase in lignin with liberated phenolic hydroxyl groups following the splitting of ether bonds as previously reported (Sun et al. 2010); and 2) the

loss of formaldehyde from the lignin and the formation of a new vinyl ether structure as proposed in Fig. 5.4d, also reported by Sun et al. (2010). The increase in C3 in *WM* versus *Ref* is pronounced for maple, probably reflecting the formation of carbonyl structures proposed by mechanisms presented in Fig. 5.4, while such increase is not recorded at all for birch, which could be taken as an evidence of lesser changes in birch lignin during welding as compared to maple which is related to better mechanical performance of welded maple compared to birch. The reactions discussed during welding are proposed to be catalysed by the acetic acid release during welding (splitting of acetyl groups from xylan). This could be confirmed by a small decrease in the C4 contribution from *WM* versus *Ref* for both maple and birch (Table 5.4). The production of organic acid compounds was also confirmed by the ATR-FTIR spectra, which showed a peak at 892 and 1230/40 cm^{-1} attributed to organic acids (Colom et al. 2003, AIST 2011), and the Py-GC/MS results, which showed an increasing trend for acetic acid release following welding. The release of acetic acid will be definitely confirmed by our results on VOCs determination. Due to its high crystallinity, cellulose begins to depolymerise only at 225 °C (Fengel and Wegener 2003). High protonation of the reaction site and the presence of acids such as acetic acid produced by the high-temperature hydrolysis of the acetyl groups from xylan could potentially explain this reaction. The increase in the C2 component for sugar maple could be associated with the formation of furanic compounds from xylan as well as the release of phenolic/carbonyl compounds from lignin depolymerisation (Fig. 5.4c).

The increase in C3 for sugar maple suggests that oxidised products were formed during welding. Several carbonyl containing structures are proposed by the mechanisms presented at Fig. 5.4a and 5.4c. Oxidation products such as quinones are also formed when wood is heat treated, which is associated with the colour change during heat treatment. In the first step of pyrolysis, hydroxyl functions are thermo-oxidized into corresponding aldehydes, which could explain the increase in C3 components (Fig. 5.8). With respect to the C4 component ($\text{O}-\text{C}=\text{O}$), this study showed that the welded materials contained less carboxyl and/or acetyl groups than the reference material, which points to a thermodegradation of hemicelluloses resulting in the loss of acetyl groups.

5.5.2 Gases analysis

5.5.2.1 VOCs analysis

The VOCs released from controlled pyrolysis processes performed following temperature profiles determined for wood-dowel welding of maple and birch woods were determined by Py-GC/MS and results are presented in Tables 5.5 and 5.6. The main compounds released from sugar maple wood at maximum welding temperature (244 °C) were 4-vinylguaiacol, *trans*-isoeugenol, and 4-propenylsyringol. For yellow birch (282 °C), the most notable compounds identified were 2H-pyran-2 methanol,3,4,dihydro-2,5-dimethyl, *trans*-isoeugenol, and *trans*-4-propenylsyringol.

Table 5.5 Volatile organic compounds of yellow birch identified by Py-GC/MS.

Retention time (min)	Compound	Origin
3.38 ^a	Acetic acid	H
7.15	Furfural	H
11.86	3-Methyl-tetrahydrofuran-2,4-dione	H
12.82	Furan,2 pentyl	H
13.60	2H-Pyran-2 methanol,3,4,dihydro-2,5-dimethyl	H
15.10	2(3H)-furanone	H
17.01	Guaiacol	L
20.28	4-Methylguaiacol	L
23.30	4-Ethylguaiacol	L
24.70	4-Vinylguaiacol	L
25.77	Syringol	L
26.21	Eugenol	L
27.58	Vanillin	L
28.96	4-Methylsyringol	L
29.17	<i>Trans</i> -isoeugenol	L
30.05	1-(4 hydroxy-3-methoxy phenyl) allene	L
30.28	Acetovanillone	L
31.39	4-Ethylsyringol	L
32.60	4-Vinylsyringol	L
35.02	4-Propenylsyringol	L
35.29	Syringaldehyde	L
35.85	4-Propynilsyringol	L
36.50	<i>Trans</i> -4-propenylsyringol	L
38.15	Syringilacetone	L

^a Mean of 3 injections; H: hemicellulose; L: lignin.

Table 5.6 Volatile organic compounds of sugar maple identified by Py-GC/MS.

Retention time (min)	Compound	Origin
3.62	Acetic acid	H
7.30	Furfural	H
10.50	2-furan methanol	H
11.88	Furfural, 5-methyl	H
13.77	4-Hydroxy-5,6-dihydro-2H-pyran-2-one	H
16.70	Guaiacol	L
20.36	3-Methylguaiacol	L
21.07	Propyl furan	L
24.82	4-Vinylguaiacol	L
25.98	Syringol	L
26.18	Eugenol	L
27.66	Vanillin	L
27.77	<i>Cis</i> -isoeugenol	L
29.31	<i>Trans</i> -isoeugenol	L
30.15	1-(4-Hydroxy-3-methoxy phenyl) allene	L
30.32	Acetovanillone	L
32.60	4-Vinylsyringol	L
35.37	Syringaldehyde	L
35.87	4-Propynilsyringol	L
36.59	<i>Trans</i> -4-propenyl syringol	L

^aMean of 3 injections; H: hemicellulose; L: lignin.

A chromatographic profile of VOCs corresponding to the Py-GC/MS analysis of yellow birch (with pyrolysis temperature set at the maximum temperature determined at the welding site) is presented in Figure 5.9. The compounds identified among the products of sugar maple pyrolysis with lowest retention times (0-15 min) are essentially polysaccharide related degradation products followed by the products associated with thermal degradation of lignin. The lignin-related products released as VOCs during the pyrolysis simulating wood welding of sugar maple (at maximal welding temperature of 244 °C) were 4-vinylguaiacol and isoeugenol (retention times 24.82, 29.31, 36.59 min). The most abundant VOCs released from wood-welding of yellow birch at 282 °C were also associated with lignin degradation products (29.17, 36.50 min). Isoeugenol and 4-propenylsyringol were identified to be the most abundant VOCs released during welding for both species, which is consistent with data reported previously for European beech (Omrani et al. 2008).

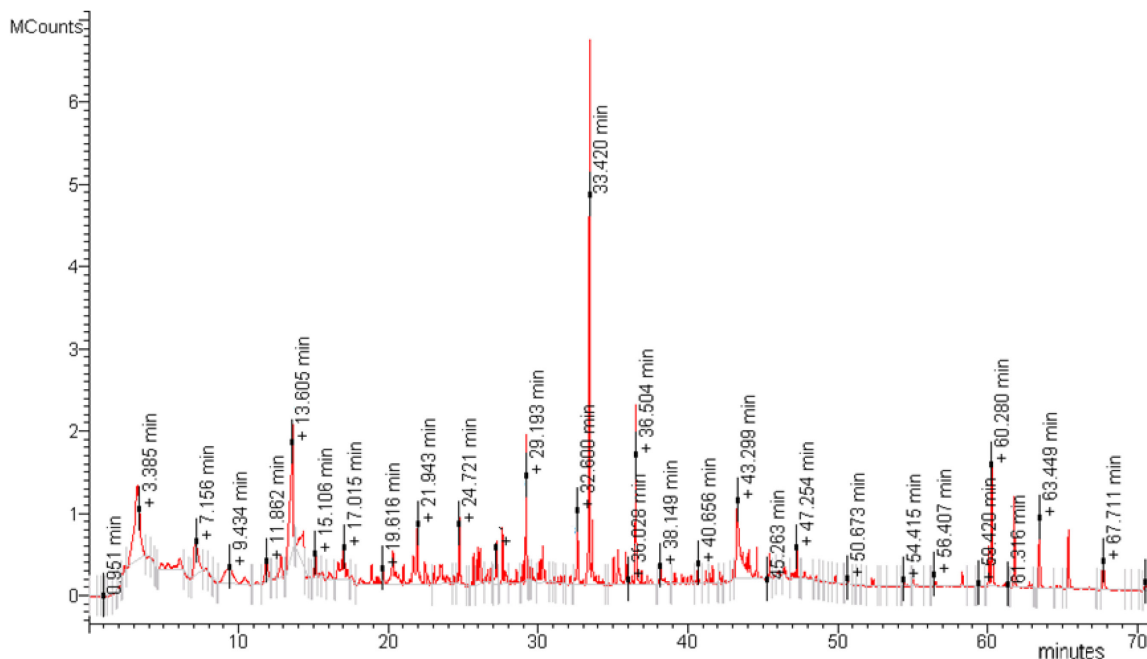


Figure 5.9 Py-GC/MS chromatogram of yellow birch VOCs.

The presence of acetic acid confirmed the degradation of hardwood xylan containing acetyl groups. Furfural production through pentosan transformation under acidic conditions was determined in our experiments (Tab. 5.5 and 5.6), thus confirming the discussed reactions at the weldline. The presence of furanic compounds for yellow birch (Retention times of 7.30, 10.50, 11.88 min, Tab. 5.5) and sugar maple (Retention times of 7.15, 11.86, 15.10 min, Tab. 5.6) was also detected in a previous study on European beech (*Fagus sylvatica*) wood welding (Omrani et al. 2008). For both species, most of the VOCs identified during pyrolysis are non-toxic products derived from degradation of wood polymers.

5.5.2.2 Non-condensable gases and light hydrocarbons

The non-condensable gases (NCG) and the light hydrocarbons emitted during wood-dowel welding of both studied species were also analysed using GC/TCD-FID following their collection in sampling bags during welding as described in material and methods section. The obtained results are presented in Table 5.7. The NCG proportions are quite similar for the two species, with only minor differences. GC-TCD analyses showed that nitrogen accounted for 77.6 and 80.7% of the NCG for sugar maple and yellow birch, respectively.

Oxygen was the second most abundant gas, with 20.7 and 18.4% for maple and birch, respectively. These proportions approach those found in pure air (21% oxygen and 78% nitrogen by volume, plus traces of other substance and gases, both natural and anthropogen) (Santé Canada 2012). Traces of hydrogen (0.5%) and carbon dioxide (0.1%) were also found among non-condensable gases analysed for both species. Carbon dioxide (CO₂) is naturally present in the atmosphere at approximately 0.035%. Short-term exposure to CO₂ at below 2% concentration (20,000 parts per million or ppm) has not been reported to cause harmful effects (CCHST 2012). According to Health Canada (1989), the lowest CO₂ concentration at which adverse health effects were observed in humans was 7000 ppm, at which increased blood acidity was observed after several weeks of continuous exposure. No carbon monoxide was produced during welding. These results are in accord with those of Omrani et al. (2009b), who analysed the emission gases emitted as smoke in linear vibration welding of European beech (*Fagus sylvatica*).

Among the light hydrocarbons identified by GC-FID analyses, methane was the most abundant, averaging 26.2 and 30.5 ppm for maple and birch, respectively. It is known that methane is not toxic below the lower exposure limit of 5%, or 50000 ppm (CCHST 2012). Traces of ethane, ethylene, and acetylene were also measured. Higher welding temperature and differences in sampling and analytical methods (ground powder in a sealed furnace at 200 °C) may account for some of the variations between our results and those reported by Omrani et al. (2009b). The overall results presented here appear to confirm that wood-dowel welding is an ecological technology which is not hazardous for furniture industry workers or consumers.

Table 5.7 Volume of non-condensable gases produced during wood-dowel welding determined by GC-TCD and GC-FID.

GC-TCD (%)	N ₂	O ₂	H ₂	CO ₂	CO
Sugar maple	77.6 ^a (0.1) ^b	20.7 (0.1)	0.5 (0.0)	0.1 (0.0)	0.0 (0.0)
Yellow birch	80.7 (0.1)	18.42 (0.1)	0.5 (0.0)	0.1 (0.0)	0.0 (0.0)
GC-FID (ppm)	CH ₄	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₂	
Sugar maple	26.21 ^a (0.14)	1.07 (0.01)	0.53 (0.07)	0.00 (0.00)	
Yellow birch	30.51 (0.11)	3.45 (0.00)	0.95 (0.06)	0.00 (0.00)	

^a Mean of 3 injections; ^b Standard deviation.

5.6 Conclusions

This study investigated chemical changes occurring at the welding interface during wood-dowel welding of sugar maple and yellow birch, two Canadian hardwood species commonly used for indoor appearance applications. The gases released during welding were also determined.

The adhesion mechanisms in wood-to-wood welding appear to be associated with the mechanisms involved in fast pyrolysis: high pressures are applied, reducing the available oxygen at the interface. Rapid quenching, as is the case when the wood welding process is stopped, may “freeze” the intermediate degradation products of fast pyrolysis. During welding, the wood cells adjacent to the connected surfaces collapse due to frictional forces and the generated heat results in decomposition and recombination of the different wood components. Although cellulose is more abundant in wood, hemicelluloses are more easily thermally degraded. On the other hand, lignin pyrolysis results in more abundant and more easily identifiable products than polysaccharide pyrolysis. The results of this investigation showed that thermal treatment of birch and maple wood degrades hemicelluloses through acid hydrolysis and dehydration mechanism and affects lignin polymer through depolymerisation reactions. Although lignin appears to be a major contributor in wood welding, the welded site also showed increased amounts of polysaccharide-derived products.

Two degradation mechanisms can be proposed in wood welding for maple: 1) cleavage of the phenylpropane side chain, resulting in an increase of the guaiacol and syringol based products; and 2) a more pronounced general oxidation in S units. The formation of formaldehyde from lignin side chains appears to be more adapted to the welding process for yellow birch, whereas sugar maple appears to be more prone to a depolymerisation route. The higher percentage of guaiacyl structures in native lignin of maple wood compared to birch wood could explain its higher susceptibility to condensation reactions during wood welding. The fact that maple lignin contains higher proportion of G-units (in native state) and these increase upon welding could explain in part the better performance of maple due to guaiacyl structures condensation reactions with formaldehyde which is released through the thermal decomposition reaction of lignin. The depolymerisation route of lignin in maple is also supported by the increase in Oxy/Alk, G-aldehyde and S-aldehyde pyrolysis products from the welded zone compared to reference wood.

The degradation of amorphous polysaccharides (including amorphous part of cellulose) due to rotational friction during welding explains why the material at the welding site contained more crystalline cellulose. Cleavage of the lignin ether bonds and the release of free phenolic hydroxyls were confirmed by FTIR.

The Py-GC/MS and XPS results associated with the O/C increase following welding for maple indicate that chemical substances containing oxygenated functionality were formed, which could be associated with either an increase in free phenolic groups and/or a decrease in typical (ether) bonds between phenylpropane units in lignin following welding. On the other hand, the decrease in O/C at the welded site for birch wood indicates a loss of oxygenated compounds. The production of carbon-enriched material, resulting from either the dehydration of initially present wood polymers or the formation of new components, could explain these changes.

The gas emission results show similar proportions of non-condensable gases for the two studied species. Most of the volatile compounds identified during pyrolysis were non-toxic products derived from degradation of wood polymers. The composition of these NCG was close to that found in pure air. No carbon monoxide was produced during welding, and only traces of hydrogen and carbon dioxide were present. The knowledge gained on VOCs

provides valuable information for air safety inspections. The proportion of detected VOCs was relatively low and below the lower exposure limits. Hence, wood welding appears to be an ecological technique for assembling furniture components and other applications, and is not harmful for human health.

We have clearly demonstrated the impact of wood species on chemical changes occurring at the welding interface during wood-dowel welding. This technique can therefore be used for eco-conception of wood-welded panels for furniture and other indoor appearance applications.

Conclusion générale

Les objectifs de ce projet de recherche étaient: de définir les paramètres de soudage par goujons pour deux essences canadiennes (érable à sucre et bouleau jaune) sur le prototype conçu par le CRIQ; de déterminer la performance et la qualité des assemblages lors de leur mise en service et lorsque soumis à des variations de température et d'humidité; d'étudier la zone de fusion afin de comprendre les phénomènes physico-chimiques en cause et les mettre en relation avec les résultats sur la mécanique des assemblages; d'optimiser les paramètres de soudage du bois par goujons en fonction des observations réalisées dans les objectifs précédents.

La détermination des paramètres de soudage optimaux pour chacune des essences étudiées a été effectuée avec des essais en traction linéaire. Les résultats ont permis de démontrer que les propriétés mécaniques de la zone de soudage sont influencées par une interaction entre l'essence utilisée, la vitesse rotationnelle et la vitesse d'insertion du goujon. Cette combinaison complexe de facteurs s'explique en raison de l'équilibre important entre la température maximale à l'interface, le temps de soudage à haute température, la carbonisation du matériel ligneux et la quantité de matériel expulsé hors de la zone de soudage. À cet effet, une vitesse d'insertion trop lente ou encore une vitesse rotationnelle trop élevée ont entraîné le noircissement de l'interface de soudage, résultat de la carbonisation du matériel ligneux. L'essence demeure cependant le facteur le plus influent parmi ceux à l'étude. Les résultats confirment une meilleure aptitude pour le soudage de l'érable à sucre que le bouleau jaune. Ceci peut être attribué aux différences chimiques et anatomiques entre nos deux essences. L'érable à sucre contient notamment un peu plus de lignine que le bouleau jaune et affiche une masse volumique plus élevée que le bouleau jaune. Ce dernier aspect explique en partie la plus grande dureté ou *résistance à la pénétration* de l'érable à sucre. Pour l'érable à sucre et le bouleau jaune, les paramètres optimaux déterminés avec le banc d'essai automatisé étaient respectivement de 1000 tours min^{-1} à 25 mm s^{-1} (7,9 MPa) et 1000 tours min^{-1} à 16,7 mm s^{-1} (4,6 MPa). Ces paramètres ont d'ailleurs entraînés un changement de couleur ou un noircissement beaucoup moins prononcé de l'interface de soudage. Des mesures de température à l'interface ont également été effectuées. L'essence de même que la vitesse de rotation du goujon sont les deux

aspects influents sur la température à l'interface. La température maximale mesurée à l'interface lors du soudage pour l'érable à sucre et le bouleau jaune était respectivement de 244 °C et 282 °C. Ainsi, pour un bois affichant une masse volumique moins élevée et plus tendre tel que chez le bouleau jaune, il est possible que moins d'énergie soit nécessaire pour effectuer l'insertion du goujon. L'énergie pourrait alors être convertie en chaleur plus facilement ce qui expliquerait une température à l'interface plus élevée pour le bouleau jaune comparativement à l'érable à sucre.

Les premiers panneaux lamellés-soudés conçus à partir d'essences canadiennes ont été assemblés à l'aide de la machine du CRIQ, partenaire industriel sur le présent projet. Il a ainsi été possible de démontrer le potentiel du soudage pour la conception de panneaux lamellés. L'utilisation d'une machine conçue pour le soudage du bois par friction rotationnelle s'est avérée concluante et un procédé industriel pour ce procédé serait envisageable. Des essais de flexion statique en 3 points ont été effectués sur les panneaux afin d'étudier leur comportement suite à une sollicitation mécanique. Un séjour dans un caisson climatiseur a également été réalisé pour évaluer leur stabilité dimensionnelle dans des conditions atmosphériques variables. À la lumière de l'analyse statistique en flexion des panneaux, aucun effet significatif de l'essence n'a été constaté. Le bouleau jaune et l'érable à sucre, avec une charge maximale à la rupture respective de 1,8 kN et 1,7 kN, se sont tous deux avérés en mesure de servir pour la conception de panneaux lamellés-soudés. Aucun glissement des goujons n'a été observé lors de ces essais de flexion statique. La rupture des panneaux s'effectuait par éclatement des goujons généralement dans le plan de soudage central de ceux-ci. Ainsi, le joint soudé ne constituait pas le maillon faible de nos assemblages. En se basant sur les résultats d'essai en flexion, les propriétés des panneaux seraient régies par:

- Les propriétés mécaniques de l'essence utilisée pour les goujons.
- Le nombre de goujons et leur positionnement dans le panneau.
- La rigidité et les propriétés en flexion des goujons utilisés.

Le design des panneaux lamellés-soudés et la configuration des goujons à l'intérieur de ceux-ci doivent cependant être optimisés. Une étude exhaustive afin d'évaluer l'effet du positionnement des goujons, de leur diamètre et de leur nombre sur les propriétés en flexion de panneaux lamellés-soudés serait une façon d'optimiser les propriétés mécaniques des panneaux. L'effet de la distance entre les appuis, de l'épaisseur du panneau et des matériaux utilisés pourraient également faire l'objet d'une étude de sensibilité. Enfin, une modélisation numérique par éléments finis pourrait permettre de développer et d'optimiser le procédé d'assemblage. Des résultats équivalents ou supérieurs à ceux de panneaux lamellés-collés pourraient être obtenus en utilisant des goujons de plus gros diamètre ou encore plus de goujons dans les assemblages.

En ce qui concerne les essais en cycle de conditionnement, aucune déformation des panneaux n'a été observée. Du délaminage, tant pour les assemblages lamellés-soudés que lamellés-collés, a été constaté lors du passage à des conditions sèches (humidité relative de 20%). Des ajustements sur le procédé d'assemblage ou l'application d'un traitement à la surface du panneau s'avèrent nécessaires afin de minimiser le délaminage durant le cycle de vie du panneau.

