Soudage linéaire du bois : étude et compréhension des modifications physico-chimiques et développement d'une technologie d'assemblage innovante.

Christelle Ganne-Chédeville

▶ **To cite this version:**

Christelle Ganne-Chédeville. Soudage linéaire du bois : étude et compréhension des modifications physico-chimiques et développement d'une technologie d'assemblage innovante.. Mécanique [physics.med-ph]. Université Henri Poincaré - Nancy I, 2008. Français. NNT : . tel-00319773

HAL Id: tel-00319773

https://theses.hal.science/tel-00319773

Submitted on 9 Sep 2008

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Nancy-Université
Université Henri Poincaré

enstib
Haute école spécialisée bernoise
Architecture, bois et génie civil

Faculté des Sciences et Techniques Nancy 1
UFR STMP

Ecole doctorale RP2E

Soudage linéaire du bois : étude et compréhension des modifications physico-chimiques et développement d'une technologie d'assemblage innovante.

THÈSE

Présentée et soutenue publiquement: le 28-Mai-2008

pour l'obtention du titre de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITE HENRI POINCARE,

NANCY 1

Spécialité : Sciences du Bois

par

Christelle GANNE-CHEDÉVILLE

Directeur de thèse: Prof. Antonio PIZZI

Composition du jury

Rapporteurs:	Prof. Bernard de Jéso	Université Bordeaux 1
	Prof. Balz Gfeller	Haute école spécialisée bernoise, Bienne, Suisse
Examinateurs:	Prof. André Merlin	Université Henri Poincaré - Nancy 1
	Dr. Frédéric Pichelin	Haute école spécialisée bernoise, Bienne, Suisse
	Prof. Antonio Pizzi	Université Henri Poincaré - Nancy 1

Préface

Ce travail de thèse de l'Université de Nancy I intitulé « Soudage linéaire du bois : étude et compréhension des modifications physico-chimiques et développement d'une technologie d'assemblage innovante » a été mené d'une part dans le cadre du projet international EcoWelding et d'autre part dans le cadre de plusieurs mandats pour l'industrie du bois.

Le projet de recherche EcoWelding – A new environmentally friendly process for wood bonding, a été financé par la Haute Ecole Spécialisée Bernoise, Architecture, Bois et Génie Civil (HESB - Suisse). Ses objectifs étaient la détermination des causes impliquant la fusion du bois et par conséquent la formation du joint lors du soudage du bois en absence d'adhésif. Il avait pour objectif scientifique la compréhension des phénomènes théoriques se produisant pendant le soudage et l'optimisation des performances techniques des joints. Les résultats devaient être utilisés pour débuter des projets de développement avec des partenaires économiques. Les partenaires scientifiques de ce projet étaient l'Ecole Nationale Supérieure des Technologies et Industries du Bois (ENSTIB - France) et l'Institut National de la Recherche Agronomique (INRA - France) et le partenaire industriel Branson Ultraschall (Succursale de Emerson Technologies – Allemagne).

Les mandats de l'industrie du bois avaient pour objectif la recherche de solutions d'assemblages pour des cas où le collage n'est pas ou peu souhaité. Cela a mené au développement de nouveaux produits impliquant la technologie de soudage par vibration linéaire du bois. Ils ont débuté dans la partie finale du projet EcoWelding et se poursuivent encore aujourd'hui. Pour des raisons de propriétés intellectuelles ils ne pourront pas être cités mais ils ont contribué de façon importante au développement technologique.

Remerciements

Le document présent est le résultat de trois ans de recherche et sa réalisation n'a été possible que grâce à plusieurs personnes et institutions que je voudrais remercier.

Mes remerciements vont tout d'abord à mon directeur de thèse le Professeur Antonio Pizzi de l'ENSTIB qui par sa collaboration et sa forte motivation a permis l'existence de ce projet de thèse. Ses compétences ont constitué un atout majeur pour cette étude et je lui suis gré de la confiance et de la liberté d'action qu'il m'a accordées.

Je remercie le Dr. Frédéric Pichelin qui a co-encadré ma thèse et m'a offert l'opportunité de travailler au sein de son équipe scientifique de la HESB. J'y ai appris de nouvelles méthodes de travail dans un cadre dynamique et multilinguistique.

Je remercie le Dr. Jean-Michel Leban de l'INRA pour ses commentaires, ses conseils très avisés et sa motivation, le Dr. Gilles Duchanois de l'ENSTIB qui m'a aidé à ouvrir de nouvelles voies à ce projet, le Dr. Luc Delmotte de l'ENSCMu pour ces compétences scientifiques analytiques et le Professeur Balz Gfeller de l'HESB qui est à l'origine de toute cette histoire.

Au sein de l'équipe de HESB mes remerciements iront tout particulièrement au Dr. Milena Properzi pour son aide et ses précieux conseils. Elle a toujours été disponible pour répondre à mes questions et m'a motivée et aidée dans la publication de mes résultats. Je remercie aussi Reto Pattis, Benjamin Steiger, Ben Toosi, Alain Othenin-Girard, et les membres du département technique de la HESB pour leur aide technique au laboratoire. Je remercie généralement tous les collaborateurs et les étudiants de la HESB Architecture, Bois et Génie Civil pour leur aide et leur soutien.

Je remercie Jörg Vetter et le Dr. Stefanie Wieland de Branson Ultraschall d'avoir constamment soutenu ce projet et ses développements technologiques jusqu'à aujourd'hui ainsi que leurs équipes de monteurs toujours de bonne humeur.

Je remercie enfin ma sœur Isabelle pour avoir apporté des critiques constructives me permettant d'améliorer la lisibilité et la mise en forme ce manuscript.

Résumé

Le soudage par friction linéaire du bois permet de joindre deux pièces en bois en quelques secondes sans utiliser aucun adhésif. L'adhésion est essentiellement due à l'enchevêtrement des fibres de bois bloquées dans une matrice de matériel inter-cellulaire fondu et re-durcit. Mais le mécanisme de la formation de l'interface adhérente, l'influence des paramètres machine et de ceux du substrat sont peu connus.

L'objectif de ce travail a donc été d'analyser les différents facteurs influençant les caractéristiques du joint pour comprendre les mécanismes physiques et chimiques mis en jeu lors du processus. La mesure de la température de soudage par thermographie infrarouge a apporté de multiples informations. D'autre part les pièces de bois soudées ont été caractérisées par des observations microscopiques, mécaniques, une étude du comportement à la rupture, des analyses chimiques de l'interface et des fumées. Les résultats ont permis d'élaborer un scénario physico-chimique du développement de la microstructure interfaciale et de le vérifier. Un premier modèle numérique thermique a été élaboré pour le soudage linéaire de *Fagus sylvatica*.

La dernière partie de l'étude concerne la compréhension de l'influence du substrat. Ceci a permis d'aborder les problèmes de variabilité issus de l'essence de bois, de l'anatomie du bois ou encore de l'état de surface. Les bois modifiés et des produits dérivés du bois ont pu être soudés avec succès.

Enfin les résultats de la recherche on pu être mis en application à une échelle pré-industrielle soulevant ainsi de nouvelles problématiques scientifiques et techniques mais aussi montrant un grand potentiel d'optimisation de la technologie.

Mots-clés : adhésion, assemblage, bois, dégradation thermique, éléments finis, fusion des polymères, joints soudés, lignine, soudage du bois, thermographie infrarouge.

Wood welding by linear friction: investigations and understanding of the physical and chemical modifications and development of an innovative technology.

Abstract

Wood welding by linear friction allows bonding of timber in a few seconds without unsing any adhesive. The adhesion is essentially due to the wood fibres entanglements which are embedded in a melted and recured intercellular polymers matrix. But the bonding interphase formation mecanism and the machine parameters and wood substrate influences are not clearly understood.

Consenquetly, the goal of this study was to analyse the different factors which are influencing the joint characteristics in order to understand the physical and mecanical process mecanism. Infrared temperature measurements brought several informations on the process. On the other hand the welded joints were caracterized by microscopy, mechanical testing, fracture mechanics, interphase and smokes chemical analysis. The results were used to developp and to verify a physical and chemical scenario describing, in successiv steps, the interphase microstructure formation. A first numerical thermal model for *Fagus sylvatica* was build allowing the thermal simulation of the process.

The aim of the last part of the study is the understanding of the wood substrate influences on the process. The variablity problematics like those due to wood species, wood anatomy or surface quality were investigated. Modified wood and wood panels were successfully welded.

The research results were applied in the frame of a preindustrial development. This has reveal new scientific and technical problematics but also a great optimization capacity of this technology.

Key-words: adhesion, wood bonding, finite element, infrared thermography, lignin, polymer melting, thermal degradation, welded joint, wood welding.

Liste des productions scientifiques réalisées dans le cadre de la thèse

Articles acceptés ou soumis dans des revues à comité de lecture:

Ganne-Chédeville C., Pizzi A., Thomas A., Leban J.-M., Bocquet J.-F., Despres A. and Mansouri H. Parameter interactions, two-block welding and the wood nail concept in wood dowels welding. *J. Adhesion Sci. Technol.* 19(13-14), 1157-1174 (2005).

Ganne-Chédeville C., Leban J.M., Properzi M., Pichelin F. and Pizzi A. Temperature and density distribution in mechanical vibration wood welding. *Wood Sci. Technol.* 40(1), 72-76 (2005).

Ganne-Chédeville C., Properzi M., Pizzi A., Leban J.M. and Pichelin F. Parameters of wood welding: a study with infrared thermography. *Holzforschung* 60, 434-438 (2006).

Boonstra M., Pizzi A., **Ganne-Chédeville C.**, Properzi M., Leban J.M. and Pichelin F. Vibration welding of heat-trated wood, *J. Adhesion Sci. Technol.* 20, 359-369 (2006).