Des essais afin de caractériser les changements ayant lieu à l'interface de soudage ont également été menés. À cet effet, il semble que les mécanismes d'adhésion soient associés aux mécanismes impliqués lors d'une pyrolyse rapide: une pression importante entre les deux surfaces à souder serait à l'origine d'une réduction de l'oxygène disponible à l'interface. Les résultats démontrent un plus grand nombre de produits affichant des modifications significatives chez l'érable à sucre que chez le bouleau jaune. Ceci corrobore les résultats obtenus lors d'essais mécaniques en traction. Les résultats de cette étude ont démontrés que le traitement thermique résultant du soudage:

- Dégrade les hémicelluloses par une hydrolyse en milieu acide.
- Entraîne un mécanisme de déshydratation qui affecte les polymères de la lignine à travers des réactions de dépolymérisation.

Bien que la lignine contribue de façon significative au mécanisme d'adhésion par soudage, une augmentation importante des produits dérivés de polysaccharide a été constatée à l'interface de soudage.

Deux mécanismes de dégradation apparaissant lors du soudage du bois d'érable à sucre peuvent être proposés :

- Un clivage des chaînes latérales des phénylpropanes de la lignine;
- Un phénomène d'oxydation générale.

Ces deux phénomènes correspondent aux réactions d'oxydation des chaînes latérales de la lignine. Le caractère guaïacyl plus prononcé pour la lignine de l'érable à sucre de même que sa proportion plus élevée dans le bois de l'érable à sucre comparativement au bois de bouleau jaune expliqueraient une meilleure efficacité de soudage pour l'érable à sucre.

L'analyse des composés volatils a permis de constater que les émanations produites sont similaires pour les deux essences étudiées. La plupart de ces gaz ne représentent pas un risque pour la santé humaine ou pour l'environnement. L'analyse a permis de démontrer l'absence totale de monoxyde de carbone (CO) durant le soudage et de très faibles émissions de dioxyde de carbone (CO₂). La proportion des différentes émissions se rapproche de celle contenue dans l'air. Ces résultats ont permis de confirmer le caractère écologique de la méthode de soudage du bois par friction rotationnelle.

Les résultats obtenus dans le cadre de ce projet de recherche ont permis de développer une expertise québécoise sur les caractéristiques de soudage de bois feuillus d'érable à sucre et de bouleau jaune. Le projet a permis de concevoir et de fabriquer le premier prototype de machine réalisant l'assemblage de panneaux lamellés sans colle et de développer une expertise en conception et fabrication d'équipement de soudage du bois par friction rotationnelle. L'élaboration d'une technique d'assemblage novatrice et son transfert vers l'industrie constituent les principales retombées de ce projet. Cette avance technologique pourrait permettre à notre industrie de maintenir sa compétitivité face à la concurrence mondiale.

Le projet constitue une opportunité d'innovation unique pour le secteur canadien de la fabrication des produits du bois. En éliminant les colles, il devient possible de produire un produit performant aux vertus écologiques sans les effets négatifs liés aux colles synthétiques. L'éco-conception de panneaux lamellés-soudés requiert uniquement une ressource biodégradable, écologique et entièrement recyclable qu'est le bois. L'absence de connecteurs métalliques ou plastiques ou encore de colle font en sorte que le produit, une fois sa vie utile complétée, peut être déchiqueté afin de produire des copeaux pouvant être réutilisés ou encore servir pour produire de l'énergie dans un système utilisant la biomasse forestière. Ceci permettra en bout de ligne de limiter la production de déchets en site d'enfouissement. Cette technologie s'oriente directement dans un cadre de conception de composantes de meuble en bois intégrant le développement durable. Ces travaux permettront au secteur canadien de la fabrication des produits du bois de se positionner à l'avant-garde des nouvelles tendances en matière d'écoconception et de développer une nouvelle niche de marché pour ses produits.

L'innovation ici se traduit par la mise en œuvre d'un nouveau produit et d'un procédé significativement supérieurs sur le plan environnemental à ce qui est actuellement utilisé ou disponible. Le projet a permis de développer des connaissances inédites et un savoir-faire qui favorise une réduction à la source tout en influençant les modes de production et de consommation. Dans un premier temps, il pourrait permettre d'améliorer de façon significative le procédé actuel d'assemblage de composantes de meuble en bois. Que ce soit par l'élimination des colles synthétiques ou encore les gains liés aux temps de conception. L'aptitude au recyclage des composantes en bois soudées offrira la possibilité de gérer de façon responsable les matières résiduelles en raison de l'aspect vert lié à la méthode d'assemblage. Ces efforts de développement pourront éventuellement être transférés pour le soudage d'essences résineuses, notamment pour des applications en structure.

Dans le cadre de travaux futurs, il pourrait être intéressant d'effectuer une étude de sensibilité afin d'optimiser le design des panneaux lamellés-soudés ainsi que la configuration des goujons à l'intérieur de ceux-ci. Il serait également intéressant de valider ces résultats à l'aide d'un modèle par éléments finis afin d'avoir un cadre de conception permettant d'offrir un produit durable et performant. Enfin, il serait fort intéressant

d'envisager le soudage du bois pour des applications en structure, notamment à l'intérieur de constructions à partir de panneaux lamellés-croisés (*cross-laminated timber*). L'utilisation d'une telle façon de faire pourrait rendre les produits plus acceptables face à la norme LEED (*Leadership in Energy and Environmental Design*), une norme de comparaison acceptée à l'échelle internationale pour la conception, la construction et l'exploitation de bâtiments écologiques à haut rendement.

Bibliographie

- AIST (2011) *Spectral database for organic compounds*. [En ligne] http://riodb01.ibase.aist.go.jp/sdbs/cgi-bin/direct_frame_top.cgi. (Page consulté le 19 Décembre 2011).
- Amy, L. (1961) *The physico-chemical bases of the combustion of cellulose and ligneous materials*. Cahier du Centre Technique du bois, France, No. 45, 30 p.
- Anonyme (2001) *Guide pour une construction et une rénovation respectueuses de l'environnement*. 2^e Édition. Ministère des Travaux publics et des Services gouvernementaux du Canada. Canada. 185 p.
- Arseneau, D.F. (1971) *Competitive reactions in the thermal decomposition of cellulose*. Can. J. Chem. 49(4): 632-638.
- ASTM (2009) *Standard test methods for small clear specimens of timber*. ASTM D143. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, États-unis.
- ASTM (2006) *Standard test methods for evaluating properties of wood-base fiber and particle panel materials*. ASTM D1037. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, États-Unis.
- ASTM (2000) *Standard test methods for mechanical fasteners in wood*. ASTM D1761. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, États-Unis.
- ASTM (1999) *Standard test method for determining strength of gap-filling adhesive bonds in shear by compression loading*. ASTM D3931. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, États-Unis.
- Anglès, M.N., Ferrando, F., Farriol, X., Salvadó, J. (2001) *Suitability of steam exploded residual softwood for the production of binderless panels. Effect of the pre-treatment severity and lignin addition*. Biomass Bioenerg. 21:211-224.
- Anglès, M.N., Ferrando, F., Farriol, X., Salvadó, J. (1999) *Binderless composites from pretreated residual softwood*. J. Appl. Polym. Sci. 73:2485-2492.
- Anonymous (2010) *Operating Instructions - Universal Sample Pump*. Catalog No. 224-PCXR4. SKC. PA, États-Unis.
- Auchet, S., Segovia, C., Mansouri, H.R., Meausoone, P.-J., Pizzi, A., Omrani, P. (2010) *Accelerating vs constant rate of insertion in wood dowel welding*. J. Adhesion Sci. Technol. 24:1319-1328.
- Bailon, J.-P., Dorlot, J.-M. (2000) *Des Matériaux*. 3^e Édition, École Polytechnique de Montreal, 740 p.
- Barro, R., Regueiro, J., Llompart, M., Garcia-Jares, C. (2009). *Analysis of industrial contaminants in indoor air: Part 1. Volatil organic compounds, carbonyl compounds, polycyclic aromatic hydrocarbons and polychlorinated biphenyls*. J. Chromat. A 1216:540-566.
- Beall, F.C., Eickner, H.W. (1970) *Thermal degradation of wood components: a review of the literature*. USDA Forest Service. Forest Prod. Lab. research paper. Madison, WIS. États-Unis. Rep. No. 130, 29 p.
- Belleville, B., Stevanovic, T., Pizzi, A., Cloutier, A., Blanchet, P. (2012) *Determination of optimal wood-dowel welding parameters for two North American hardwood species*. J. Adhes. Sci. Technol. (Publié).
- Belleville, B., Segovia, C., Pizzi, A., Stevanovic, T., Cloutier, A. (2011) *Wood blockboards fabricated by rotational dowel welding*. J. Adhes. Sci. Technol. 25(20): 2745-2753.

- Blanchet, P., Beauregard, R., Cloutier, A., Gendron, G., Lefebvre, M. (2003) *Evaluation of various engineered wood parquet flooring constructions*. For. Prod. J. 53(1): 89-93.
- Bocquet, J.-F., Pizzi, A., Resch, L. (2007a) *Full-scale industrial wood floor assembly and structures by welded-through dowels*. Holz Roh Werkst. 65(2): 149-155.
- Bocquet, J.-F., Pizzi, A., Despres, A., Mansouri, H.R., Resch, L., Michel, D., Letort, F. (2007b) *Wood joints and laminated wood beams assembled by mechanically-welded wood dowels*. J. Adhes. Sci. Technol. 21(3-4): 301-317.
- Bodig, J., Jayne, B.A. (1993) *Mechanics of Wood and Wood composites*. Krieger, New York, États-Unis. 712 p.
- Bourgeois, J., Guyonnet, R. (1988) *Characterization and analysis of torrefied wood*. Wood Sci. Technol., 22(2): 143-155.
- Bourgeois, J., Bartholin, M.C., Guyonnet, R. (1989) *Thermal treatment of wood: analysis of the obtained product*. Wood Sci. Technol., 23(4): 303-310.
- Brage, C., Yu, Q., Sjöström, K. (1996) *Characteristics of evolution of tar from wood pyrolysis in a fixed-bed reactor*. Fuel 75(2): 213-219.
- Bridgwater, A.V. (2003) *Renewable fuels and chemicals by thermal processing of biomass*. Chem. Eng. J., 91(2-3): 87-102.
- Bridgwater, A.V., Meier, D., Radlein, D. (1999) *An overview of fast pyrolysis of biomass*. Org. Geochem., 30(12): 1479-1493.
- Browne, F.L. (1958) *Theories on the combustion of wood and its control*. U.S. Forest Prod. Lab. Madison. Wis., USA, Rep. No. 2136, 59 p.
- BFCQ (2010) *Possibilités annuelles de coupe des unités d'aménagement pour la période 2008-2013. Résultats provinciaux*. Bureau du forestier en chef du Québec, Fiche synthèse version 2.2., FEC-FIC-723-PROV. 2010. 2 p.
- Butterman, H.C, Castaldi, M.J. (2009) *Syngas Production via CO₂ Enhanced Gasification of Biomass Fuels*. Environmental Engineering Science. 26(4): 703-713.
- Campbell, N.A. (1995) *Anatomie et croissance des végétaux*. Chapitre 31 de Biologie. Éditions du renouveau pédagogique, Québec, Canada. Pp 674-698.
- CSA (2005) *Règles de calcul aux états limites des charpentes en bois*. CSA-086-01. Canadian Standards Association (Association canadienne de normalisation).
- CCHST (2012) *Effets du dioxyde de carbone sur la santé*. Centre Canadien d'Hygiène et de Sécurité au Travail, [En ligne] http://www.cchst.ca/oshanswers/chemicals/chem_profiles/carbon_dioxide/health_cd.html. (Page consultée le 16 Janvier 2012).
- Chang, H.T., Yeh, T.F., Chang, S.T. (2002) *Comparisons of chemicals characteristic variations for photodegraded softwood and hardwood with/without polyurethane clear coatings*. Polym. Degrad. Stabil. 77:129-135.
- Colom, X., Carrillo, F., Nogués, F., Garriga, P. (2003) *Structural analysis of photodegraded wood by means of FTIR spectroscopy*. Polym. Degrad. Stabil. 80:543-549.
- CSIL (2010) *World furniture outlook 2010/2011 - Abstract preview*. Centre for Industrial Studies. Milan, Italie.
- Dahm, H.P. (1967) *Birchwood as raw material for pulping. II. Stored wood*. Norcks Skogind 21: 10-14.
- Delmotte, L., Ganne-Chedéville, C., Leban, J.-M., Pizzi, A., Pichelin, F. (2008) *CP-MAS C¹³ NMR and FT-IR investigation of the degradation reactions of polymer constituents in wood welding*. Polym. Degrad. Stab. Stabil. 93:406-412.

- del Río, J.C., Gutiérrez, A., Hernando, M., Landín, P., Romero, J., Martínez, A.T. (2005) *Determining the influence of eucalypt lignin composition in paper pulp yield using Py-GC/MS*. J. Anal. Appl. Pyrol. 74:110-115.
- Demirbas, A. (2002) *Analysis of liquid products from biomass via flash pyrolysis*. Energ. Source., 24(4): 337-345.
- Design-Expert (2001) *Design-Expert Software – Version 6 User’s Guide*. Stat-Ease, Minneapolis, MN, États-Unis.
- Doat, J., Deglise, X. (1982) *Gazeification par pyrolyse éclair de quelques bois tropicaux. Comparaison entre pyrolyse rapide et pyrolyse lente classique*. Bois et forets des tropiques. 198:59-74.
- Domensky, R., Rendos, F. (1962) *On the pyrolysis of wood and its components*. Holz als Roh- und Werkstoff. 20: 473-476.
- Elder, T. (1991) *The pyrolysis of wood*. In: Wood and Cellulosic Chemistry, Hon, D.N.S. and Shiraishi, N. (Eds.). Marcel Dekker, New York, USA. Pp. 665–699.
- Elliot, D.C., Baker, E.G. (1986) *The effect of catalysis on wood-gasification tar composition*. Biomass, 9(3): 195-203.
- Faix, O., Meier, D., Fortmann, J. (1990) *Thermal degradation products of wood: gas chromatographic separation and mass spectrometric characterization of monomeric lignin derived products*. Holz Roh Werkst. 48:281-285.
- Faix, O., Fortmann, J., Bremer, J., Meier, D. (1991) *Thermal degradation products of wood: gas chromatographic separation and mass spectrometric characterization of polysaccharide derived products*. Holz Roh Werkst. 49:213-219.
- Farrar, J.L. (2001) *Les arbres du Canada*. 4^e édition, Fides. Service canadien des forêts. Québec, Canada. 506 p.
- Fengel, D., Wegener, G. (2003) *Wood - Chemistry, ultrastructure, reactions*. Verlag Kessel, München, Allemagne.
- Fortin, P. (2011) *Parfum d’Asie*. L’actualité, 36(6): Pp. 50.
- Funaoka, M., Kako, T., Ahe, I. (1990) *Condensation of lignin during heating of wood*. Wood Sci. Technol., 24(3): 227-288.
- Ganne-Chedéville, C. (2008) *Soudage linéaire du bois: étude et compréhension des modifications physico-chimiques et développement d’une technologie d’assemblage innovante*. Thèse de doctorat. Université Henri Poincaré, Nancy 1. Nancy, France. 236 p.
- Ganne-Chedéville, C., Pizzi, A., Thomas, A., Leban, J.-M., Bocquet, J.-F., Despres, A., Mansouri, H.R. (2005) *Parameter interactions in two-block welding and the wood nail concept in wood dowel welding*. J. Adhes. Sci. Technol. 19(13/14): 1157-1174.
- Geib, S.M., Filley, T.R., Hatcher, P.G., Hoover, K., Carlson, J.E., Jimenez-Gasco, M., Nakagawa-Izumi, A., Sleighter, R.L., Tien, M. (2008) *Lignin degradation in wood-feeding insects*. In the Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America 105(35):12932-12937.
- Gfeller, B., Zanetti, M., Properzi, M., Pizzi, A., Pichelin, F., Lehmann, M., Delmotte, L. (2003) *Wood bonding by vibrational welding*. J. Adhes. Sci. Technol. 17(11): 1573-1589.
- Giese, M. (1995) *Fertigungs- und werkstofftechnische Betrachtungen zum Vibrationsschweißen von Polymerwerkstoffe*. Thèse de doctorat, Lehrstuhl für Kunststofftechnik, Universität Erlangen-Nürnberg, ISBN : 3-9802740-7-1.

- Gilbert, V. (2005) *Caractérisation des résidus provenant de l'industrie de la seconde transformation des panneaux de particules et de fibres*. Dissertation, Université Laval, Québec, Canada, 92 p.
- Gliniorz, K.U., Mohr, S., Natterer, J. (2001) *Wood welding*, In Navi P. (ed), Proceedings of the 1st International Conference of the European Society for Wood Mechanics, Lausanne, Suisse, pp. 571-574.
- Goos, A.W. (1952) *Wood Chemistry*. Chapitre 20, Wise, L.E. et Jahn E.C., Eds, Reinhold Publ. Corp. USA. Pp. 826-851.
- Goulet, M., Laforest, P. (1974) *Étude de l'application de la théorie de l'élasticité aux déformations du bois sous pression*. Note de recherches No 11. Département d'exploitation et utilisation des bois. Université Laval, Sainte-Foy, Canada. 38 p.
- Govoni, P. (2011) *The lesson of hidden champions*. World Furniture - International Markets Review (Mars).
- Hakkou, M., Pétrissans, M., Zoulalian, A., Gérardin, P. (2005) *Investigation of wood wettability changes during heat treatment on the basis of chemical analysis*. Polym. Degrad. Stabil. 89:1-5.
- Health Canada (1989) *Exposure Guidelines for Residential Indoor Air Quality - A Report of the Federal-Provincial Advisory Committee on Environmental and Occupational Health*. Ontario, Canada, 28 p.
- Hemingway, R.W. (1969) *Thermal instability of fats relative to surface wettability of yellow birch wood (Betula lutea)*. Tappi J. 52(11): 2149-2155.
- Hill, C.A.S. (2006) *Wood Modification: Chemical, thermal and other processes*. Chapitre 5. Wiley, Chichester, Royaume-Uni. pp 99-127
- Hirai, N., Sobue, N., Asano, I. (1972) Studies on piezoelectric effect of wood. IV. Effects of heat treatment on cellulose crystallites and piezoelectric effect of wood. Mokuzai Gakkaishi, 18(11): 535-542.
- Hoadley, R.B. (1990) *Identifying wood. Accurate results with simple tools*. The Taunton Press, Connecticut, États-Unis, 223p.
- Hoadley, R.B. (2000) *Understanding wood : a craftsman's guide to wood technology*, 2^e éd., The Taunton Press, Connecticut, États-Unis, 280p.
- Hon, D.N.S., Shiraishi, N. (2001) *Wood and cellulose chemistry*. 2^e édition, Marcel Dekker. États-Unis.
- Horne, P.A., Williams, P.T. (1996) *Influence of temperature on the products from the flash pyrolysis of biomass*. Fuel, 75(9): 1051-1059.
- Inari, G.N., Pétrissans, M., Lambert, J., Ehrhardt, J.J., Gérardin, P. (2006) *XPS characterization of wood chemical composition after heat treatment*. Surf. Interface Anal. 38(10):1336-1342.
- Jensen, J.L., Koizumi, A., Sasaki, T., Tamura, Y., Iijima, Y. (2001) *Axially loaded glued-in hardwood dowels*. Wood Sci. Technol., 35: 73-83.
- Jessome, A.P. (2000) *Strength and Related Properties of Woods Grown in Canada*. Forintek Canada Corp., Special Publication SP514E. Sainte-Foy, Canada. 37 p.
- Kanazawa, F., Pizzi, A., Properzi, M., Delmotte, L., Pichelin, F. (2005) *Parameters influencing wood-dowel welding by high-speed rotation*. J. Adhes. Sci. Technol. 19(12): 1025-1038.
- Kilzer, F.J., Broido, A. (1965) *Speculations on the nature of cellulose pyrolysis*. Pyrodynamic, 2(2-3): 151-163.