Ganne-Chédeville C., Properzi M., Pizzi A., Leban J.M. and Pichelin F. Edge and face linear vibration welding of wood panels. *Holz als Roh- und Werkstoff* 65, 83-85 (2007).

Delmotte L., **Ganne-Chédeville C.**, Leban J.M., Pizzi A. and Pichelin F. CP Mas 13C NMR and FTIR investigation of the degradation reactions of polymer constituents in wood welding, *Polymer Degradation and Stability* 93, 406-412 (2008).

Ganne-Chédeville C., Duchanois G., Pizzi A., Pichelin F., Properzi M. and Leban J.-M. Wood welded connections: energy release rate measurement, *J. Adhesion Sci. Technol.* 22, 169-179 (2008).

Ganne-Chédeville C., Properzi M., Leban J.-M., Pizzi A., and Pichelin F. Wood welding: chemical and physical changes according to welding time, *J. Adhesion Sci. Technol.,* in press.

Ganne-Chédeville C., Duchanois G., Pizzi A., Leban J.-M. and Pichelin F. Predicting the thermal behaviour of wood during linear welding using the finite element method, *J. Adhesion Sci. Technol.*, in press.

Communications:

Ganne-Chédeville C., Properzi M., Pizzi A., Leban J.M., Pichelin F. Parameters of wood welding: a study with infrared thermography, *Ecowood 2006 – 2nd International Conference on Environmentally-Compatible forest products,* September 20-22, Oporto, Portugal (2006).

Ganne-Chédeville C., Properzi M., Leban J.-M., Pizzi A., and Pichelin F. Interface microstructure development during wood welding, *COST Action E34: Final Workshop on Bonding of Timber,* May 6-7, Sopron, Hungary (2008).

Ganne-Chédeville C., Duchanois G., Pizzi A., Pichelin F., Properzi M. and Leban J.-M. Evaluation of the fracture toughness of wood welded connections: measurement of the energy release rate by the method of experimental compliance, *10th World Conference on Timber Engineering*, June 2-5, Miyazaki, Japan (2008).

SOMMAIRE

1. INTRODUCTION ____ **11**

2. CONTEXTE, OBJECTIFS ET STRUCTURE DE LA THESE ____ **14**

3. ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE ____ **18**

4. MATERIEL ET METHODES ____ **54**

5. RESULTATS ET DISCUSSION ____ **76**

6. CONCLUSIONS GENERALES ET PERSPECTIVES ____ **198**

7. INDEX ____ **206**

8. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES ____ **215**

9. ANNEXES ____ **226**

SOMMAIRE

1. INTRODUCTION 11

2. CONTEXTE, OBJECTIFS ET STRUCTURE DE LA THESE 14

3. ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE 18

3.1. Matériau bois 18
3.1.1. Anatomie 19
3.1.1.1. Le cambium et son fonctionnement 19
3.1.1.2. Résineux et feuillus 20
3.1.1.3. Les parois cellulaires 21
3.1.2. Composition chimique du bois 22
3.1.2.1. La cellulose 22
3.1.2.2. Les hémicelluloses 23
3.1.2.3. La lignine 24
3.1.2.4. Les extractibles 26
3.1.3. Réactivité des constituants du bois 27
3.1.4. Dégradation thermique du bois 28
3.1.4.1. Température de transition vitreuse des composants du bois 30
3.1.4.2. Changements chimiques 31
3.2. Assemblage par collage du bois 34
3.2.1. Théories de l'adhésion 35
3.2.2. Evaluation des caractéristiques mécaniques des assemblages bois collés 36
3.2.2.1. Méthodes d'évaluation des caractéristiques mécaniques des assemblages bois collés 36
3.2.2.2. Mécanique de la rupture appliquée aux joints collés de bois 37
3.3. Technologies de soudage 40
3.3.1. Classification 40
3.3.2. Soudage par friction linéaire des plastiques 41
3.3.2.1. Lois et principes 42
3.3.2.2. Cycles de soudage 42
3.3.2.3. Facteurs influençants la qualité du joint 44
3.3.2.4. Appareillage de soudage par friction linéaire 45
3.3.3. Soudage du bois 46
3.3.3.1. Historique du soudage du bois 46
3.3.3.2. Soudage par friction linéaire du bois 47
3.4. Thermographie infrarouge 49
3.5. Méthode des éléments finis dans le cadre de la modélisation du soudage 50
3.5.1. Modélisations et simulations des procédés de soudage 50
3.5.2. Modélisations aux éléments finis appliqués au bois 51