- Kim, D.-Y., Nishiyama, Y., Wada, M., Kuga, S., Okano, T. (2001) *Thermal decomposition of cellulose crystallites in wood*. *Holzforschung*, 55(5):521-524.
- Kollmann, F., Côté, W. (1968) *Principles of wood science and technology I. Solid wood*, Springer-Verlag-Berlin, Heidelberg, New York, États-Unis.
- Kollmann, F. (1960) *Occurrence of exothermic reactions in wood*. *Holz Roh-Werkst.*, 18(6):193-200.
- Kotilainen, R.A., Toivanen, T.J., Alén, R.J. (2000) *FTIR monitoring of chemical changes in softwood during heating*. *J. Wood Chem. Technol.* 20(3):307-320.
- Kudo, K., Yoshida, E. (1957) *On the decomposition process of wood constituents in the course of carbonization, I. The decomposition of carbohydrate and lignin in mizunara (Quercus crispula Blume) wood*. *J. Jap. Wood Res. Soc.* 3(4):125-127.
- Lavoie, J.-M., Stevanovic, T. (2005) *Variation of chemical composition of the lipophilic extracts from yellow birch (Betula alleghaniensis) foliage*. *J. Agric. Food Chem.* 53(12):4747-4756.
- Leban, J.-M., Pizzi, A., Properzi, M., Pichelin, F., Gelhaye, P., Rose, C. (2005) *Wood welding: A challenging alternative to conventional wood gluing*. *Scand. J. Forest Res.*, 20(6):534-538.
- Leban, J.-M., Pizzi, A., Wieland, S., Zanetti, M., Properzi, M., Pichelin, F. (2004) *X-ray microdensitometry analysis of vibration-welded wood*. *J. Adhesion Sci. Technol.* 18:673-685.
- Leboeuf, M. (2007) *Arbres et plantes forestières du Québec et des maritimes*. Éditions Michel Quintin, QC, Canada. 394 p.
- Li, J., Henriksson, G., Gellerstedt, G. (2007) *Lignin depolymerization/repolymerization and its critical role for delignification of aspen wood by steam explosion*. *Bioresource Technol.* 98(16):3061-3068.
- Mansouri, H.R., Omrani, P., Pizzi, A. (2009) *Improving the water resistance of linear vibration-welded wood joints*. *J. Adhesion Sci. Technol.* 23:63-70.
- Meier, D., Faix, O. (1992) *Pyrolysis-Gas Chromatography- Mass Spectrometry. Methods in Lignin Chemistry*. Lin S.Y., et Dence, C.W. eds. Springer Series in Wood Science. Springer-Verlag., Berlin, Heidelberg, Allemagne. Pp. 177-199.
- MRNFQ (2012a) *Gros plan sur les forêts – Milieu forestier*. Ministère des Ressources naturelles et Faune du Québec, [En ligne]
<http://www.mrnf.gouv.qc.ca/forets/quebec/quebec-milieu.jsp>. (Page consultée le 17 avril 2012).
- MRNFQ (2012b) *Synthèse des possibilités forestières et des attributions par région et par essence - 30 mars*, Ministère des Ressources naturelles de Faune du Québec, Direction de la gestion des stocks ligneux, 1p.
- MRNFQ (2009) *Portrait de l'évolution de la forêt publique sous aménagement du Québec méridional des années 1970 aux années 2000*. Ministère des ressources naturelles et de la faune du Québec, Québec, Canada. 164 p.
- MRNFQ (2008) *Profil des produits forestiers – Deuxième transformation – Composants en bois*, Ministère des Ressources naturelles et de la Faune du Québec, Direction du développement de l'industrie des produits forestiers, 33 p.
- Mitchell, P.H. (1988). *Irreversible property changes of small loblolly pine specimens heated in air, nitrogen, or oxygen*. *Wood Fiber Sci.*, 20(3):320-355.
- Mobarak, F., Fahmy, Y., Augustin, H. (1982) *Binderless lignocellulose composite from bagasse and mechanism of self-bonding*. *Holzforschung* 36:131-135.

- Mohan, D., Pittman Jr, C.U., Steele, P.H. (2006) *Pyrolysis of wood/biomass for bio-oil: A critical review*. *Energ. Fuel* 20(3):848-889.
- Mougel, E., Segovia, C., Pizzi, A., Thomas, A. (2011) *Shrink-fitting and dowel welding in mortise and tenon structural wood joints*. *J. Adhes. Sci. Technol.* 25(1-3):213-221.
- Nakao, T., Okano, T., Asano, I. (1983) *Effects of heat treatment on the loss tangent of wood*. *Mokuzai Gakkaishi*, 29(10):657-662.
- NIST (2000) *XPS Database. NIST Standard Reference Database 20*, Version 3.3. National Institute Standards and Technology, Boulder, Col., États-Unis.
- Navi, P., Heger, F. (2005) *Comportement thermo-hydrromécanique du bois – Applications technologiques et dans les structures*. Presses polytechniques et universitaires romandes. Lausanne, Suisse, 300 p.
- Nonier, M.F., Vivas, N., Vivas de Gaulejac, N., Absalon, C., Soulié, P.H., Fouquet, E. (2006) *Pyrolysis–gas chromatography/mass spectrometry of Quercus sp. wood: Application to structural elucidation of macromolecules and aromatic profiles of different species*. *J. Anal. App. Pyrol.* 75:181-193.
- Nuopponen, M., Wikberg, H., Vuorinen, T., Maunu, S.L., Jamsa, S., Viitaniemi, P. (2004) *Heat-treated softwood exposed to weathering*. *J. Appl. Polym. Sci.* 91:2128-2134.
- O’Loinsigh, C., Oudjene, M., Shotton, E., Pizzi, A., Fanning, P. (2012) *Mechanical behaviour and 3D stress analysis of multi-layered wooden beams made with welded-through wood dowels*, *Composite Structures*, 94:313-321.
- Omrani, P., Pizzi, A., Mansouri, H.R., Leban, J.-M., Delmotte, L. (2009a) *Physico-chemical causes of the extent of water resistance of linearly welded wood joints*. *J. Adhes. Sci. Technol.* 23(6):827-837.
- Omrani, P., Masson, E., Pizzi, A., Mansouri, H.R. (2009b) *Emission gasses in linear vibration welding of wood*. *J. Adhes. Sci. Technol.*, 23(1):85-94.
- Omrani, P., Mason, E., Pizzi, A., Mansouri, H.R. (2008) *Emission of gases and degradation volatiles from polymeric wood constituents in friction welding of wood dowels*. *Polym. Degrad. Stabil.* 93(4):794-799.
- Omrani, P., Bocquet, J.F., Pizzi, A., Leban, J.-M., Mansouri, H. (2007) *Zig-zag rotational dowel welding for exterior wood joints*. *J. Adhes. Sci. Technol.*, 21(10):923-933.
- Panshin, A.J., de Zeeuw C. (1980) *Textbook of Wood Technology*. 4e édition, McGraw-Hill. New York, États-Unis. 722 p.
- Pizzi, A. (2006) *Recent developments in eco-efficient bio-based adhesives for wood bonding: opportunities and issues*. *J. Adhes. Sci. Technol.*, 20(8):829-846.
- Pizzi, A., Leban, J.-M., Kanazawa, F., Properzi, M., Pichelin, F. (2004) *Wood dowel bonding by high speed rotation welding*. *J. Adhes. Sci. Technol.* 18(11):1263-1278.
- Properzi, M., Leban, J.-M., Pizzi, A., Wieland, S., Pichelin, F., Lehmann, M. (2005) *Influence of grain direction in vibrational wood welding*. *Holzforschung*, 59(1):23-27.
- Ramiah, M.V. (1970) *Thermogravimetric and differential thermal analysis of cellulose, hemicellulose and lignin*. *J. Appl. Polym. Sci.*, 14(5):1323-1337.
- Ramirez, N., Cuadras, A., Rovira, E., Borrull, F., Marcé, R. (2010) *Comparative study of solvent extraction and thermal desorption methods for determining a wide range of volatile organic compounds in ambient air*. *Talanta* 82:719-727.
- Renaud, A. (2009) *Minimalist Z chair assembly by rotational dowel welding*. *Eur. J. Wood Wood Prod.* 67(1):111-112.

- Resch, L., Despres, A., Pizzi, A., Bocquet, J.-F., Leban, J.-M. (2006) *Welding-through doweling of wood panels*. Holz Roh Werkst. 64(5):423-425.
- Rodriguez, G., Diouf, P., Blanchet, P., Stevanovic, T. (2010) *Wood dowel bonding by high-speed rotation welding - Application to two Canadian hardwood species*. J. Adhes. Sci. Technol. 24(8-10):1423-1436.
- Rogaume, Y. (2009) *Bois énergie: bases de combustion*. Présentation dans le cadre de la Formation bois énergie, Mars 2009, Université Laval, Québec, Canada.
- Rousset, P., Turner, I., Donnot, A., Perré, P. (2006) *Choix d'un modèle de pyrolyse ménagée du bois à l'échelle de la micoparticule en vue de la modélisation macroscopique*. Ann. For. Sci., 63(2):213-229.
- Rowell, R.M. (1984) *The chemistry of solid wood*. American Chemical Society, Washington, États-Unis. 618 p.
- Rowell, R.M., LeVan-Green, S.L. (2005) *Thermal Properties*. Chapitre 6 : Handbook of chemistry and wood composites. Rowell (ed.), CRC Press, États-Unis. Pp. 121-138.
- Rusche, H. (1973) *Thermal degradation of wood at temperatures up to 200 °C. I. Strength properties of wood after heat treatment*. Holz Roh-Werkst., 31(7):273-281.
- Salmén, N.L. (1982) *Temperature and water induced softening behavior of wood fiber based materials*. Dissertation, Swedish Forest Products Research Laboratory, Paper Technology Department, Stockholm, Suède, 150 p.
- Sanderman, W., Augustin, H. (1964) *Chemical investigations on the thermal decomposition of wood - Part III: Chemical investigation on the course of decomposition*. Holz Roh Werkst. 22(10):377-386.
- Santé Canada (2012) *Santé de l'environnement et du milieu de travail - À propos de la qualité de l'air et la santé*. [En ligne] http://www.hc-sc.gc.ca/ewh-semt/air/out-ext/effe/talk-a_propos-fra.php. (Page consultée le 16 Janvier 2012).
- Santé Canada (2002) *La pollution de l'air intérieur et la santé - Bulletin sur la santé et la qualité de l'air*. Santé Canada, Canada. 1 p.
- Sarni, F., Moutounet, M., Puech, J.L., Rabier, P. (1990) *Effect of heat-treatment of oak wood extractable compounds*. Holzforschung 44(6):461-466.
- SAS (2007) *SAS/STAT users' guide, version 9.2*. SAS Institute Inc. Cary, NC, États-Unis.
- Schäfer, M., Roffael, E. (2000) *On the formaldehyde release from wood*. Holz Roh Werkst. 58:259-264.
- Seah, M.P., Gilmore, L.S., Beamson, G. (1998) *XPS: Binding energy calibration of electron spectrometers 5 - Re-evaluation of the reference energies*. Surf. Interface Anal. 26(9):642-649.
- Sergeeva, V.N., Vaivads, A. (1954) *Thermographic study of the pyrolysis of wood and its constituents*. Latvijas PSR Zinat. Akad. Vestis, 86(9):103-108.
- Segovia, C., Pizzi, A. (2009) *Performance of dowel-welded wood furniture linear joints*. J. Adhes. Sci. Technol. 23(9):1293-1301.
- Shafizadeh, F. (1984) *The chemistry of pyrolysis and combustion*. Tiré de Rowell, R.M., (Ed.), The Chemistry of Solid Wood. Advances in Chemistry Series, Number 207. American Chemical Society. États-Unis. Chap. 13: Pp 489-529.
- Shafizadeh, F., Chin, P.P.S. (1977) *Thermal deterioration of wood*. In: Wood Technology: Chemical Aspects. Goldstein, I.S. (Ed.). ACS Symposium Series, 43:57-81.
- Siau, J.F. (1995) *Wood: Influence of moisture on physical properties*. Department of Wood Science and Forest Products, Virginia Polytechnic Institute and State University, Vir., États-Unis, 227 p.

- Silverstein, R.M., Basler, G.C., Morill, T.C. (1998) *Identification spectrométrique de composés organiques*. De Boeck. Bruxelles, Belgique. 424 p.
- Sreemany, M., Ghosh, T.B. (1994) *On the XPS peak shape analysis*. Appl. Surf. Sci. 81(3):365-375.
- Stamm, B. (2006) *Development of friction welding of wood – Physical, mechanical and chemical studies*. Dissertation, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Suisse, 214 p.
- Stamm, A.J. (1964) *Wood and cellulose science*, Roland press, New York. USA.
- Stamm, A.J. (1956) *Thermal degradation of wood and cellulose*. Ind. And Eng. Chem. 48:413-417.
- Stamm, A.J., Burr, H.K., Kline, A.A. (1946) *Staybwood. Heat stabilized wood*. Industrial and Engineering Chemistry, 38(6):630-634.
- Statistics Canada (2010) Canadian Industry Department. Données obtenues du site web d'Industrie Canada, [En ligne] www.ic.gc.ca. (Page consultée le 16 Mars 2011).
- Stevanovic, T., Perrin, D. (2009) *Chimie du bois*. Presses polytechniques et universitaires romandes. France. 248 p.
- Sudo, K., Shimizu, K., Sakurai, K. (1985) *Characterization of steamed wood lignin from beech wood*. Holzforschung 39:281-288.
- Sun, Y., Royer, M., Diouf, P., Stevanovic, T. (2010) *Chemical changes induced by high-speed rotation welding of wood – Application to two Canadian hardwood species*. J. Adhes. Sci. Technol. 24(8-10):1383-1400.
- Sundqvist, B. (2004) *Colour change and acid formation in wood during heating*. Thèse de doctorat, Lulea university of Technology, Sweden. 154 p.
- Sutthoff, B., Franz, U., Hentschel, H., Schaaf, A. (1996) *Verfahren zum eibschweissartigen Fügen und Verbinden von Holz*. Patent DE 19620273 C2. Deutsches Patent- und Markenamt.
- Suzuki, S., Shintani, H., Park, S.Y., Saito, K., Laemsak, N., Okuma, M., Iiyama, K. (1998) *Preparation of binderless boards from steam exploded pulps of oil palm (Elaeis guineensis Jaxq.) fronds and structural characteristics of lignin and wall polysaccharides in steam exploded pulps to be discussed for self-bindings*. Holzforschung 52:417-426.
- Tanahashi, M., Goto, T., Horii, F., Hirai, A., Higuchi, T. (1989) *Characterization of steam-exploded wood, III, Transformation of cellulose crystals and changes of crystallinity*. Mokuzai Gakkaishi 35(7):654-662.
- Tiemann, H.D. (1915) *The effect of different methods of drying on the strength of wood*. Lumber World Review, 28(7):19-20.
- Timell, T.E. (1967) *Recent progress in the chemistry of wood hemicelluloses*. Wood Sci. Technol., 12:89-103.
- Tjeerdsma, B.F., Boonstra, M., Pizzi, A., Tekely, P., Militz, H. (1998) *Characterisation of thermally modified wood molecular reasons for wood performance improvement*. Holz Roh Werkst. 56:149-153.
- Tougaard, S. (1989) *Practical algorithm for background subtraction*. Surf. Sci. 216(3):343-360.
- Tremblay, C. (2008) *L'abc de la torréfaction. Nouveaux produits et procédés : avantages et inconvénients des bois modifiés thermiquement*. Opérations Forestières. Août:22-24.

- US Census Bureau (2011) United States Department of Commerce. Données obtenues du site web d'Industrie Canada, [En ligne] www.ic.gc.ca. (Page consultée le 16 Mars 2011).
- USDA (2010) *Wood Handbook: Wood as an Engineering Material*, US Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, Madison, Wis., États-Unis, 508p.
- Vallée, T., Tannert, T., Ganne-Chedeville, C. (2012) *Capacity prediction of welded timber joints*, *Wood Sci. Technol.*, 46:333-347.
- Vallée, V., Buelna, G. (2006) *La valorisation des résidus de panneaux à base de bois* Centre de recherche industrielle du Québec, Innovations technologiques – TE. [En ligne] http://www.icriq.com/fr/productique_tfp.html/-/asset_publisher/n2sB/content/la-valorisation-des-residus-de-panneaux-a-base-de-bois/maximized. (Page consultée le 11 Février 2012).
- van Dam, J.E.G., van den Oever, M.J.A., Teunissen, W., Keijsers, E.R.P., Peralta, A.G. (2004) *Process for production of high density/high performance binderless boards from whole coconut husk. Part 1: lignin as intrinsic thermosetting binder resin*. *Ind. Crop. Prod.* 19:207-216.
- van der Hage, E., Mulder, M., Boon, J. (1993) *Structural characterization of lignin polymers by temperature-resolved in-source pyrolysis - mass spectrometry and Curie-point pyrolysis - gas chromatography/mass spectrometry*. *J. Anal. Appl. Pyrol.* 25:149-183.
- Van Parys, D. (2007) *Métallerie - La méthode de la pyrolyse: Une économie de temps et de coûts – Futur standard européen pour l'identification des gaz issus des fumées de soudage*. Note de presse. [En ligne] <http://www.ocas.be/LaMethodeDeLaPyrolyse>, (Page consultée le 15 avril 2011).
- Vaziri, M., Lindgren, O., Pizzi, A. (2012) *Optimization of tensile-shear strength for linear welded scots pine*, *J. Adhes. Sci. Technol.*, 26:109-119.
- Vaziri, M., Lindgren, O., Pizzi, A. (2011) *Influence of welding parameters on weldline density and its relation to crack formation in welded scots pine joints*, *J. Adhes. Sci. Technol.*, 25:1819-1828.
- Velásquez, J.A., Ferrando, F., Salvadó, J. (2003) *Effects of kraft lignin addition in the production of binderless fiberboard from steam exploded Miscanthus sinensis*. *Ind. Crop. Prod.* 18:17-23.
- Velásquez, J.A., Ferrando, F., Salvadó, J. (2002) *Binderless fiberboard from steam exploded Miscanthus sinensis: the effect of a grinding process*. *Holz Roh Werkst.* 60:297-302.
- Wieland, S., Shi, B.Z., Pizzi, A., Properzi, M., Stampanoni, M., Abela, R. (2005) *Vibration welding of wood: X-ray tomography, additives, radical concentration*. *For. Prod. J.*, 55(1):84-87.
- Windeisen, E., Wegener, G. (2008) *Behaviour of lignin during thermal treatments of woods*. *Ind. Crop. Prod.* 27:157-162.
- Yang, H., Yan, R., Chen, H., Lee, D.H., Zheng, C. (2007) *Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis*. *Fuel* 86:1781-1788.
- Zoulalian, A., Pizzi, A. (2007) *Wood-dowel rotation welding - a heat-transfer model*. *J. Adhesion Sci. Technol.*, 21:97-108.

Annexe 1 Conception d'un lit pour bébé par soudage rotationnel.

Les performances des assemblages soudés étudiées dans les chapitres précédents ont permis de concevoir un meuble solide qui se veut équivalent à ceux assemblés avec des adhésifs pétrochimiques. Le design de ce meuble a permis d'étudier différentes méthodes d'assemblage de composants en bois utilisées en ébénisterie et de déterminer celle qui s'appliquerait la mieux au soudage du bois par friction rotationnelle. Un système d'assemblage de type tenon et mortaise complété par un goujon soudé a été retenu pour l'occasion (Figure 1). La construction de ce meuble a été effectuée selon les paramètres optimaux déterminés au Chapitre 3 de même que la technique de panneauage lamellés-soudés présentée au Chapitre 4. Le matériel utilisé a été préparé selon les critères et standards présentés dans ces chapitres. Des panneaux lamellés-soudés ont été utilisés afin de concevoir le sommier et les sections latérales du lit. Pour les côtés du lit, des panneaux à barreaux ont été assemblés à partir d'une perceuse à colonne manuelle (Figure 2). Un système de connecteurs *Quickfit* composé d'un goujon et d'une came a été utilisé afin de permettre l'assemblage ou le désassemblage des panneaux composant le meuble pour fins de manutention (Figure 3). Quatre de ces systèmes ont été installés dans les coins inférieurs du meuble à raison de deux par côté. Un sablage de finition a été effectué une fois l'assemblage final terminé. Afin de demeurer dans un esprit d'éco-conception, le choix d'un système de teinture et vernis à l'eau a été retenu pour compléter la finition du meuble (Figures 4 et 5). Les caractéristiques et dimensions finales du meuble sont présentées à la Figure 6 et au Tableau 1. Le projet a permis de développer une expertise en conception et en fabrication de meuble à partir de la technique de soudage du bois. Il a ainsi été possible de réaliser l'assemblage de panneaux et de composantes en bois sans colle afin de concevoir un produit de conception écologique. Ce meuble représente un exemple concret d'application de ce procédé novateur et durable.

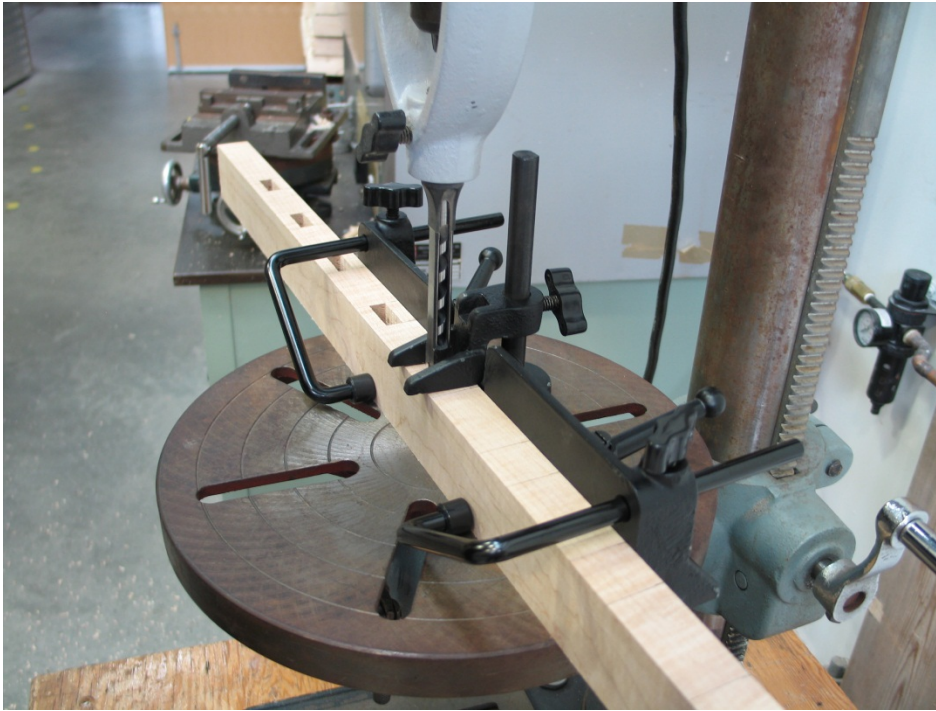


Figure 1 Préparation des mortaises pour le panneau soudé à barreaux.

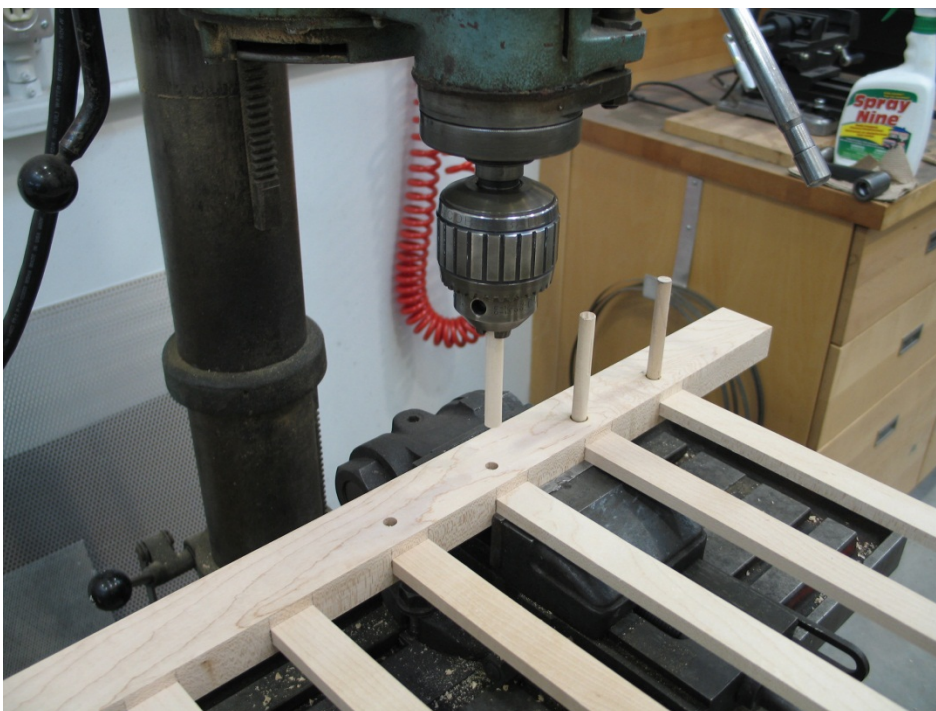


Figure 2 Fixation des assemblages de type tenon et mortaise sur les panneaux à barreaux avec un goujon par soudage rotationnel.

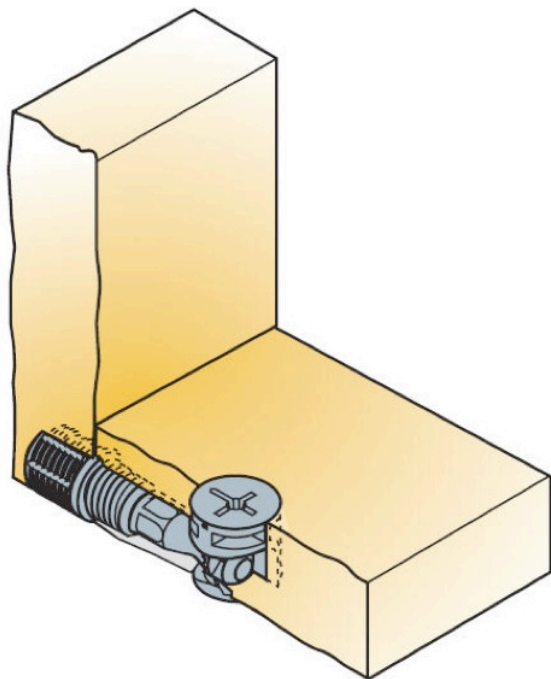


Figure 3 Système de connecteur *Quickfit* (Quincaillerie Richelieu®).



Figure 4 Application du système de finition.



Figure 5 Lit pour bébé conçu à partir de la technique de soudage du bois par friction rotationnelle.

Tableau 1 Fiche technique du lit pour bébé.

Essence	Érable à sucre
Largeur	67,0 cm
Hauteur	45,7 cm
Profondeur	36,8 cm
Nombre de goujons utilisés	238

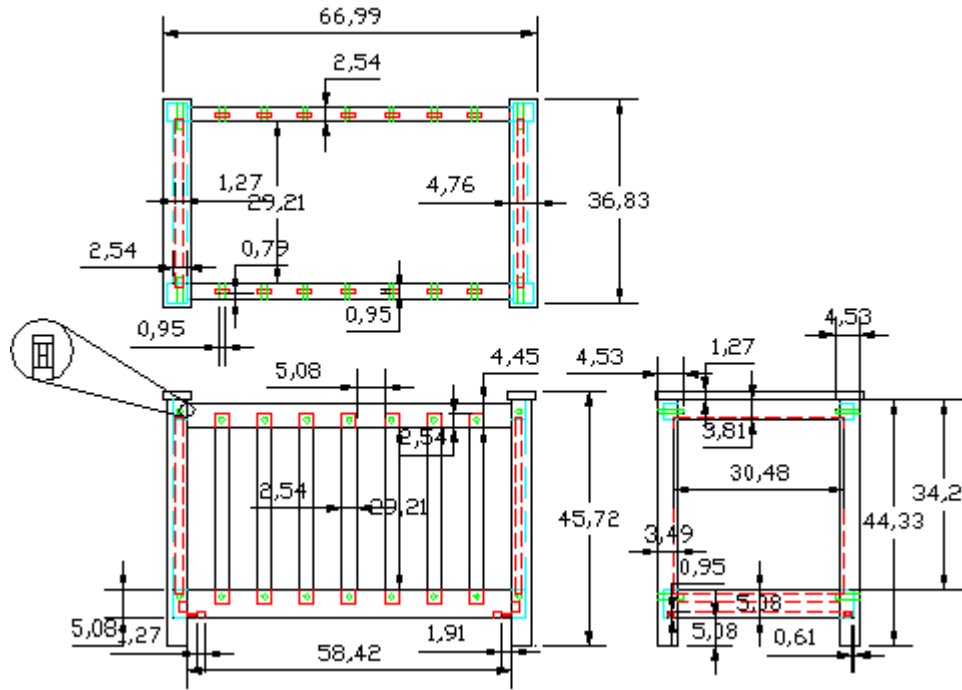


Figure 6 Plan de conception illustrant les trois vues principales du lit pour bébé conçu selon la technique d'assemblage par soudage rotationnel.

Annexe 2 Résultats des essais de détermination de la masse volumique basale.

Tableau 2 Masse volumique basale (D_b , $kg\ m^{-3}$) du matériel à l'étude.

<i>Essence</i>	Érable à sucre		Bouleau jaune	
Matériel	Baguette	Goujon	Baguette	Goujon
D_b	591 (32)	545 (70)	518 (21)	494 (30)
n	42	13	40	13

n : taille de la population à l'étude; écart-type entre parenthèses.

Annexe 3 Résultats des essais de détermination de la température à l'interface de soudage.

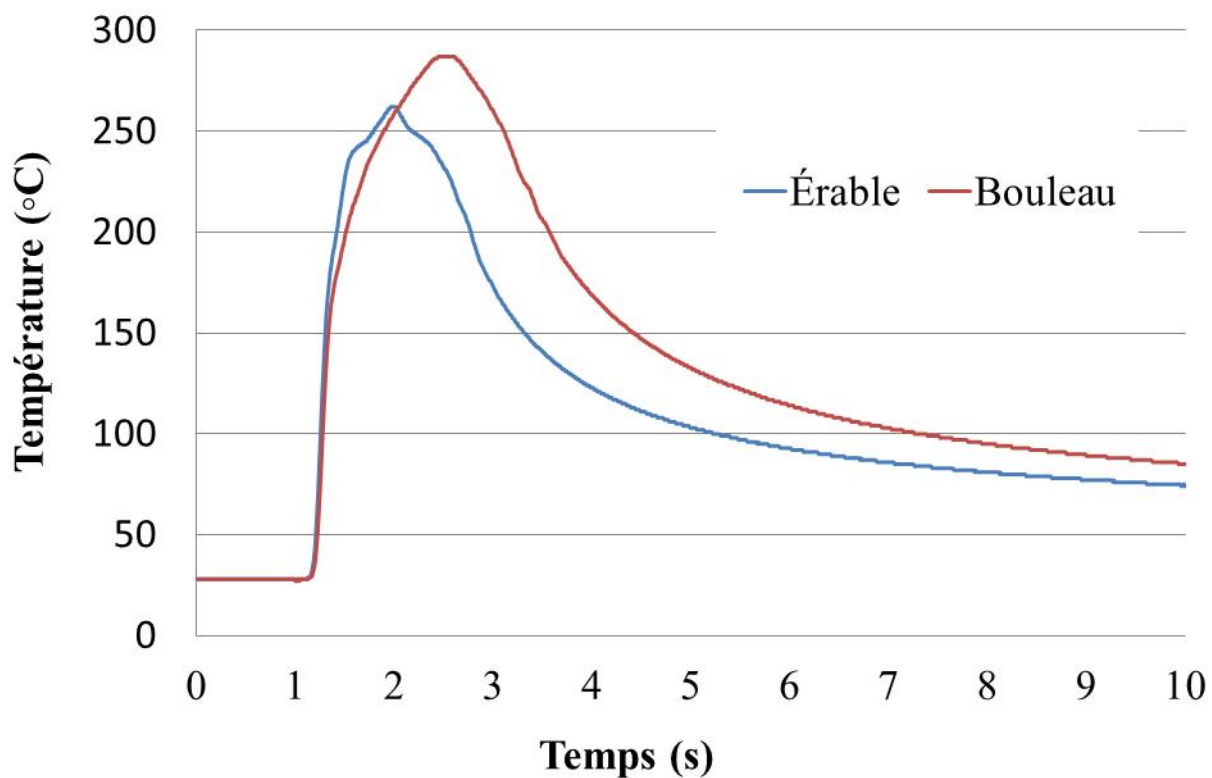


Figure 7 Profil de température type à l'interface lors du soudage par friction rotationnelle pour l'érable à sucre ($1000 \text{ tours min}^{-1}$, 25 mm s^{-1}) et le bouleau jaune ($1000 \text{ tours min}^{-1}$, $16,7 \text{ mm s}^{-1}$).

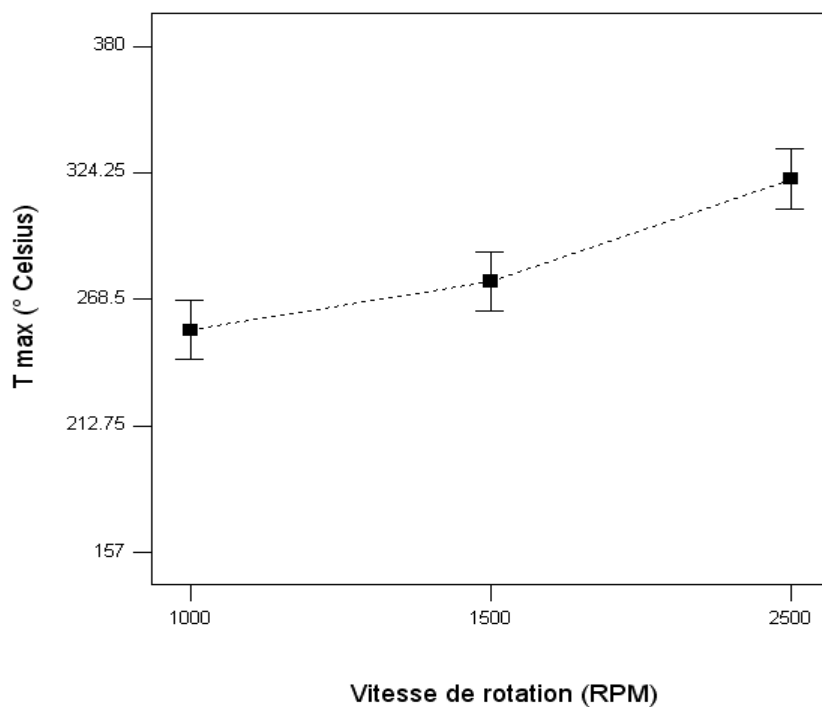


Figure 8 Effet de la vitesse de rotation du goujon (tours min^{-1}) sur la température maximale à l'interface lors du soudage pour l'érable à sucre à une vitesse d'insertion de $25,0 \text{ mm s}^{-1}$.

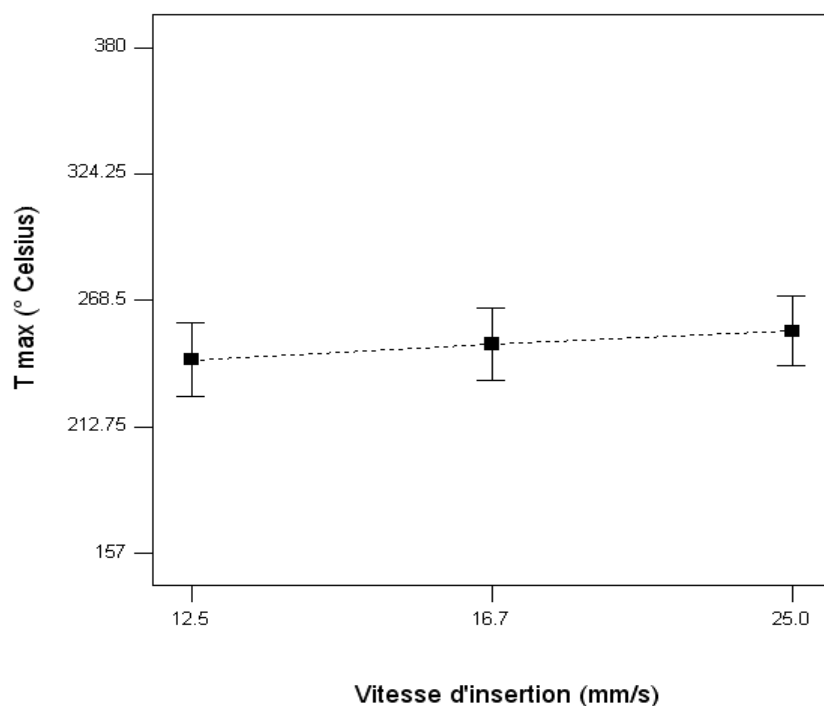


Figure 9 Effet de la vitesse d'insertion du goujon (mm s^{-1}) sur la température maximale à l'interface lors du soudage pour l'érable à sucre à une vitesse de rotation du goujon de $1000 \text{ tours min}^{-1}$.

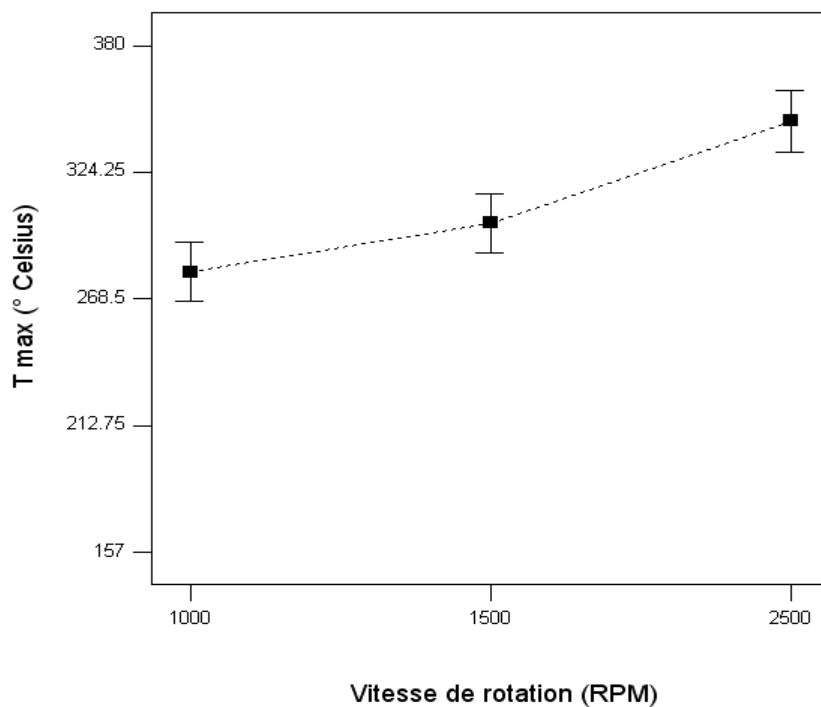


Figure 10 Effet de la vitesse de rotation du goujon (rotation minute-1) sur la température maximale à l'interface lors du soudage pour le bouleau jaune à une vitesse d'insertion de $16,7 \text{ mm s}^{-1}$.

Données brutes de T_{max} (°C) en fonction de l'essence, de la vitesse d'insertion (vit, mm s^{-1}) et de la vitesse de rotation (rpm)

Essence	rpm	vit	T
Erable	1000	25.0	233
Erable	1000	16.7	204
Bouleau	1500	16.7	300
Erable	1000	12.5	163
Bouleau	1000	16.7	256
Erable	2500	25.0	352
Erable	2500	25.0	310
Bouleau	2500	16.7	352
Erable	2500	25.0	306
Erable	1000	12.5	286
Erable	1000	16.7	205
Bouleau	1500	16.7	308
Bouleau	1000	16.7	287
Erable	1000	12.5	284
Bouleau	1000	16.7	316
Bouleau	1500	16.7	274
Erable	1000	25.0	170
Erable	1000	25.0	270

Erable	1000	16.7	270
Bouleau	1500	16.7	293
Erable	1000	16.7	310
Bouleau	1000	16.7	317
Erable	1000	12.5	226
Erable	1000	16.7	272
Bouleau	1500	16.7	289
Bouleau	1000	12.5	304
Erable	2500	25.0	359
Bouleau	1000	12.5	329
Erable	1000	25.0	256
Erable	1500	25.0	294
Bouleau	2500	16.7	359
Erable	1000	16.7	288
Erable	1500	25.0	326
Erable	1000	25.0	265
Bouleau	1500	16.7	282
Bouleau	2500	16.7	358
Bouleau	1000	16.7	241
Erable	1500	25.0	258
Erable	1500	25.0	298
Bouleau	1000	12.5	295
Bouleau	1000	16.7	243
Erable	1000	25.0	259
Erable	1000	25.0	219
Erable	1000	12.5	189
Bouleau	1000	12.5	313
Bouleau	1000	12.5	279
Erable	1000	12.5	197
Erable	1000	16.7	276
Bouleau	1000	12.5	273
Erable	1000	25.0	259
Erable	1500	25.0	219
Bouleau	1000	16.7	337
Bouleau	1000	12.5	233
Bouleau	1000	16.7	251
Erable	1500	25.0	313
Bouleau	2500	16.7	371
Bouleau	1000	16.7	314
Erable	2500	25.0	313
Erable	2500	25.0	360
Erable	1500	25.0	301
Erable	2500	25.0	300
Erable	2500	25.0	351
Erable	1500	25.0	248
Bouleau	1000	16.7	254
Erable	1000	16.7	279

Bouleau	2500	16.7	236
Erable	1500	25.0	326
Bouleau	1500	16.7	329
Erable	2500	25.0	380
Bouleau	2500	16.7	327
Bouleau	2500	16.7	335
Erable	1000	25.0	276
Bouleau	1500	16.7	326
Erable	1500	25.0	235
Bouleau	2500	16.7	359
Erable	1500	25.0	277
Erable	1000	25.0	303
Bouleau	1000	16.7	293
Bouleau	1500	16.7	326
Bouleau	1500	16.7	234
Erable	2500	25.0	307
Erable	2500	25.0	277
Bouleau	1500	16.7	275
Erable	1000	25.0	157
Bouleau	1500	16.7	333
Erable	1000	25.0	262

Annexe 4 Résultats des essais préliminaires de traction sur des assemblages soudés.

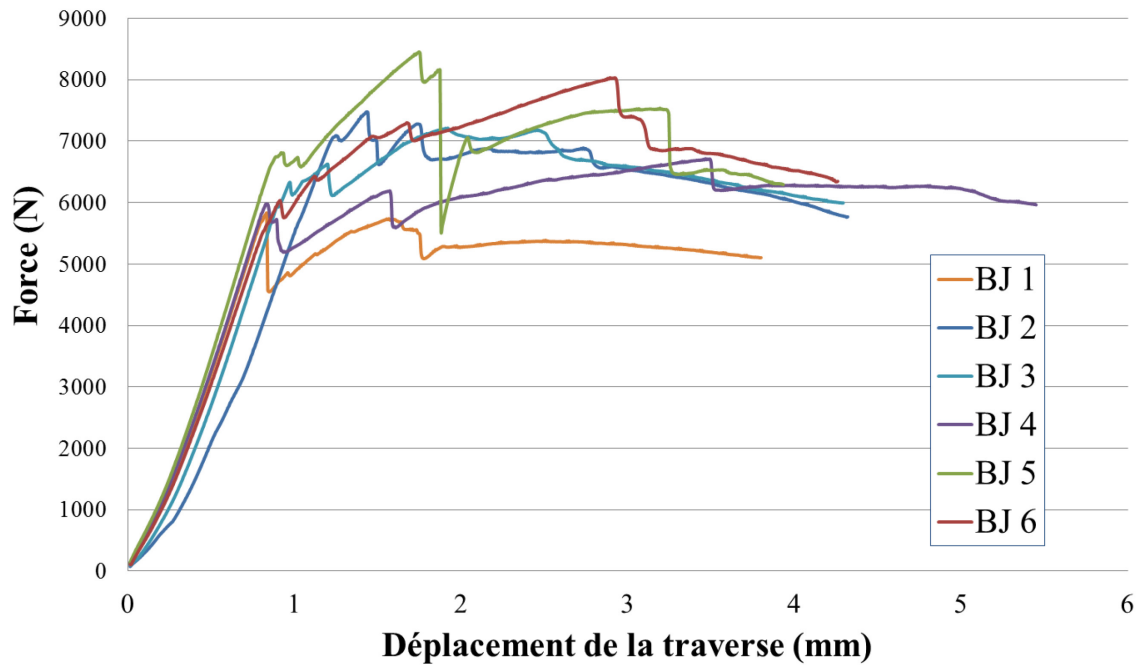


Figure 11 Essai en traction linéaire d'assemblages soudés de bouleau jaune (BJ) avec une insertion en alternance des goujons.