4. MATERIEL ET METHODES **54**

4.1. Eprouvettes d'essais ... 54
4.1.1. Matériaux ... 54
4.1.2. Géométrie ... 54
4.1.3. Traitements thermiques du bois ... 56
4.2. Soudage linéaire ... 57
4.2.1. Machines de soudage linéaire ... 57
4.2.2. Paramètres de soudage ... 57
4.3. Méthodes et matériel d'analyse des liaisons soudées ... 58
4.3.1. Thermographie infrarouge ... 59
4.3.1.1. Mesures de température pendant le procédé de soudage ... 59
4.3.1.2. Mesure de température interne ... 63
4.3.2. Microscopie optique en lumière réfléchie ... 65
4.3.3. Microscopie électronique à balayage ... 66
4.3.4. Microdensitométrie aux rayons X ... 66
4.3.5. Tests mécaniques ... 67
4.3.5.1. Cisaillement ... 67
4.3.5.2. Traction ... 67
4.3.5.3. Essais cycliques en flexion quatre points ... 68
4.3.5.4. Double cantilever Beam (DCB) ... 69
4.3.5.5. Tests de résistance à l'eau ... 71
4.3.6. Analyses chimiques ... 72
4.3.6.1. Analyse des fumées ... 72
4.3.6.2. Spectroscopie infrarouge à Transformée de Fourier (FTIR) ... 74
4.3.6.3. Résonance Magnétique Nucléaire du solide (RMN) ... 74

5. RESULTATS ET DISCUSSION **76**

5.1. Analyse de la température lors du soudage ... 76
5.1.1. Température de surface ... 77
5.1.1.1. Résultats ... 77
5.1.2. Température interne ... 81
5.2. Etude des propriétés physiques des assemblages bois soudés ... 84
5.2.1. Aspect macroscopique des joints soudés ... 84
5.2.2. Observations microscopiques des joints soudés ... 85
5.2.2.1. Observations de la zone de soudage pour des directions de fil différentes ... 87
5.2.2.2. Observations au-delà de la zone de soudage pour les trois directions de fil ... 89
5.2.2.3. Observation des extrémités des échantillons soudés ... 93
5.2.3. Mesure du taux de restitution d'énergie du couple de pièces soudées par la méthode de la complaisance expérimentale ... 95
5.2.4. Stabilité à l'eau des joints soudés ... 100
5.2.5. Perte de matière lors du soudage ... 102

5.2.5.1. Perte de matière et volume de gaz formé 102
5.2.5.2. Evolution de la perte de matière en fonction de t_s et de p_s 104
5.2.6. Composition chimique des fumées 106
5.3. Compréhension de l'évolution des caractéristiques physiques, anatomiques et chimiques des assemblages soudés en fonction du temps de soudage 111
5.3.1. Evolution des caractéristiques physiques en parallèle à l'évolution de la température 111
5.3.2. Evolution des caractéristiques chimiques en fonction du temps de soudage 121
5.3.2.1. Résultats de la spectroscopie FT-IR 122
5.3.2.2. Résultats de la spectroscopie CP-MAS ^{13}C RMN 126
5.3.2.3. Discussion 130
5.3.3. Résumé sur le développement de la microstructure interfaciale 133
5.4. Simulation du comportement thermique du bois pendant le soudage 134
5.4.1. Modèle pour la simulation dans le code aux éléments finis CAST3M 134
5.4.2. Résultats 137
5.4.2.1. Programme de simulation 137
5.4.2.2. Evaluation du modèle développé 137
5.4.2.3. Influence de la convection 140
5.4.2.4. Erreur de la mesure infrarouge 140
5.4.2.5. Simulation avec différents temps de soudage 140
5.4.2.6. Analyse du flux de chaleur calculé 141
5.4.2.7. Simulation du soudage sur des pièces larges 142
5.4.3. Conclusion sur la simulation numérique 143
5.5. Influence des caractéristiques du substrat bois à souder 144
5.5.1. Influence de l'orientation anatomique du bois 144
5.5.1.1. Bois de fil 144
5.5.1.2. Bois de bout 146
5.5.2. Influence de la qualité de la surface 147
5.5.3. Etude sur différentes essences de bois 151
5.5.4. Etude sur les bois modifiés 153
5.5.4.1. Bois traités thermiquement 153
5.5.4.2. Bois traités chimiquement 159
5.5.5. Etude sur les panneaux dérivés du bois 164
5.5.5.1. Panneaux de particules (PP) 165
5.5.5.2. OSB 166
5.5.5.3. MDF 166
5.5.5.4. Contreplaqué Hêtre/Peuplier 167
5.5.5.5. Contreplaqué Okoumé 168
5.5.5.6. Densitométrie à rayons X 169
5.5.6. Conclusions sur l'influence du substrat à souder 171
5.6. Développements technologiques (partie confidentielle) 173

6. CONCLUSIONS GENERALES ET PERSPECTIVES **198**

7. INDEX **206**

7.1. Liste des illustrations 206
7.2. Liste des tableaux 211

8. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES **215**

9. ANNEXES **226**

9.1. Machine de soudage Branson M-DT24L 226
9.2. Programme sous Cast3M pour la simulation thermique du soudage 227
9.3. Paramètres de soudage 230
9.4. Détails du calcul des coûts de l'analyse économique 232
9.5. Dessin CAD du positionnement de l'outil de soudage pour les blocs de lamellé-soudés 234

1. Introduction

Aujourd'hui la nécessité de développer de nouvelles technologies où des matériaux renouvelables sont directement utilisés en remplacement de matériaux non renouvelables est évidente. Notre consommation de matériaux non renouvelable est élevée et, pour de nombreux pays elle augmente même. Sa principale cause est l'accroissement naturel de la population mondiale. Il s'agit là du problème du 21ème siècle où de nouvelles solutions commencent à apparaître. La notion de développement durable y trouve toute sa signification dans le sens qu'elle favorise l'utilisation de ressources renouvelables, disponibles en quantité suffisante pour répondre aux besoins diverses d'une société dans le présent et le futur. Ce concept inclut des facteurs sociaux, économiques et environnementaux qui doivent tous trois être pris en compte car ils sont déterminants de la disponibilité absolue de la ressource.