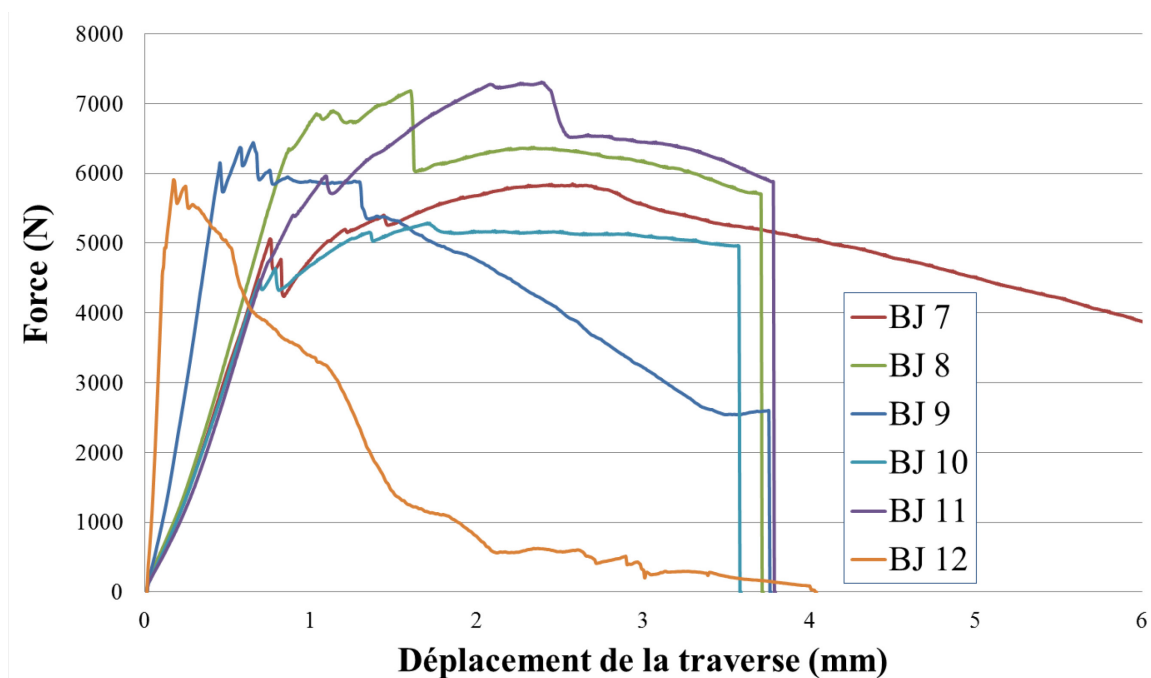


Figure 12 Essai en traction linéaire d'assemblages soudés de bouleau jaune (BJ) avec une insertion unidirectionnelle des goujons.

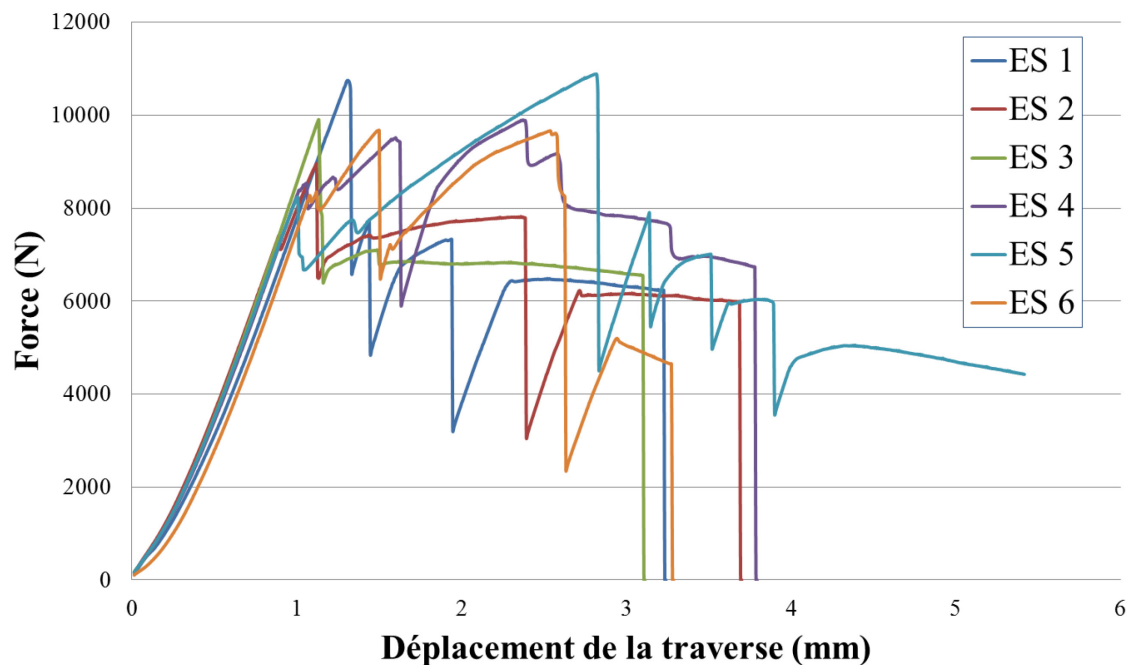


Figure 13 Essai en traction linéaire d'assemblages soudés d'érable à sucre (ES) avec une insertion en alternance des goujons.

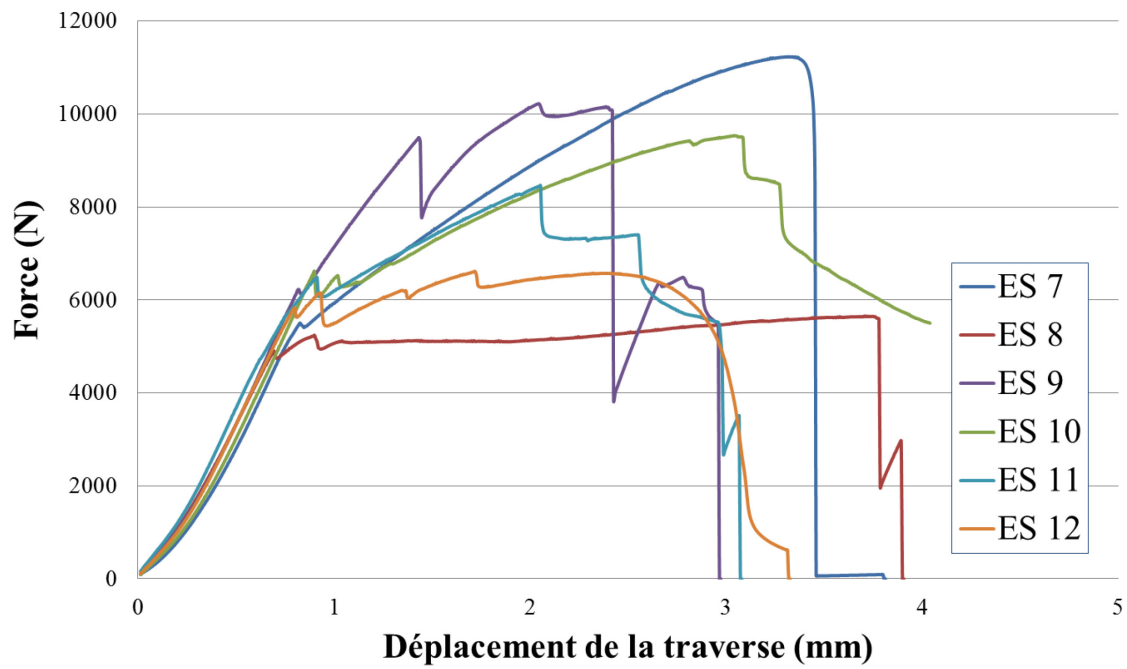


Figure 14 Essai en traction linéaire d'assemblages soudés d'érable à sucre (ES) avec une insertion unidirectionnelle des goujons.

Annexe 5 Résultats des essais de caractérisation de l'interface de soudage.

1. Caractérisation de l'interface de soudage par Py-GC/MS

Programme SAS (SAS 2007)

```
PROC IMPORT OUT=WORK.classeur1
      DATAFILE= 'Z:\PyGCMS SAS\classeur1.xlsx'
      DBMS=EXCELCS REPLACE;
      RANGE='Feuil45$';
      SCANTEXT=YES;
      USEDATE=YES;
      SCANTIME=YES;
```

```
proc print;
```

```
RUN;
```

```
proc mixed data=classeur1;
class essence traitement goujon;
model y=essence|traitement;
random goujon (essence);
RUN;
```

Notes pour le programme :

- ✓ Une seule feuille par produit dans le fichier de données Excel (Feuil1 à Feuil45 équivalentes aux produits 1 (guaiacol) à 45 (levoglucosan);
- ✓ Split-plots avec pseudo répétitions;
- ✓ 2 essences et 2 traitements soit soudé (*WM*) ou de référence (*Ref*).

Lexique des produits (Feuil1 à Feuil45)

#Feuil	Produit	Formule moléculaire
1	guaiacol	G
2	4-methyl guaiacol	G-CH ₃
3	4-ethyl guaiacol	G-CH ₂ -CH ₃
4	4-vinylguaiacol	G-CH=CH ₂
5	eugenol	G-CH ₂ -CH=CH ₂
6	4-propylguaiacol	G-CH ₂ -CH ₂ -CH ₃
7	vanillin	G-CHO
8	cis-eugenol	G-CH=CH-CH ₃
9	isoeugenol trans	G-CH=CH-CH ₃
10	homovanillin	G-CH ₂ -CHO

11	1-(4-hydroxy-3-methoxy phenyl)propyne	G-CC-CH ₃
12	acetovanillone	G-CO-CH ₃
13	guaiacyl acetone	G-CH ₂ -CO-CH ₃
14	trans-coniferylalcohol	G-CH=CH-CH ₂ OH
15	syringol	S
16	4-methyl-syringol	S-CH ₃
17	4-ethyl-syringol	S-CH ₂ -CH ₃
18	4-vinyl-syringol	S-CH=CH ₂
19	4-allyl-syringol	S-CH ₂ -CH=CH ₂
20	4-propyl-syringol	S-CH ₂ -CH ₂ -CH ₃
21	cis-4-propenylsyringol	S-CH=CH-CH ₃
22	syringaldehyde	S-CHO
23	4-propynilsyringol	S-CC-CH ₃
24	4-propynilsyringol ISOMER	S-CC-CH ₃
25	trans-4-propenylsyringol	S-CH=CH-CH ₃
26	acetosyringone	S-CO-CH ₃
27	syringilacetone	S-CH ₂ -CO-CH ₃
28	syringic acid methyl ester	S-COOCH ₃
29	propiosyringone	S-CO-CH ₂ -CH ₃
30	dihydrosinapyl alcohol	S-CH ₂ -CH ₂ -CH ₂ OH
31	trans-sinapaldehyde	S-CH=CH-CHO
32	trans-sinapylalcohol	S-CH=CH-CH ₂ OH
33	acetic acid	C ₂ H ₄ O ₂
34	furfural	C ₅ H ₄ O ₂
35	furfuryl alcohol	C ₅ H ₆ O ₂
36	2-cyclopent-1,4-dione	C ₅ H ₄ O ₂
37	5H-furan-2-one	C ₄ H ₄ O ₂
38	2,3-dihydro-5-methylfuran-2-one	C ₅ H ₆ O ₂
39	methyl-dihydro-2H-pyran-2-onE	
40	4-hydroxy-5,6-dihydro-2-pyran-2-one	C ₅ H ₆ O ₃
41	3 hydroxy-3 methyl-2-cyclopenten-1-one	C ₆ H ₈ O ₂
42	2 hydroxy-3 methyl-2-cyclopenten-1-one	C ₆ H ₈ O ₂
43	3-hydroxy-2-methyl-4H-pyran-4-one	C ₆ H ₆ O ₃
44	5-hydroxy-2-furfuraldehyde	C ₆ H ₆ O ₃
45	levoglucosan	C ₆ H ₁₀ O ₅

Feuil

essence	traitement	goujon	y
erable	reference	1	1,11
erable	reference	2	1,75
erable	reference	3	1,25
erable	welded	1	1,90
erable	welded	2	2,82
erable	welded	3	1,99
bouleau	reference	4	0,84
bouleau	reference	5	0,73
bouleau	reference	6	0,57

bouveau	welded	4	0,36
bouveau	welded	5	0,62
bouveau	welded	6	0,81

Feuil2

essence	traitement	goujon	y
erable	reference	1	3,42
erable	reference	2	2,66
erable	reference	3	1,86
erable	welded	1	1,89
erable	welded	2	3,28
erable	welded	3	2,42
bouveau	reference	4	0,85
bouveau	reference	5	1,12
bouveau	reference	6	1,00
bouveau	welded	4	0,41
bouveau	welded	5	0,89
bouveau	welded	6	1,45

Feuil3

essence	traitement	goujon	y
erable	reference	1	0,34
erable	reference	2	0,72
erable	reference	3	0,50
erable	welded	1	0,60
erable	welded	2	1,02
erable	welded	3	0,69
bouveau	reference	4	0,42
bouveau	reference	5	0,35
bouveau	reference	6	0,28
bouveau	welded	4	0,23
bouveau	welded	5	0,35
bouveau	welded	6	0,36

Feuil4

essence	traitement	goujon	y
erable	reference	1	3,49
erable	reference	2	5,05
erable	reference	3	4,68
erable	welded	1	4,54
erable	welded	2	5,57
erable	welded	3	4,77
bouveau	reference	4	4,12
bouveau	reference	5	3,35
bouveau	reference	6	3,12
bouveau	welded	4	2,32
bouveau	welded	5	3,15

bouleau	welded	6	3,50
---------	--------	---	------

Feuil5

essence	traitement	goujon	y
erable	reference	1	0,96
erable	reference	2	0,95
erable	reference	3	0,90
erable	welded	1	0,57
erable	welded	2	0,78
erable	welded	3	0,61
bouleau	reference	4	0,84
bouleau	reference	5	0,86
bouleau	reference	6	0,86
bouleau	welded	4	0,69
bouleau	welded	5	0,72
bouleau	welded	6	0,77

Feuil6

essence	traitement	goujon	y
erable	reference	1	
erable	reference	2	0,17
erable	reference	3	0,12
erable	welded	1	0,12
erable	welded	2	0,23
erable	welded	3	0,13
bouleau	reference	4	0,10
bouleau	reference	5	0,10
bouleau	reference	6	0,12
bouleau	welded	4	0,21
bouleau	welded	5	0,43
bouleau	welded	6	0,39

Feuil7

essence	traitement	goujon	y
erable	reference	1	2,42
erable	reference	2	2,20
erable	reference	3	1,84
erable	welded	1	2,80
erable	welded	2	2,86
erable	welded	3	2,68
bouleau	reference	4	1,75
bouleau	reference	5	1,89
bouleau	reference	6	1,80
bouleau	welded	4	1,33
bouleau	welded	5	1,72
bouleau	welded	6	1,69

Feuil8

essence	traitement	goujon	y
erable	reference	1	0,73
erable	reference	2	0,59
erable	reference	3	0,55
erable	welded	1	0,46
erable	welded	2	0,62
erable	welded	3	0,52
bouleau	reference	4	0,65
bouleau	reference	5	0,72
bouleau	reference	6	0,44
bouleau	welded	4	0,42
bouleau	welded	5	0,50
bouleau	welded	6	0,58

Feuil9

essence	traitement	goujon	y
erable	reference	1	2,96
erable	reference	2	4,59
erable	reference	3	4,28
erable	welded	1	3,75
erable	welded	2	3,47
erable	welded	3	3,92
bouleau	reference	4	3,92
bouleau	reference	5	4,00
bouleau	reference	6	3,90
bouleau	welded	4	3,66
bouleau	welded	5	3,47
bouleau	welded	6	3,61

Feuil10

essence	traitement	goujon	y
erable	reference	1	0,73
erable	reference	2	0,89
erable	reference	3	0,84
erable	welded	1	0,95
erable	welded	2	0,83
erable	welded	3	1,04
bouleau	reference	4	1,34
bouleau	reference	5	1,21
bouleau	reference	6	0,98
bouleau	welded	4	0,70
bouleau	welded	5	0,82
bouleau	welded	6	1,09

Feuil11

essence	traitement	goujon	y
----------------	-------------------	---------------	----------

erable	reference	1	0,68
erable	reference	2	0,68
erable	reference	3	0,88
erable	welded	1	0,65
erable	welded	2	0,59
erable	welded	3	0,74
bouleau	reference	4	0,97
bouleau	reference	5	1,11
bouleau	reference	6	1,03
bouleau	welded	4	1,15
bouleau	welded	5	0,98
bouleau	welded	6	0,86

Feuil12

essence	traitement	goujon	y
erable	reference	1	1,01
erable	reference	2	1,19
erable	reference	3	1,45
erable	welded	1	1,16
erable	welded	2	1,09
erable	welded	3	1,25
bouleau	reference	4	1,35
bouleau	reference	5	1,40
bouleau	reference	6	1,35
bouleau	welded	4	1,12
bouleau	welded	5	1,11
bouleau	welded	6	1,08

Feuil13

essence	traitement	goujon	y
erable	reference	1	0,25
erable	reference	2	0,44
erable	reference	3	0,42
erable	welded	1	0,49
erable	welded	2	0,60
erable	welded	3	0,52
bouleau	reference	4	0,32
bouleau	reference	5	0,29
bouleau	reference	6	0,31
bouleau	welded	4	0,34
bouleau	welded	5	0,47
bouleau	welded	6	0,40

Feuil14

essence	traitement	goujon	y
erable	reference	1	1,93
erable	reference	2	1,53

erable	reference	3	2,20
erable	welded	1	1,31
erable	welded	2	1,25
erable	welded	3	1,29
bouleau	reference	4	0,85
bouleau	reference	5	1,84
bouleau	reference	6	1,41
bouleau	welded	4	1,70
bouleau	welded	5	1,69
bouleau	welded	6	1,43

Feuil15

essence	traitement	goujon	y
erable	reference	1	7,40
erable	reference	2	9,08
erable	reference	3	7,95
erable	welded	1	9,39
erable	welded	2	11,13
erable	welded	3	10,30
bouleau	reference	4	5,31
bouleau	reference	5	4,42
bouleau	reference	6	3,76
bouleau	welded	4	3,64
bouleau	welded	5	5,14
bouleau	welded	6	5,47

Feuil16

essence	traitement	goujon	y
erable	reference	1	7,33
erable	reference	2	8,49
erable	reference	3	7,30
erable	welded	1	5,91
erable	welded	2	3,31
erable	welded	3	2,42
bouleau	reference	4	0,76
bouleau	reference	5	0,75
bouleau	reference	6	0,49
bouleau	welded	4	0,35
bouleau	welded	5	0,57
bouleau	welded	6	0,62

Feuil17

essence	traitement	goujon	y
erable	reference	1	0,76
erable	reference	2	1,03
erable	reference	3	0,83
erable	welded	1	1,05

erable	welded	2	1,19
erable	welded	3	1,04
bouleau	reference	4	0,76
bouleau	reference	5	0,63
bouleau	reference	6	0,48
bouleau	welded	4	0,62
bouleau	welded	5	0,67
bouleau	welded	6	0,72

Feuil18

essence	traitement	goujon	y
erable	reference	1	17,73
erable	reference	2	17,43
erable	reference	3	18,09
erable	welded	1	16,62
erable	welded	2	16,01
erable	welded	3	17,01
bouleau	reference	4	16,05
bouleau	reference	5	14,99
bouleau	reference	6	14,72
bouleau	welded	4	12,95
bouleau	welded	5	17,12
bouleau	welded	6	15,94

Feuil19

essence	traitement	goujon	y
erable	reference	1	2,65
erable	reference	2	2,74
erable	reference	3	2,94
erable	welded	1	2,68
erable	welded	2	2,78
erable	welded	3	2,91
bouleau	reference	4	4,15
bouleau	reference	5	3,94
bouleau	reference	6	3,76
bouleau	welded	4	3,88
bouleau	welded	5	3,81
bouleau	welded	6	3,83

Feuil20

essence	traitement	goujon	y
erable	reference	1	0,14
erable	reference	2	0,22
erable	reference	3	0,19
erable	welded	1	0,19
erable	welded	2	0,22
erable	welded	3	0,23

bouleau	reference	4	0,19
bouleau	reference	5	0,15
bouleau	reference	6	0,13
bouleau	welded	4	0,14
bouleau	welded	5	0,07
bouleau	welded	6	0,16

Feuil21

essence	traitement	goujon	y
erable	reference	1	2,01
erable	reference	2	1,95
erable	reference	3	2,20
erable	welded	1	1,97
erable	welded	2	2,03
erable	welded	3	2,14
bouleau	reference	4	2,68
bouleau	reference	5	2,46
bouleau	reference	6	2,39
bouleau	welded	4	2,37
bouleau	welded	5	2,59
bouleau	welded	6	2,48

Feuil22

essence	traitement	goujon	y
erable	reference	1	6,14
erable	reference	2	6,82
erable	reference	3	7,35
erable	welded	1	10,39
erable	welded	2	9,41
erable	welded	3	9,85
bouleau	reference	4	9,45
bouleau	reference	5	9,85
bouleau	reference	6	9,54
bouleau	welded	4	9,84
bouleau	welded	5	10,43
bouleau	welded	6	10,12

Feuil23

essence	traitement	goujon	y
erable	reference	1	1,38
erable	reference	2	1,67
erable	reference	3	1,98
erable	welded	1	1,73
erable	welded	2	1,64
erable	welded	3	1,89
bouleau	reference	4	3,09
bouleau	reference	5	2,96

bouveau	reference	6	3,05
bouveau	welded	4	3,89
bouveau	welded	5	3,30
bouveau	welded	6	3,38

Feuil24

essence	traitement	goujon	y
erable	reference	1	0,63
erable	reference	2	0,70
erable	reference	3	0,78
erable	welded	1	0,75
erable	welded	2	0,66
erable	welded	3	0,68
bouveau	reference	4	1,39
bouveau	reference	5	1,50
bouveau	reference	6	1,38
bouveau	welded	4	1,52
bouveau	welded	5	1,48
bouveau	welded	6	1,19

Feuil25

essence	traitement	goujon	y
erable	reference	1	18,37
erable	reference	2	16,47
erable	reference	3	17,26
erable	welded	1	17,06
erable	welded	2	16,55
erable	welded	3	17,39
bouveau	reference	4	24,51
bouveau	reference	5	23,81
bouveau	reference	6	23,09
bouveau	welded	4	26,02
bouveau	welded	5	24,15
bouveau	welded	6	23,74

Feuil26

essence	traitement	goujon	y
erable	reference	1	2,28
erable	reference	2	2,71
erable	reference	3	2,84
erable	welded	1	2,61
erable	welded	2	2,67
erable	welded	3	2,84
bouveau	reference	4	3,42
bouveau	reference	5	2,93
bouveau	reference	6	2,84
bouveau	welded	4	2,50

bouleau	welded	5	2,95
bouleau	welded	6	3,00

Feuil27

essence	traitement	goujon	y
erable	reference	1	0,88
erable	reference	2	1,39
erable	reference	3	1,18
erable	welded	1	1,51
erable	welded	2	1,63
erable	welded	3	1,41
bouleau	reference	4	1,01
bouleau	reference	5	1,15
bouleau	reference	6	1,12
bouleau	welded	4	1,73
bouleau	welded	5	1,51
bouleau	welded	6	1,47

Feuil28

essence	traitement	goujon	y
erable	reference	1	0,49
erable	reference	2	0,75
erable	reference	3	0,55
erable	welded	1	0,78
erable	welded	2	0,78
erable	welded	3	0,70
bouleau	reference	4	0,48
bouleau	reference	5	0,37
bouleau	reference	6	0,43
bouleau	welded	4	0,56
bouleau	welded	5	0,57
bouleau	welded	6	0,44

Feuil29

essence	traitement	goujon	y
erable	reference	1	1,17
erable	reference	2	1,22
erable	reference	3	1,30
erable	welded	1	0,97
erable	welded	2	1,22
erable	welded	3	1,00
bouleau	reference	4	2,29
bouleau	reference	5	1,96
bouleau	reference	6	2,06
bouleau	welded	4	1,64
bouleau	welded	5	1,42
bouleau	welded	6	0,99

Feuil30

essence	traitement	goujon	y
erable	reference	1	0,26
erable	reference	2	0,41
erable	reference	3	0,48
erable	welded	1	0,43
erable	welded	2	0,46
erable	welded	3	0,44
bouleau	reference	4	0,58
bouleau	reference	5	0,58
bouleau	reference	6	0,60
bouleau	welded	4	0,71
bouleau	welded	5	0,68
bouleau	welded	6	0,58

Feuil31

essence	traitement	goujon	y
erable	reference	1	2,82
erable	reference	2	3,38
erable	reference	3	4,64
erable	welded	1	4,88
erable	welded	2	4,81
erable	welded	3	4,52
bouleau	reference	4	4,25
bouleau	reference	5	5,65
bouleau	reference	6	5,25
bouleau	welded	4	9,36
bouleau	welded	5	6,53
bouleau	welded	6	5,00

Feuil32

essence	traitement	goujon	y
erable	reference	1	0,49
erable	reference	2	0,14
erable	reference	3	0,37
erable	welded	1	0,68
erable	welded	2	0,58
erable	welded	3	0,63
bouleau	reference	4	0,69
bouleau	reference	5	0,73
bouleau	reference	6	0,74
bouleau	welded	4	2,75
bouleau	welded	5	1,70
bouleau	welded	6	1,07

Feuil33

essence	traitement	goujon	y
erable	reference	1	5,22
erable	reference	2	5,00
erable	reference	3	4,88
erable	welded	1	6,01
erable	welded	2	5,48
erable	welded	3	5,46
bouleau	reference	4	4,52
bouleau	reference	5	5,37
bouleau	reference	6	7,44
bouleau	welded	4	5,73
bouleau	welded	5	5,89
bouleau	welded	6	5,81

Feuil34

essence	traitement	goujon	y
erable	reference	1	7,76
erable	reference	2	5,06
erable	reference	3	6,01
erable	welded	1	7,51
erable	welded	2	9,55
erable	welded	3	6,58
bouleau	reference	4	6,43
bouleau	reference	5	6,43
bouleau	reference	6	7,47
bouleau	welded	4	11,41
bouleau	welded	5	7,72
bouleau	welded	6	7,79

Feuil35

essence	traitement	goujon	y
erable	reference	1	1,42
erable	reference	2	1,21
erable	reference	3	1,53
erable	welded	1	1,86
erable	welded	2	1,27
erable	welded	3	1,63
bouleau	reference	4	0,66
bouleau	reference	5	0,47
bouleau	reference	6	0,59
bouleau	welded	4	1,29
bouleau	welded	5	0,99
bouleau	welded	6	1,06

Feuil36

essence	traitement	goujon	y
erable	reference	1	0,83

erable	reference	2	0,59
erable	reference	3	0,75
erable	welded	1	0,51
erable	welded	2	1,07
erable	welded	3	0,66
bouleau	reference	4	0,69
bouleau	reference	5	0,63
bouleau	reference	6	0,75
bouleau	welded	4	0,64
bouleau	welded	5	0,59
bouleau	welded	6	0,57

Feuil37

essence	traitement	goujon	y
erable	reference	1	2,06
erable	reference	2	1,68
erable	reference	3	2,01
erable	welded	1	1,87
erable	welded	2	1,91
erable	welded	3	2,05
bouleau	reference	4	0,83
bouleau	reference	5	0,65
bouleau	reference	6	0,68
bouleau	welded	4	0,68
bouleau	welded	5	0,85
bouleau	welded	6	0,84

Feuil38

essence	traitement	goujon	y
erable	reference	1	5,68
erable	reference	2	4,79
erable	reference	3	5,33
erable	welded	1	5,38
erable	welded	2	5,26
erable	welded	3	5,60
bouleau	reference	4	2,45
bouleau	reference	5	1,87
bouleau	reference	6	1,99
bouleau	welded	4	2,32
bouleau	welded	5	2,71
bouleau	welded	6	2,59

Feuil39

essence	traitement	goujon	y
erable	reference	1	6,42
erable	reference	2	4,70
erable	reference	3	5,72

erable	welded	1	5,89
erable	welded	2	5,99
erable	welded	3	6,84
bouleau	reference	4	6,61
bouleau	reference	5	5,98
bouleau	reference	6	6,44
bouleau	welded	4	6,16
bouleau	welded	5	4,82
bouleau	welded	6	6,26

Feuil40

essence	traitement	goujon	y
erable	reference	1	-
erable	reference	2	17,81
erable	reference	3	23,23
erable	welded	1	18,94
erable	welded	2	17,31
erable	welded	3	21,87
bouleau	reference	4	32,35
bouleau	reference	5	33,40
bouleau	reference	6	40,29
bouleau	welded	4	42,27
bouleau	welded	5	42,44
bouleau	welded	6	33,23

Feuil41

essence	traitement	goujon	y
erable	reference	1	4,00
erable	reference	2	3,35
erable	reference	3	3,44
erable	welded	1	2,71
erable	welded	2	2,87
erable	welded	3	3,12
bouleau	reference	4	3,98
bouleau	reference	5	3,61
bouleau	reference	6	3,48
bouleau	welded	4	1,86
bouleau	welded	5	1,89
bouleau	welded	6	2,49

Feuil42

essence	traitement	goujon	y
erable	reference	1	3,05
erable	reference	2	3,33
erable	reference	3	2,93
erable	welded	1	2,81
erable	welded	2	3,95

erable	welded	3	3,64
bouleau	reference	4	1,23
bouleau	reference	5	0,90
bouleau	reference	6	0,82
bouleau	welded	4	0,97
bouleau	welded	5	0,80
bouleau	welded	6	1,08

Feuil43

essence	traitement	goujon	y
erable	reference	1	1,50
erable	reference	2	1,43
erable	reference	3	1,39
erable	welded	1	1,50
erable	welded	2	1,78
erable	welded	3	1,59
bouleau	reference	4	1,53
bouleau	reference	5	1,11
bouleau	reference	6	0,80
bouleau	welded	4	0,98
bouleau	welded	5	0,59
bouleau	welded	6	1,01

Feuil44

essence	traitement	goujon	y
erable	reference	1	2,62
erable	reference	2	1,87
erable	reference	3	2,55
erable	welded	1	3,54
erable	welded	2	2,20
erable	welded	3	3,30
bouleau	reference	4	1,73
bouleau	reference	5	1,76
bouleau	reference	6	2,40
bouleau	welded	4	1,35
bouleau	welded	5	1,35
bouleau	welded	6	2,72

Feuil45

essence	traitement	goujon	y
erable	reference	1	42,30
erable	reference	2	49,17
erable	reference	3	39,27
erable	welded	1	42,25
erable	welded	2	41,57
erable	welded	3	37,68
bouleau	reference	4	36,99

bouleau	reference	5	37,05
bouleau	reference	6	29,55
bouleau	welded	4	25,82
bouleau	welded	5	30,02
bouleau	welded	6	34,54

G-aldehyde

essence	traitement	goujon	F7	F10	Σy
erable	reference	1	2,42	0,73	3,15
erable	reference	2	2,20	0,89	3,09
erable	reference	3	1,84	0,84	2,68
erable	welded	1	2,80	0,95	3,75
erable	welded	2	2,86	0,83	3,69
erable	welded	3	2,68	1,04	3,73
bouleau	reference	4	1,75	1,34	3,08
bouleau	reference	5	1,89	1,21	3,10
bouleau	reference	6	1,80	0,98	2,78
bouleau	welded	4	1,33	0,70	2,03
bouleau	welded	5	1,72	0,82	2,54
bouleau	welded	6	1,69	1,09	2,78

G-ketone

essence	traitement	goujon	F12	F13	Σy
erable	reference	1	1,01	0,25	1,26
erable	reference	2	1,19	0,44	1,63
erable	reference	3	1,45	0,42	1,87
erable	welded	1	1,16	0,49	1,65
erable	welded	2	1,09	0,60	1,69
erable	welded	3	1,25	0,52	1,77
bouleau	reference	4	1,35	0,32	1,67
bouleau	reference	5	1,40	0,29	1,69
bouleau	reference	6	1,35	0,31	1,66
bouleau	welded	4	1,12	0,34	1,47
bouleau	welded	5	1,11	0,47	1,58
bouleau	welded	6	1,08	0,40	1,47

G-alcohol

essence	traitement	goujon	F14 = Σy
erable	reference	1	1,93
erable	reference	2	1,53
erable	reference	3	2,20
erable	welded	1	1,31
erable	welded	2	1,25
erable	welded	3	1,29
bouleau	reference	4	0,85
bouleau	reference	5	1,84
bouleau	reference	6	1,41

bouleau	welded	4	1,70
bouleau	welded	5	1,69
bouleau	welded	6	1,43

S-aldéhyde¹

essence	traitement	goujon	F22	F31	Σy
erable	reference	1	6,14	2,82	8,95
erable	reference	2	6,82	3,38	10,21
erable	reference	3	7,35	4,64	11,99
erable	welded	1	10,39	4,88	15,27
erable	welded	2	9,41	4,81	14,21
erable	welded	3	9,85	4,52	14,37
bouleau	reference	4	9,45	4,25	13,70
bouleau	reference	5	9,85	5,65	15,50
bouleau	reference	6	9,54	5,25	14,79
bouleau	welded	4	9,84	9,36	19,20
bouleau	welded	5	10,43	6,53	16,96
bouleau	welded	6	10,12	5,00	15,11

¹ Terminaison CHO.**S-kétone²**

essence	traitement	goujon	F26	F27	F29	Σy
erable	reference	1	2,28	0,88	1,17	4,33
erable	reference	2	2,71	1,39	1,22	5,32
erable	reference	3	2,84	1,18	1,30	5,32
erable	welded	1	2,61	1,51	0,97	5,08
erable	welded	2	2,67	1,63	1,22	5,52
erable	welded	3	2,84	1,41	1,00	5,25
bouleau	reference	4	3,42	1,01	2,29	6,71
bouleau	reference	5	2,93	1,15	1,96	6,05
bouleau	reference	6	2,84	1,12	2,06	6,02
bouleau	welded	4	2,50	1,73	1,64	5,87
bouleau	welded	5	2,95	1,51	1,42	5,88
bouleau	welded	6	3,00	1,47	0,99	5,45

² Terminaison CO-CH₃.**S-alcool³**

essence	traitement	goujon	F30	F32	Σy
erable	reference	1	0,26	0,49	0,74
erable	reference	2	0,41	0,14	0,55
erable	reference	3	0,48	0,37	0,85
erable	welded	1	0,43	0,68	1,11
erable	welded	2	0,46	0,58	1,04
erable	welded	3	0,44	0,63	1,07
bouleau	reference	4	0,58	0,69	1,26
bouleau	reference	5	0,58	0,73	1,31
bouleau	reference	6	0,60	0,74	1,33

bouleau	welded	4	0,71	2,75	3,46
bouleau	welded	5	0,68	1,70	2,39
bouleau	welded	6	0,58	1,07	1,65

³ Terminaison CH₂OH.

S-ester⁴

essence	traitement	goujon	F28 = Σy
erable	reference	1	0,49
erable	reference	2	0,75
erable	reference	3	0,55
erable	welded	1	0,78
erable	welded	2	0,78
erable	welded	3	0,70
bouleau	reference	4	0,48
bouleau	reference	5	0,37
bouleau	reference	6	0,43
bouleau	welded	4	0,56
bouleau	welded	5	0,57
bouleau	welded	6	0,44

⁴ Contient un segment COOC.

S-Oxy/Alk

essence	traitement	goujon	Oxy	Alk	Oxy/Alk = y
erable	reference	1	14,52	58,40	0,25
erable	reference	2	16,82	59,77	0,28
erable	reference	3	18,71	59,52	0,31
erable	welded	1	22,24	57,34	0,39
erable	welded	2	21,55	55,54	0,39
erable	welded	3	21,39	56,03	0,38
bouleau	reference	4	22,16	58,88	0,38
bouleau	reference	5	23,23	55,62	0,42
bouleau	reference	6	22,57	53,25	0,42
bouleau	welded	4	29,09	55,37	0,53
bouleau	welded	5	25,80	58,90	0,44
bouleau	welded	6	22,66	57,54	0,39

Oxy: Contient un O, $\Sigma(F22, F26-32)$; Alk: R-CH₃ ou R-CH₂-CH₃, $\Sigma(F15-32)$.

G-phénylpropane

essence	traitement	goujon	C ₆ C ₁ +C ₆ C ₂	C ₆ C ₃	(C ₆ C ₁ +C ₆ C ₂)/ C ₆ C ₃ = y
erable	reference	1	12,09	6,84	1,77
erable	reference	2	13,40	8,27	1,62
erable	reference	3	12,05	8,47	1,42
erable	welded	1	12,59	6,71	1,88
erable	welded	2	15,24	6,97	2,19
erable	welded	3	13,60	6,99	1,94
bouleau	reference	4	10,80	6,68	1,62
bouleau	reference	5	10,44	7,81	1,34

bouveau	reference	6	9,56	7,04	1,36
bouveau	welded	4	7,27	7,02	1,04
bouveau	welded	5	9,02	7,27	1,24
bouveau	welded	6	10,02	7,17	1,40

$C_6C_1+C_6C_2$: $\Sigma(F2-4, 7, 10-12)$; C_6C_3 : $\Sigma(F5, 6, 8, 9, 13, 14)$

2. Caractérisation par spectrométrie photoélectronique à rayon-X.

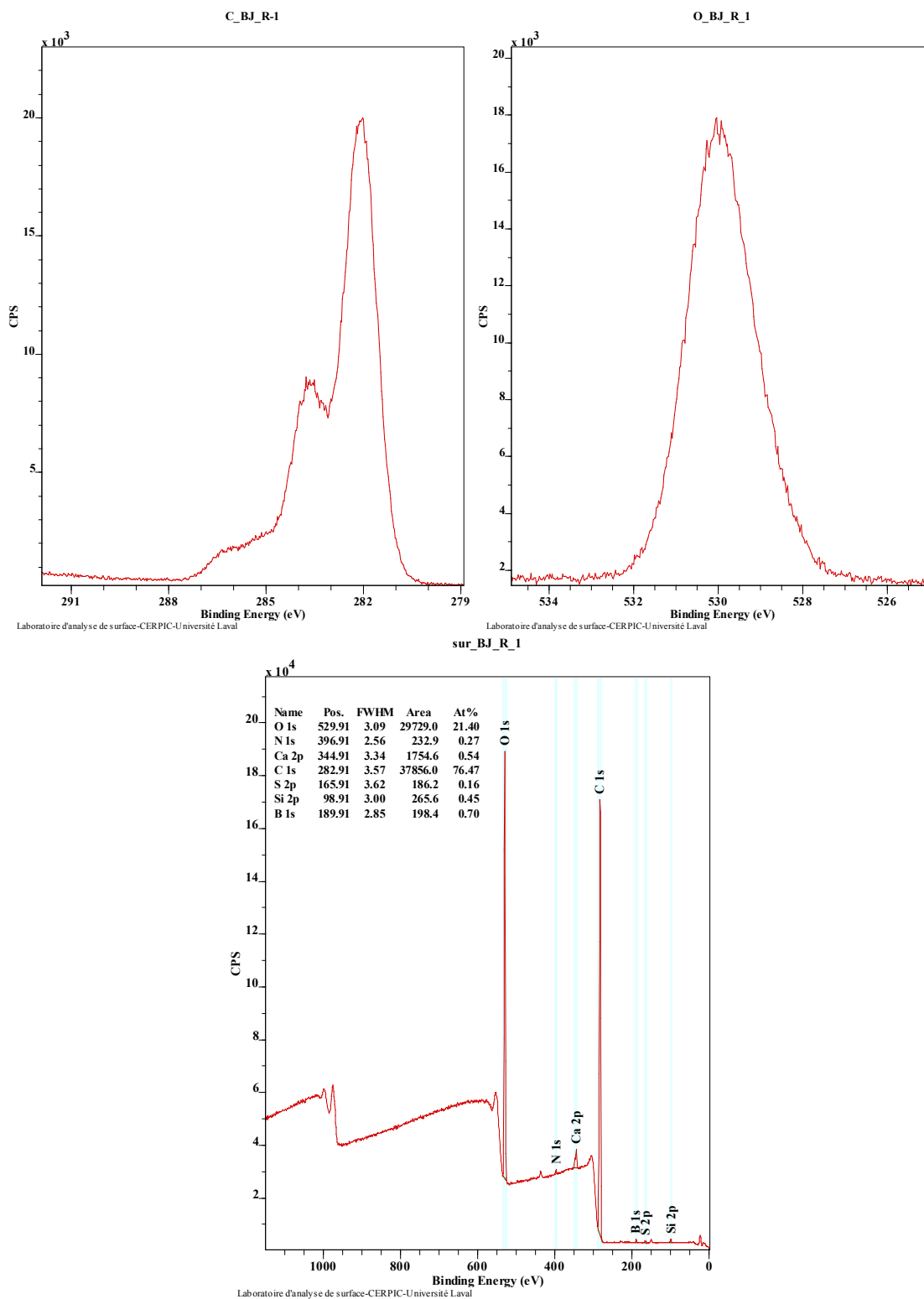


Figure 15 Spectrométrie photoélectronique par rayon-X pour le bouleau jaune de référence #1.