Le bois et un matériau renouvelable, recyclable et biodégradable. Mais ce qui fait de lui l'un des meilleurs matériaux favorable à l'environnement est sa capacité à stocker le dioxyde de carbone de l'air, considéré comme l'un des principaux gaz à effet de serre. Le bois a été le matériau le plus utilisé dans la construction d'habitâts de nombreuses civilisations anciennes. Il présente en effet d'excellentes performances mécaniques et des spécificités uniques. Il est résistant aux chocs, cintrable, léger, stable et durable tel que le témoigne la présence de temples asiatiques construits en bois et ayant résistés à plus de 13 siècles. Depuis quelques années et dans le cadre de la nécessité d'utilisation de matériaux renouvelable son utilisation explose littéralement notamment dans le domaine de la construction. Ceci a pour conséquence directe l'expansion des travaux de recherche et des diverses études sur ce matériaux aux si nombreuses facettes. Il s'agit cependant d'un matériau biologique complexe que ce soit par sa consitution chimique ou son comportement physique.

Le sujet d'étude de cette thèse porte sur une nouvelle technologie d'assemblage du bois par soudage par vibration linéaire. La friction rapide de deux pièces de bois l'une contre l'autre soumisent à une pression suivie d'un court temps de maintien provoque l'adhésion des deux pièces de bois. Cette découverte, qui a consisté lors des premiers essais à remplacer un matériau plastique ou métallique par le bois, se base sur le fait que la lignine du bois est une substance thermoplastique. Le matériau bois pourrait donc avoir un comportement similaire à un thermoplaste et provoquer l'adhésion des deux pièces de bois si il est impliqué dans un processus de soudage. Cette hypothèse a été vérifiée par des essais. Mais les raisons réelles de l'adhésion n'étaient pas encore expliquées. Des analyses préliminaires qui ont été menées ont soulevé un fort intérêt dans la filière bois.

L’un des résultats fondamentaux des études préliminaires menées est que l’invention géniale n’a pas toujours fonctionné ou alors fonctionné de façon différente. Les chercheurs ont pu donner des pistes sur les raisons probables de l’adhésion des deux pièces de bois mais ils ont aussi été confrontés aux problèmes d’une forte variabilité des résultats. Des études pour expliquer cette variabilité ont donc été proposées en s’appuyant sur les sources de variabilité du matériau les plus connues : différentes essences et différentes orientations anatomiques. Cependant les études n’ont pas abordé la compréhension de la formation du joint durant le soudage. Celle-ci pourrait répondre à de nombreuses questions concernant l’adhésion des pièces de bois ainsi que la variabilité constatée de cette adhésion. La résolution de ces problèmes permettrait le transfert de cette technologie vers une utilisation dans une production à grande échelle.

L’intérêt pour cette nouvelle technologie d’assemblage est très haut tel qu’en témoignent les nombreux contacts qui se sont développés entre le groupe de recherche international sur le soudage par friction du bois (HESB, ENSTIB et INRA) et l’industrie. Elle apparaît comme une alternative effective à l’utilisation des adhésifs synthétiques pour l’assemblage du bois. Elle séduit notamment par ses aspects techniques: rapidité de réalisation, pas de temps de séchage, alignement précis des pièces ; économiques: pas d’utilisation d’adhésif, pas de nécessité de systèmes d’application et pas de nécessité d’un espace de stockage des adhésifs; et environnementaux: utilisation uniquement d’un matériau renouvelable, pas d’utilisation de solvants, produit final entièrement recyclable.

2.Contexte, objectifs et structure de la thèse

Ce travail de thèse a eu lieu dans le contexte d'une l'innovation. L'innovation est un terme très large qui est synonyme de nouveauté. Elle implique l'apparition d'un nouveau produit ou d'un nouveau type d'usage qui est généré par une entreprise, elle aussi souvent nouvelle. Les innovations se produisent généralement en trois étapes. La première étape est l'invention ou la découverte, elle est la base de l'innovation. Suit une phase de construction d'un modèle de processus, de progrès, de compréhension et d'amélioration. La dernière phase est celle du lancement, c'est généralement dans cette phase que l'innovation prend toute sa valeur, où elle va être produite à grande échelle et apportera un avantage notable vis-à-vis des produits ou technologies existantes. Les travaux de recherche et d'étude scientifique telle que c'est le cas dans cette thèse, se placent généralement au début de la deuxième phase. Ils permettent d'acquérir des connaissances fondamentales, d'explorer des champs d'application nouveaux et d'apporter des solutions sous forme de progrès manquants à la découverte. La deuxième phase est donc la phase fondamentale qui permet d'apporter la durabilité et la solidité à l'innovation et qui permet de faire d'elle un succès ou de la stopper à temps afin qu'elle ne devienne pas un échec.