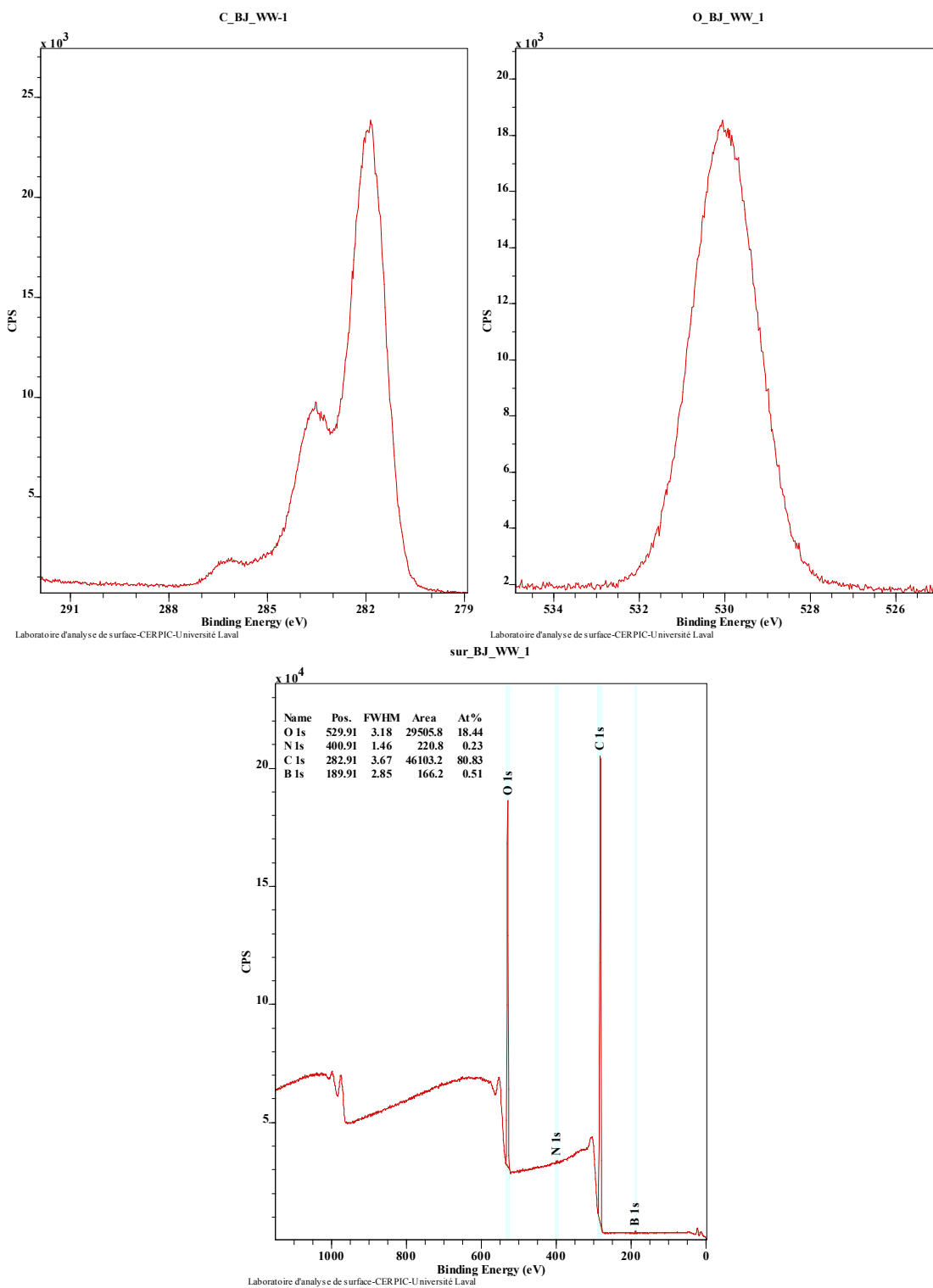


Figure 16 Spectrométrie photoélectronique par rayon-X pour le matériel soudé de bouleau jaune #1.

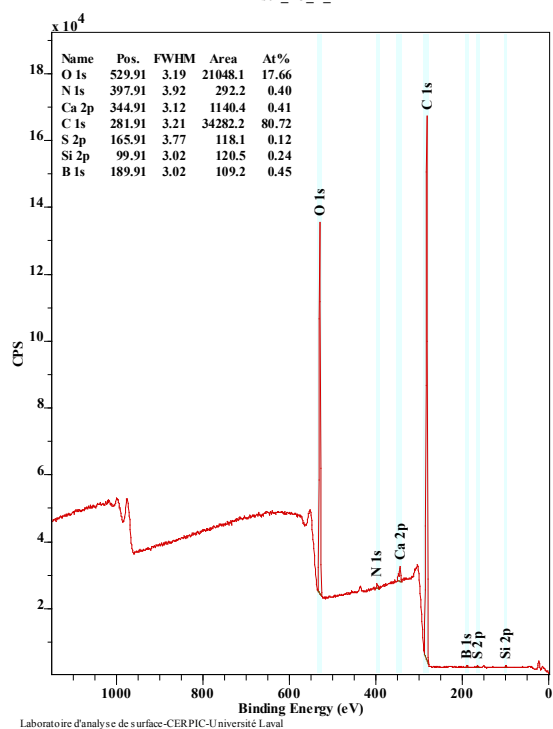
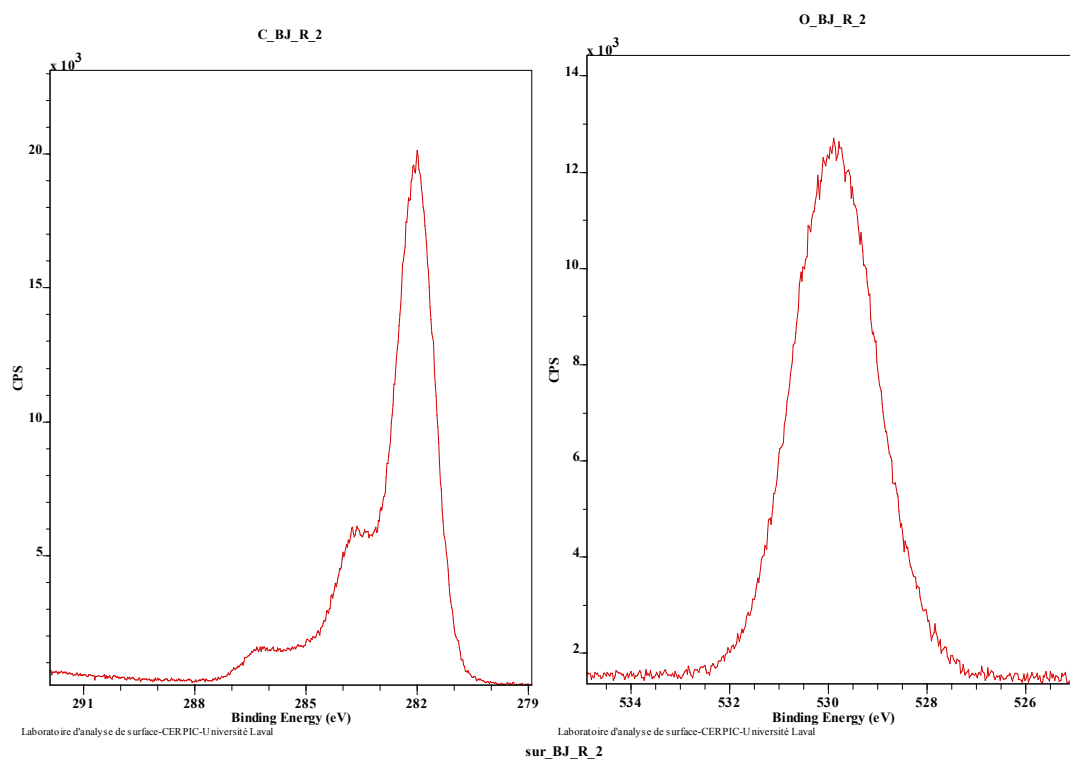


Figure 17 Spectrométrie photoélectronique par rayon-X pour le bouleau jaune de référence #2.

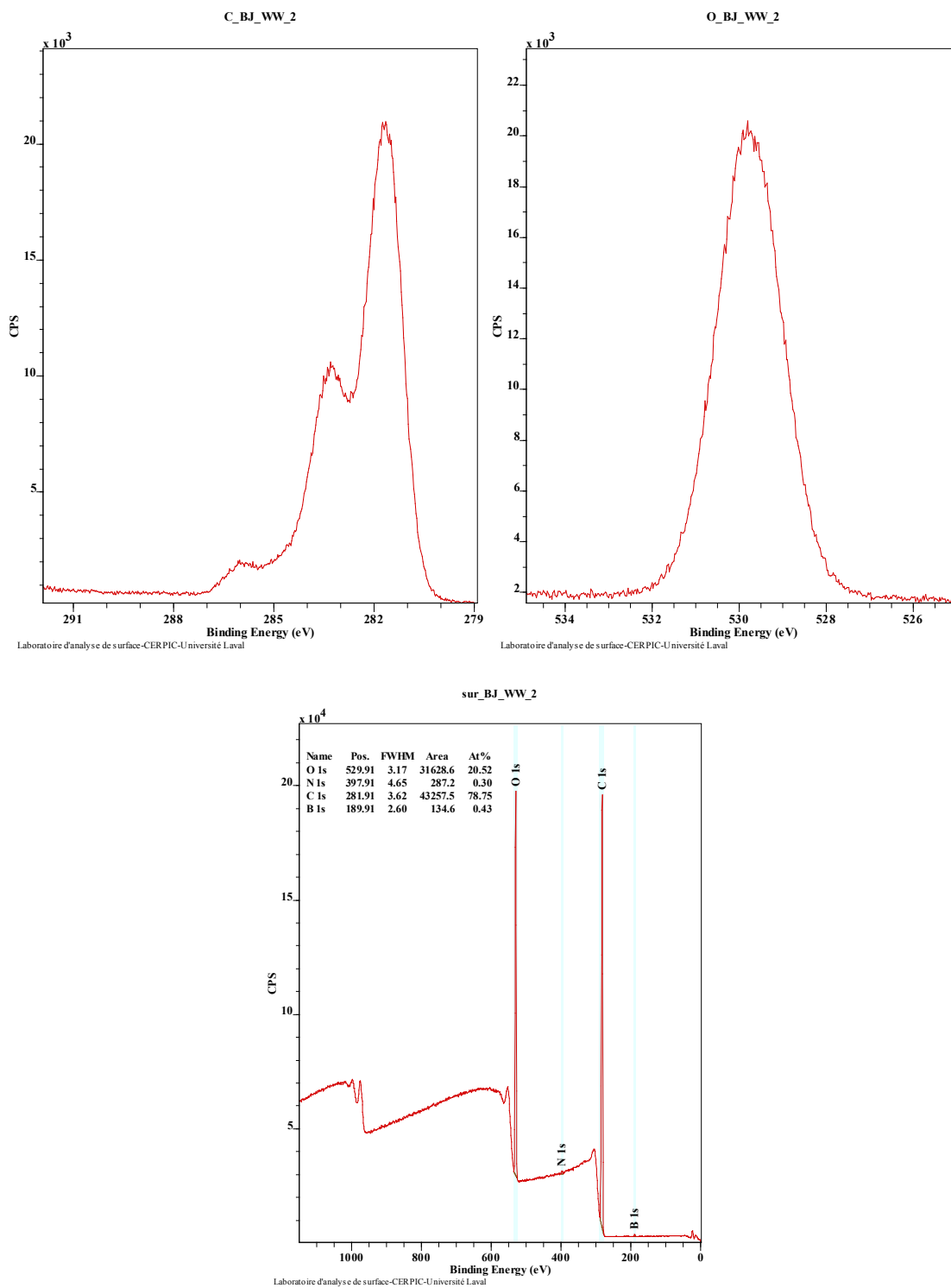


Figure 18 Spectrométrie photoélectronique par rayon-X pour le matériel soudé de bouleau jaune #2.

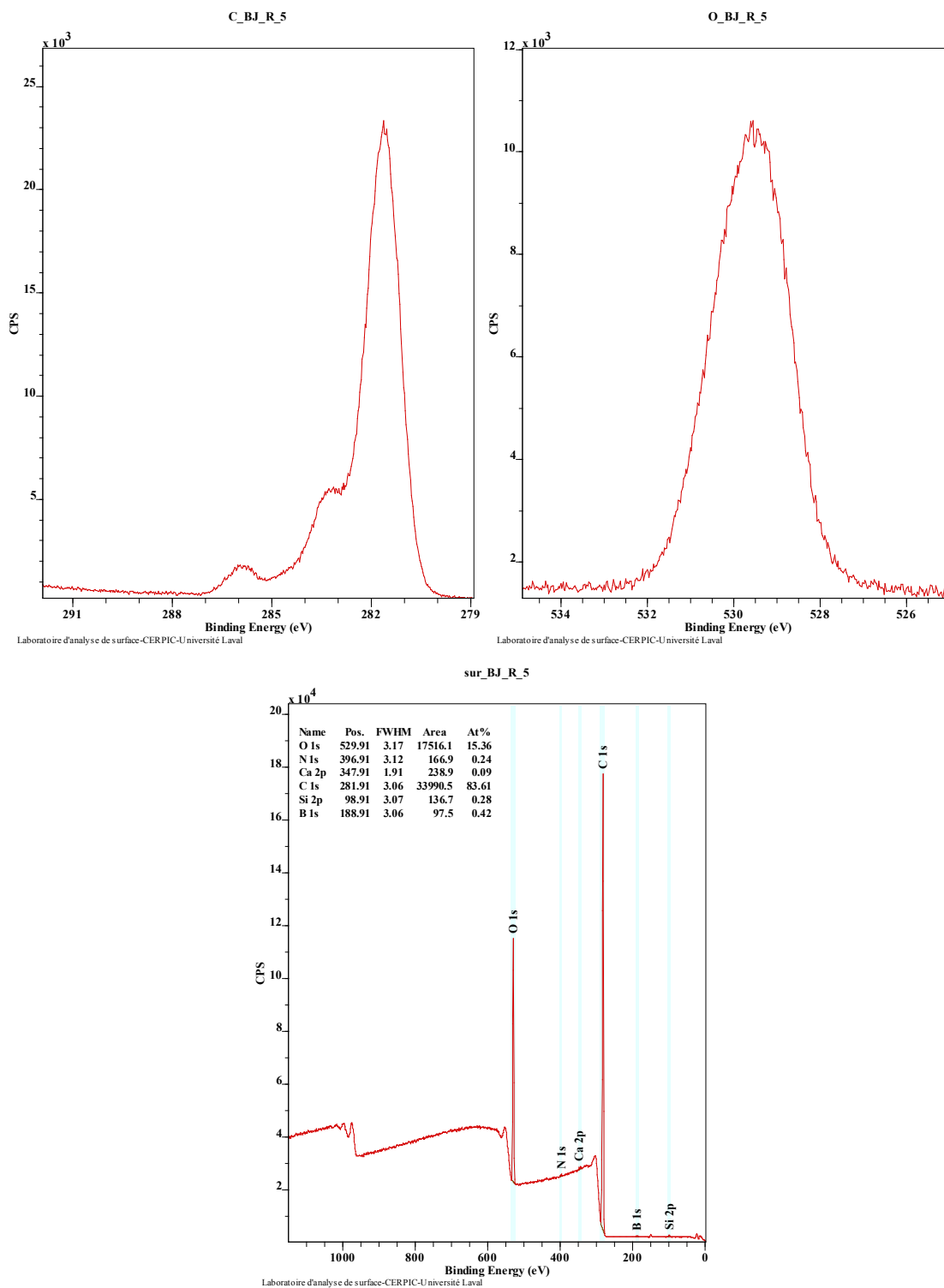


Figure 19 Spectrométrie photoélectronique par rayon-X pour le bouleau jaune de référence #3.

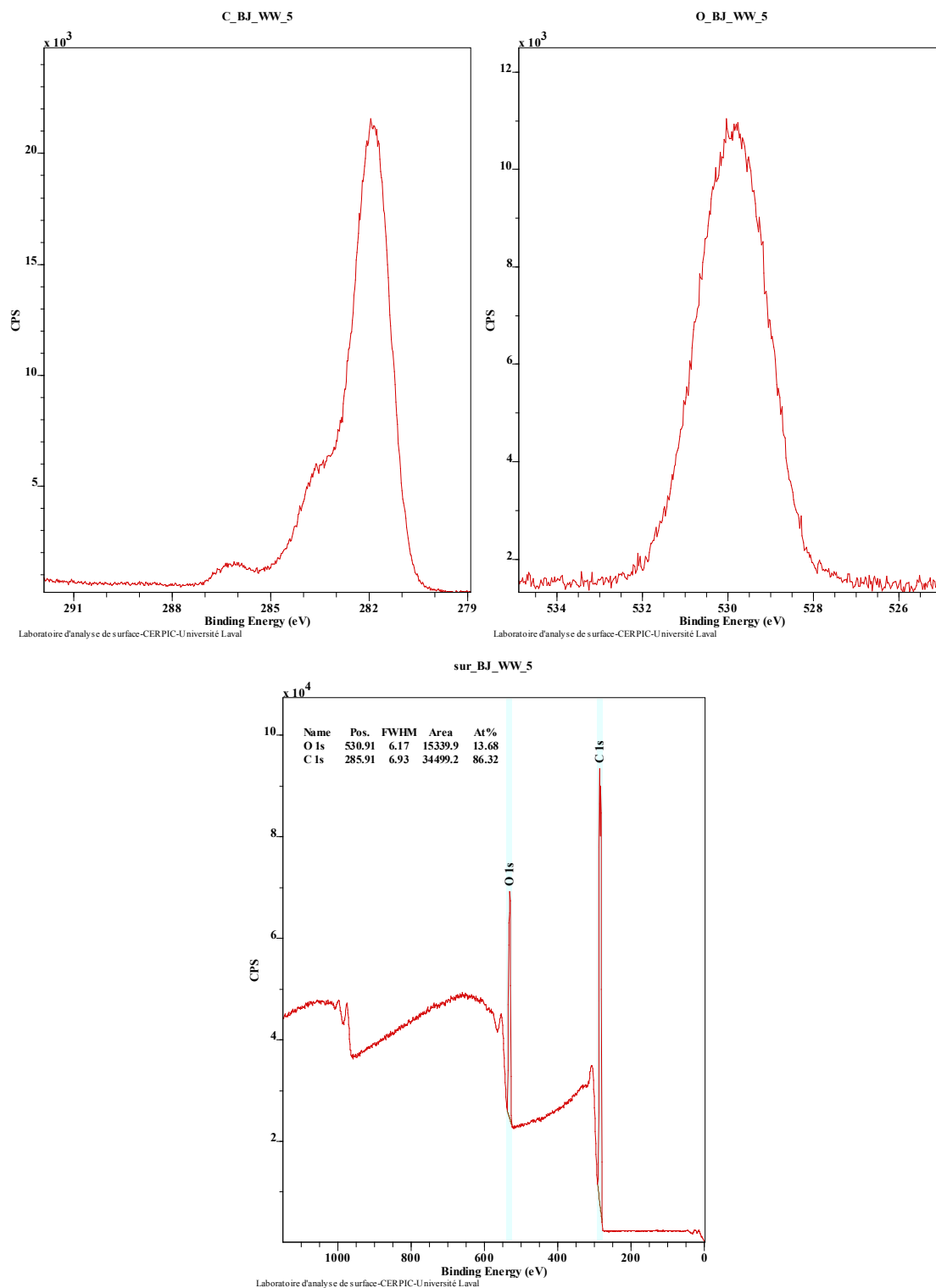


Figure 20 Spectrométrie photoélectronique par rayon-X pour le matériel soudé de bouleau jaune #3.

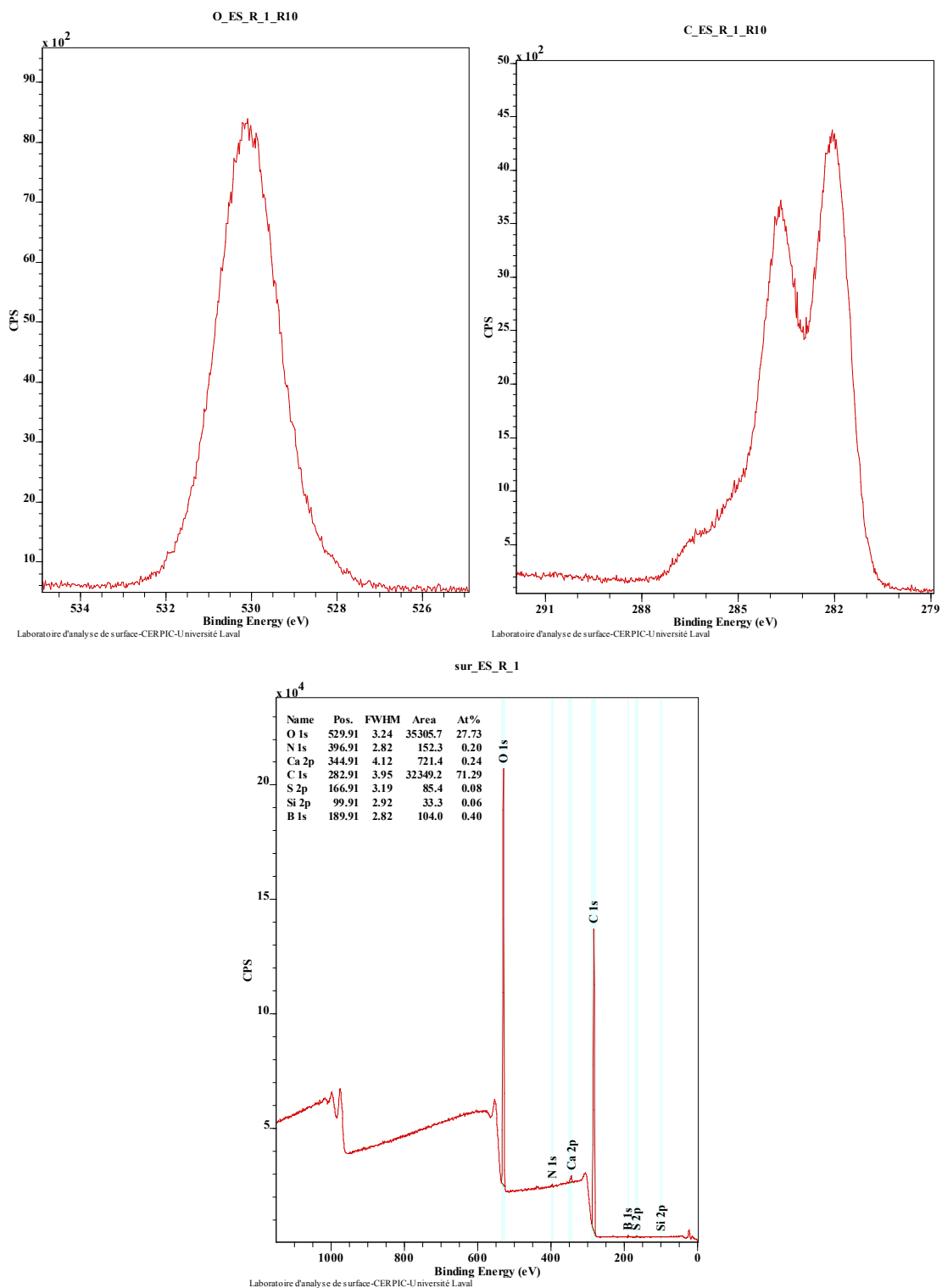


Figure 21 Spectrométrie photoélectronique par rayon-X pour l'érable à sucre de référence #1.

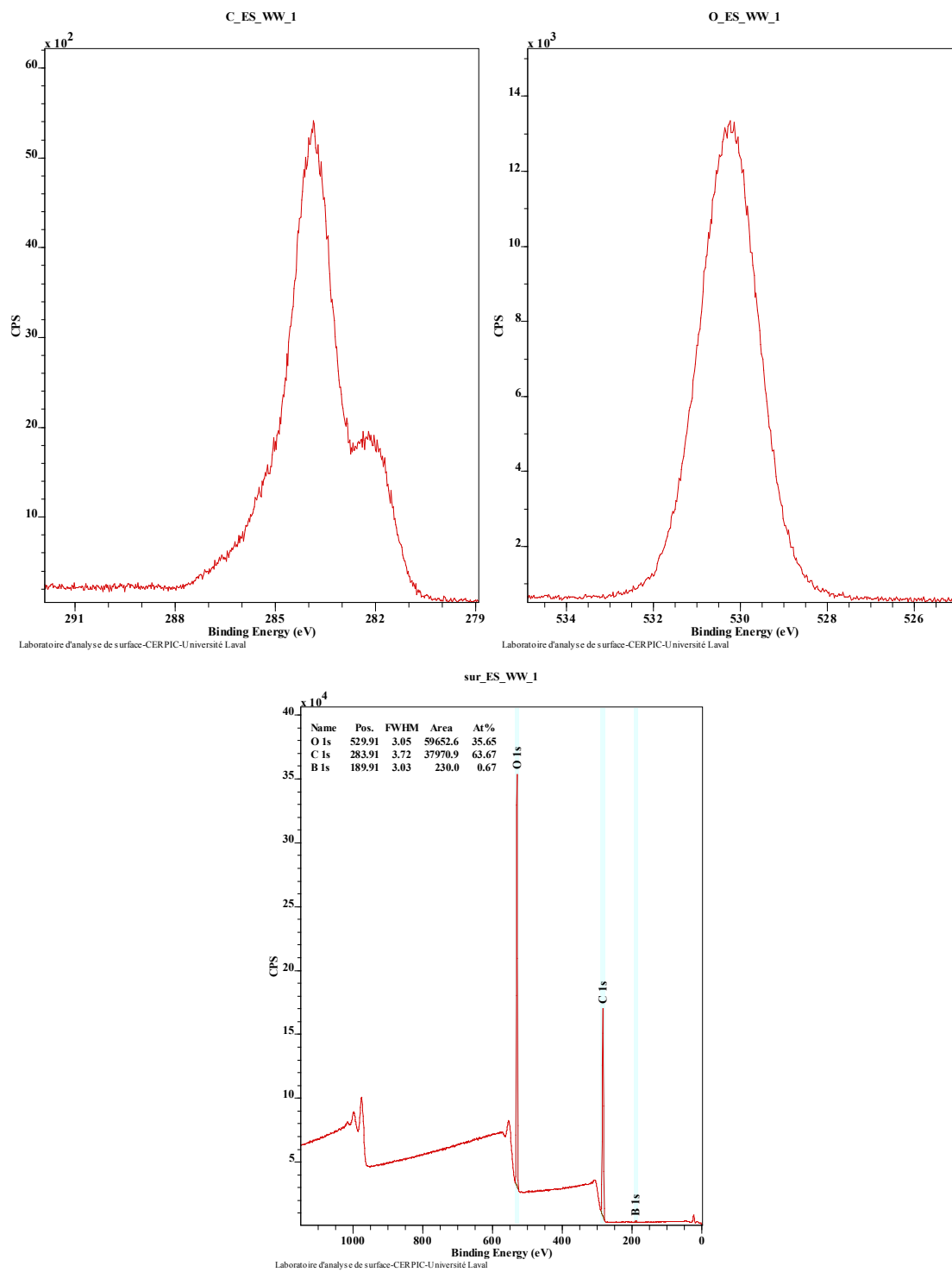


Figure 22 Spectrométrie photoélectronique par rayon-X pour le matériel soudé d'érable à sucre #1.

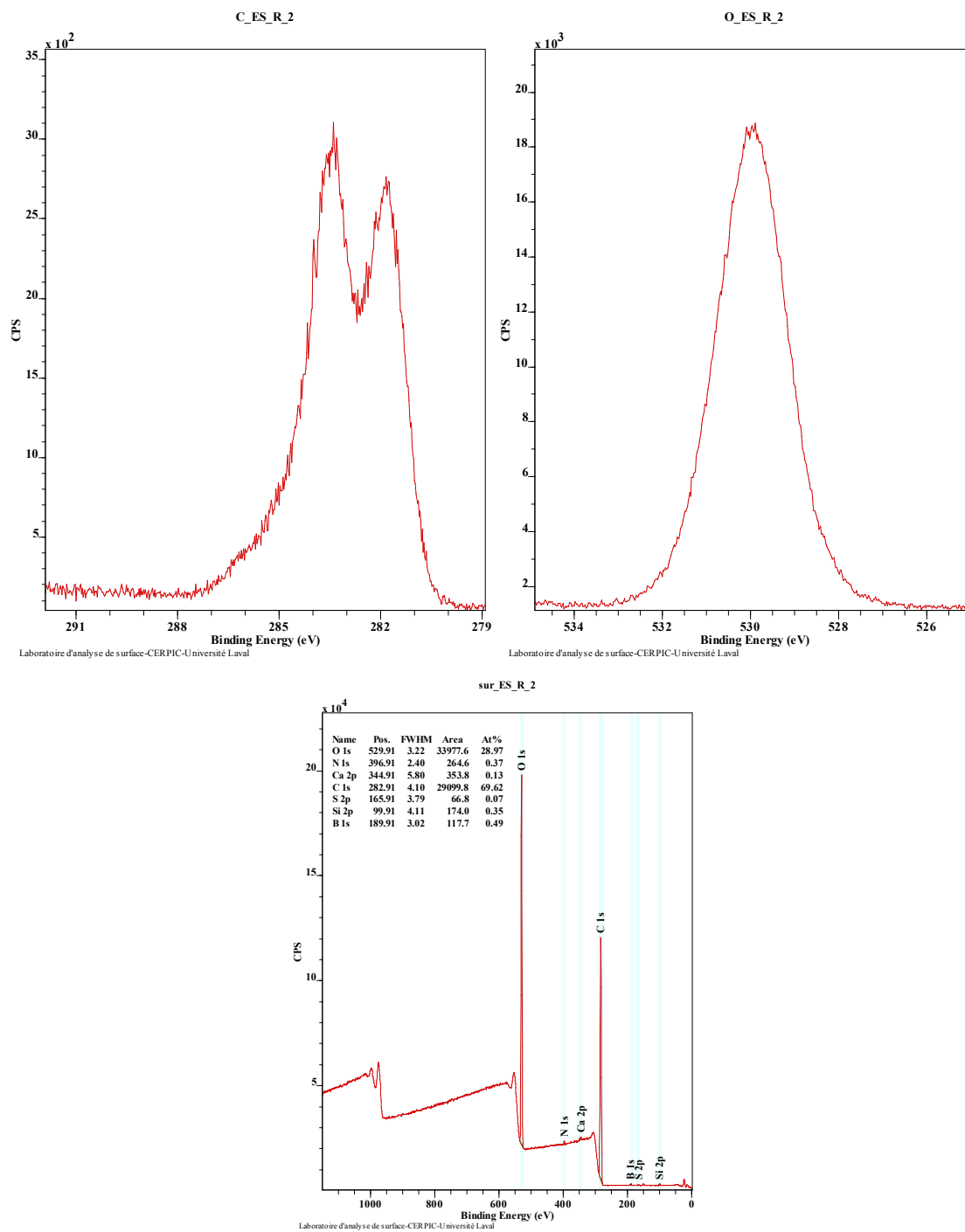


Figure 23 Spectrométrie photoélectronique par rayon-X pour l'érable à sucre de référence #2.

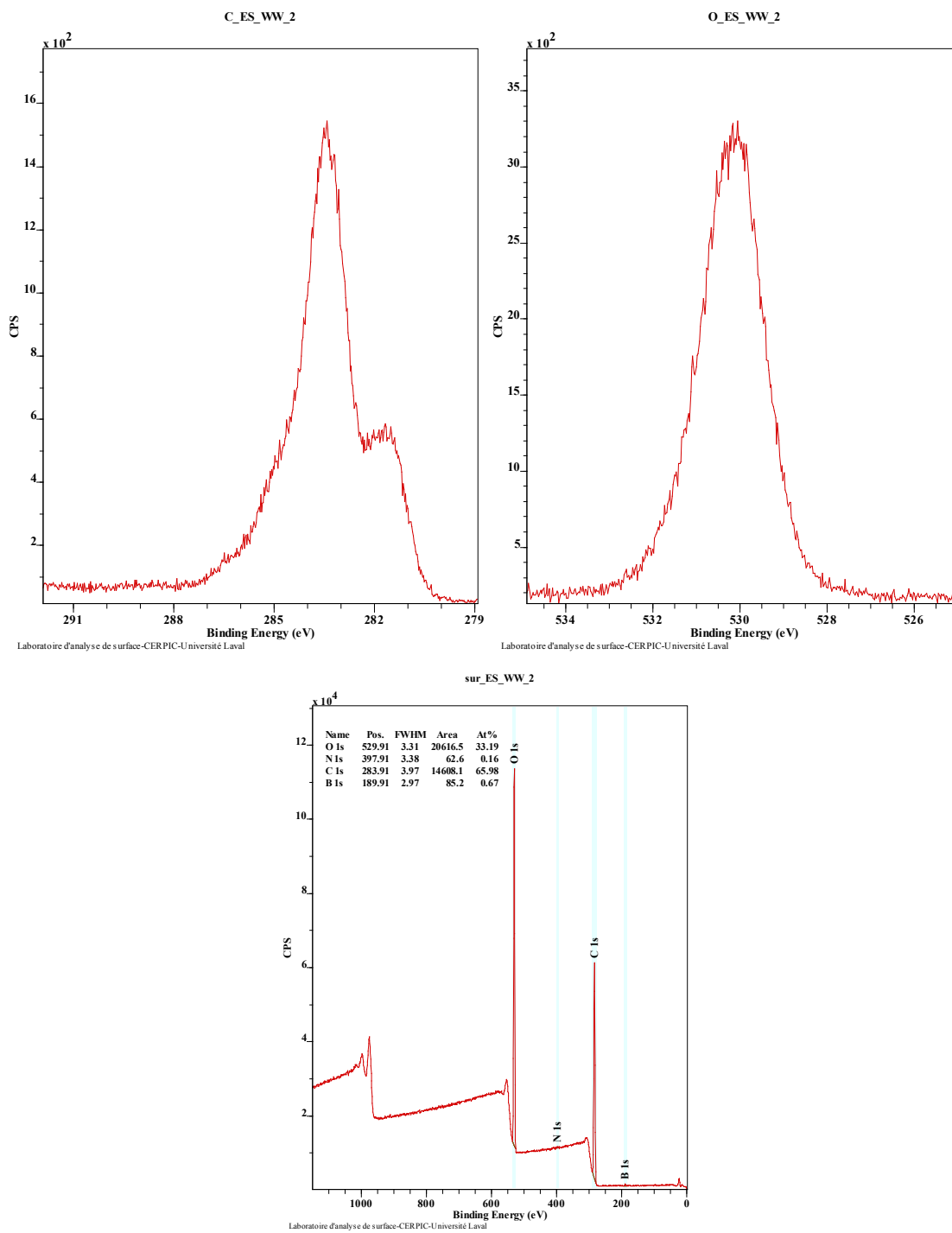


Figure 24 Spectrométrie photoélectronique par rayon-X pour le matériel soudé d'érable à sucre #2.

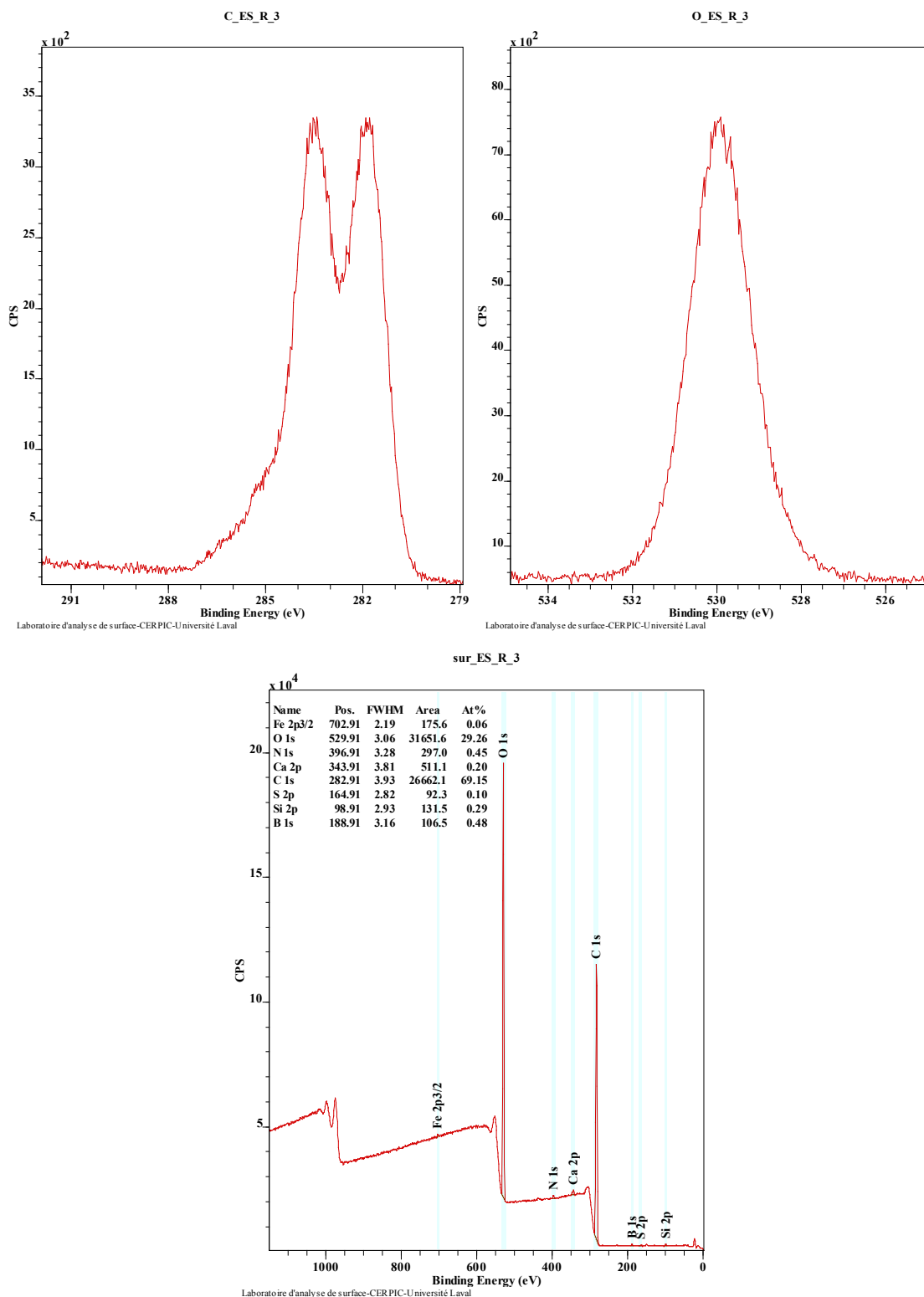


Figure 25 Spectrométrie photoélectronique par rayon-X pour l'érable à sucre de référence #3.

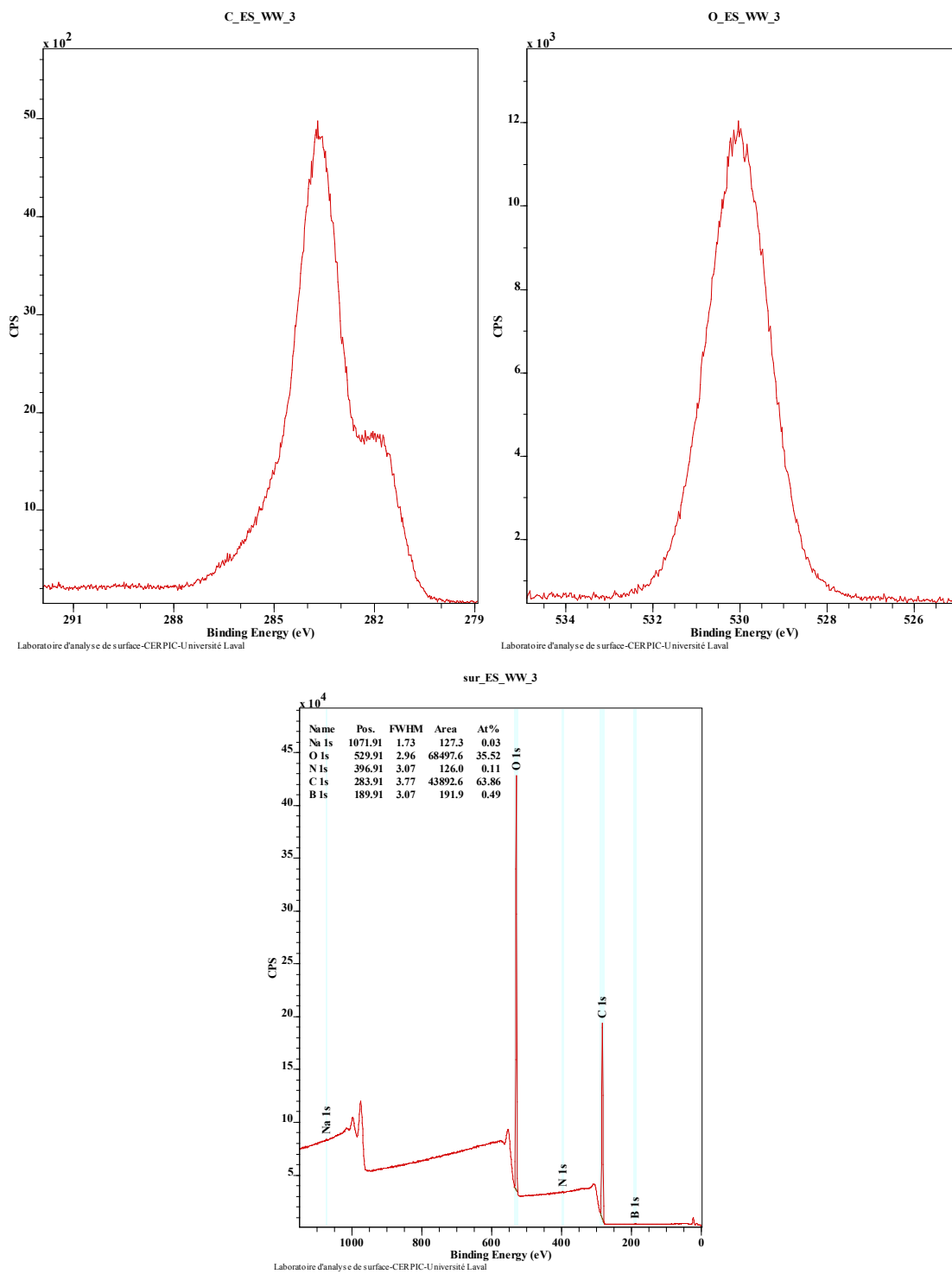


Figure 26 Spectrométrie photoélectronique par rayon-X pour le matériel soudé d'érable à sucre #3.