Une innovation peut se définir selon l'impact qu'elle a ou qu'elle aura sur le marché existant. Le soudage par vibration linéaire du bois peut-être ainsi considéré comme une « innovation perturbatrice » vis-à-vis des technologies de collage du bois. La technologie « perturbatrice » est initialement sous-performante par rapport aux besoins du marché principal, mais ses progrès la conduisent finalement à y répondre, tandis que la technologie dominante devient sous-performante (Christensen 1997).

Cette technogie est donc toute nouvelle dans un contexte plutôt ancien et bien ancré qui est celui de l'assemblage du bois par collage. Bien que le bois ait de nombreuses propriétés avantageuses, la dimension du matériau est limitée à celle de l'arbre. Pour produire des éléments larges en bois, pour la construction ou la menuiserie, il est necessaire d'assembler des pièces de bois afin d'obtenir des éléments plus grands et ceci grâce à des adhésifs. Les joints de colles synthétiques ont cependant malgré leurs très bonnes performances mécaniques l'inconvénient de nécessiter un temps de séchage long, un système d'application de l'adhésif, et ont un bilan environnemental généralement peu satisfaisant. Le dernier inconvénient, qui n'est pas l'un des moindres, est souvent la présence de dégagement de composés organiques volatiles toxiques, particulièrement de formaldéhyde, lors de l'application et de la mise en oeuvre de ces adhésifs. La technologie de soudage se présente donc comme une bonne alternative à l'utilisation des adhésifs synthétiques.

L'objectif scientifique de ce travail de thèse est d'acquérir des connaissances fondamentales sur la technologie de soudage par vibration linéaire appliquée au bois. La conduite d'analyse

de température de soudage, d'études de la déformation de l'anatomie du bois, d'analyses chimiques de la liaison soudée et d'analyse du comportement mécanique du joint sont les principaux objectifs. Le travail portera aussi sur la mise en place de méthodes permettant ces analyses. Le rassemblement de ces informations permettant dans le futur de construire un modèle pour la simulation du processus fait également partie des objectifs de la thèse. Cette thèse a aussi pour objectif technique l'accompagnement du transfert de cette technologie vers l'industrie.

Le travail scientifique s'inscrit dans la continuité des travaux préliminaires réalisés entre 2003 et 2005 par les équipes de recherches de la HESB, de l'INRA et de l'ENSTIB qui ont travaillé sur l'origine de l'adhésion dans le soudage du bois. L'ensemble des travaux préliminaires a soulevé des interrogations qui seront traitées dans ce travail de thèse.

La première partie (paragraphe 3) est consacrée à une revue bibliographique. Bien que la technologie de soudage par frictrion linéaire touche un grand nombre de domaines scientifiques, cette revue de littérature s'appuye sur les sujets de premier ordre nécessaires à la compréhension du processus. Une présentation des caractéristiques du matériau est faite suivie d'une description détaillée de sa chimie. Des informations concernant les impacts physiques et chimiques de la température sur le bois sont apportées. Ensuite le lecteur pourra trouver les informations nécessaires à la compréhension des différents modes d'adhésion et de leur caractérisation, ainsi qu'une explication des travaux existant sur la mécanique de la rupture des liaisons bois collées. Une revue détaillée sur le procédé de soudage par vibration linéaire des matériaux thermoplastiques est exposée. Elle est suivie de la description des différents travaux sur le soudage du bois effectués jusqu'alors et sur lesquels ce travail de thèse s'appuie. Enfin une revue de littérature portant sur la thermographie infrarouge, méthode non destructive du contrôle de la température, ainsi qu'une revue de littérature sur les modélisations des différents types de soudage et la modélisation du matériau bois aux éléments finis sont proposées.

La deuxième partie (paragraphe 4) décrit les matériaux, machines et méthodes utilisées pour les différentes mesures et analyses ainsi que la fabrication des échantillons de tests.

Enfin les résultats obtenus au cours de la thèse sont présentés et discutés dans le paragraphe 5. Les caractéristiques du soudage principalement étudiées sont la température de soudage, les modifications anatomiques, la densification du bois et le comportement mécanique des liaisons soudées. Les informations collectées dans les paragraphes 5.1 et 5.2 ainsi que les méthodes mises en place permettront d'observer l'évolution de l'ensemble des caractéristiques de la liaison soudée en fonction du temps de soudage. L'objectif est, à partir de ces observations, de décrire un scénario physico-chimique du développement de la microstructure interfaciale adhérente. Des analyses chimiques (FT-IR et RMN ^{13}C) de

l'interface soudée pour des temps de soudage successifs permettront de confirmer le scénario (paragraphe 5.3). En progressant dans la connaissance du phénomène de soudage il sera alors possible de procéder à une première simulation numérique du processus par la méthode des éléments finis (5.4). En dernier lieu, le problème de la variabilité des résultats est abordé par le biais de nombreuses analyses concernant l'influence du substrat à souder (paragraphe 5.5). Ceci permet de mieux comprendre les phénomènes qui se produisent durant le soudage et de définir les applications possibles et les limites de la technologie de soudage par vibration linéaire.

La dernière partie (paragraphe 5.6) est consacrée aux développements technologiques des produits soudés et des machines de soudage qui se sont déroulés parallèlement à la recherche. Ils ont permis de soulever de nouvelles problèmatiques scientifiques fondamentales qui ne seraient pas apparues sinon et ainsi de mieux appréhender les futures applications industrielles du procédé.

Les résultats qui découlent de ce travail ont pour objectif de révéler les champs disciplinaires essentiels du soudage par vibration linéaire du bois ainsi que ses principales problèmatiques et limites d'application. Ils peuvent être utilisés pour de nouvelles investigations concernant notamment la modélisation complète du processus et son optimisation. Ils doivent aussi constituer une ressource précise pour les chercheurs et industriels qui travaillent actuellement au développement de cette technologie innovante.

3.Etude bibliographique

Le soudage par friction linéaire du bois est une technologie interdisciplinaire nécessitant la connaissance du substrat, de la technologie de soudage, de la modification thermique du substrat, de la caractéristation des assemblages et de nombreuses méthodes analytiques des domaines de la mécanique, de la physique et de la chimie. L'étude bibliographique suivante rassemble les informations nécessaires à la compréhension du soudage linéaire du bois. Elle insiste notamment sur les domaines d'intérêt scientifiques de premier ordre par rapport à l'étude.

On donnera dans un premier temps les notions essentielles des propriétés anatomiques et chimiques du matériau bois. On observera ensuite de façon précise les différents travaux qui ont été effectués sur la décomposition thermique des consituants du bois et leur conséquences sur les propriétés physiques et sur l'anatomie du bois. Cette innovation présentant une intéressante alternative comme mode d'assemblage vis-à-vis des assemblages collés, les différents domaines touchant à l'adhésion et notamment à sa caractérisation seront présentés. Un état de la recherche sur les technologies de soudage et plus précisément soudage linéaire par friction des matières plastiques sera proposé. Les principaux travaux de recherche qui ont permis l'initiation de ce travail de thèse et dont les résultats ont permis de définir sa problématique scientifique seront exposés. Enfin un bilan des expériences d'utilisation de la thermographie infrarouge comme méthode de mesure sans contact de la température ainsi qu'une revue sur les travaux de modélisation aux éléments finis du bois seront proposés.

3.1.Matériau bois

Le bois est une structure biologique complexe contenant des substances chimiques et des cellules exerçants différentes fonctions permettant la vie de la plante. Ces fonctions sont celles de la conduction de la sève des racines aux feuilles, le soutient mécanique de la plante et le stockage de substances biochimiques de diverses fonctions. Le besoin de ces fonctions a conduit, au cours de l'évolution, au développement de plus de 20'000 espèces de plantes produisants du bois (Rowell 2005). Chacune ayant des propriétés différentes et par conséquent des utilisations et des capacités différentes. La compréhension de la relation entre ces différentes fonctions et la structure du bois peut permet de déterminer l'utilité de chaque essence dans un nouveau contexte d'application bien défini. La connaissance de l'anatomie du bois permet d'expliquer et de comprendre les différentes propriétés physiques du bois et doit être couplée à la connaissance de sa chimie.

3.1.1.Anatomie

Le bois est un ensemble de tissus d'origine secondaire dont les parois des cellules sont lignifiées. Celles-ci résultent du fonctionnement vers l'intérieur de l'assise génératrice cambiale libéro-ligneuse. Pour connaître la struture anatomique du bois, on l'observe sur trois coupes réalisées dans trois plans perpendiculaires : coupe transversale perpendiculaire à l'axe de la tige, coupe radiale dans un plan passant par la moelle et coupe tangentielle dans un plan excentré et parallèle à l'axe de la tige. Ces trois directions (transversale, tangentielle et radiale) sont les directions d'anisotropie du bois pour un grand nombre de ses propriétés physiques, mécaniques et technologiques (Figure 1).

3.1.1.1.Le cambium et son fonctionnement

Le cambium vasculaire (assise génératrice) permet, grâce à ses cellules initiales, de produire deux types de tissus : le phloème (ou liber) vers l'extérieur et le xylème (ou bois) vers l'intérieur. Dans cette assise se trouvent deux types de cellules initiales qui ont la faculté de se diviser infiniment: les initiales fusiformes qui donnent naissance aux cellules allongées du bois et du liber, et les initiales isodiamètriques groupées en îlots qui donnent naissance aux cellules allongées des rayons ligneux et libériens perpendiculairement par rapport aux cellules fusiformes. Le fonctionnement du cambium conduit donc à l'accroissement en diamètre de l'arbre par succession de divisions périclinales. Ces divisions périclinales correspondent à la naissance, à partir d'une cellule initiale, d'une cellule de la zone cambiale et d'une cellule de l'assise ayant les mêmes fonctions que la cellule initiale. La cellule de la zone cambiale quant à elle ne peut se diviser qu'un nombre de fois limité (une fois dans le liber, plusieurs fois dans le bois) et donner naissance à des cellules filles capables de se différencier et d'assurer une fonction spécifique.

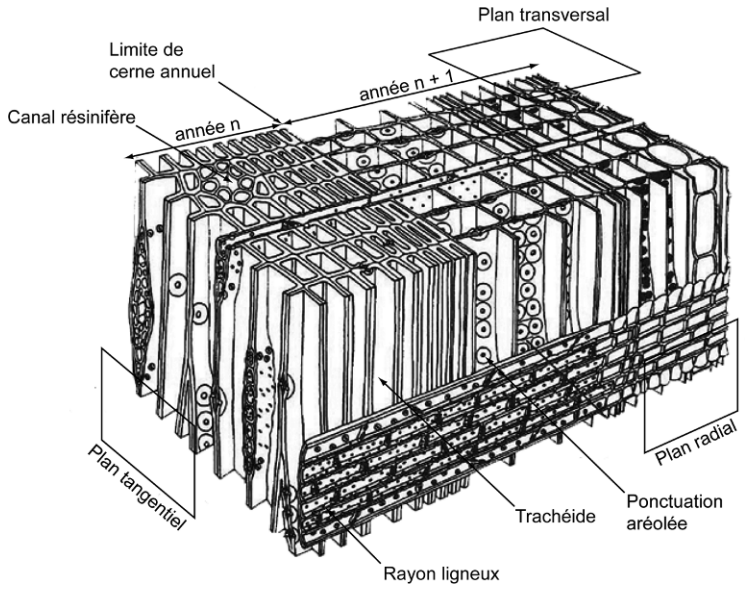


Figure 1: Plan ligneux d'un résineux et les trois directions anatomiques (Selon Siau 1984).

Les cellules initiales fusiformes sont à l'origine des trachéides de bois final et de bois initial, du parenchyme longitudinal et des cellules des canaux résinifères verticaux chez les résineux. Chez les feuillus, elles sont à l'origine des fibres (libriforme et trachéide), des trachéides vasicentriques et vasculaires, des éléments de vaisseaux et du parenchyme longitudinal.

Les cellules initiales isodiamétriques sont à l'origine des trachéides radiales de rayons ligneux, du parenchyme des rayons ligneux et des cellules des canaux horizontaux chez les résineux. Chez les feuillus, elles donnent naissance au parenchyme des rayons ligneux et aux cellules épithéliales sécrétrices des canaux horizontaux.

Chez les espèces tempérées, le cambium est inactif en hiver. La diffusion des auxines (hormomes végétales) au printemps permet de démarrer son activité. Ce phénomène se traduit par l'apparition de cernes d'accroissement naturel dans le bois. Il apparaît une limite qui est plus ou moins visible selon les espèces. Dans le cerne annuel on peut différencier plus ou moins bien le bois de printemps et le bois d'été (Figure 1). Les zones fonctionnelles du bois (conduction de la sève et diverses activités cellulaires) se situent dans les cernes formés le plus récemment : c'est l'aubier. Lorsque les cernes sont éloignés du cambium ils subissent d'importantes transformations anatomiques, physiques et chimiques : c'est le duramen ou bois parfait. Ce duramen ne joue plus le rôle de conduction mais est responsable de la mécanique structural de l'arbre (Figure 2).

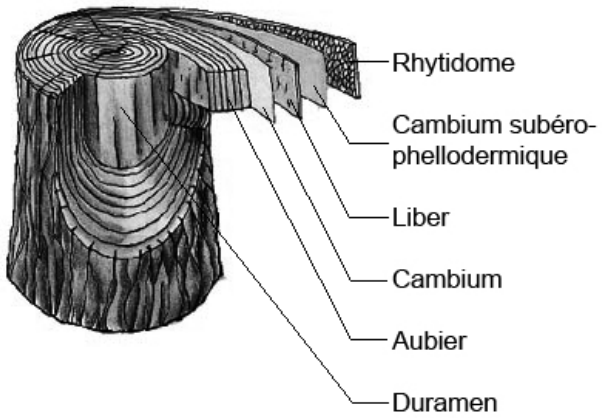


Figure 2: Les différents tissus végétaux dans l'arbre.

3.1.1.2.Résineux et feuillus

Les résineux ont une structure anatomique simple composée principalement de cellules longitudinales : les trachéides. Les trachéides du bois de printemps sont pourvues de nombreuses ponctuations aréolées leur permettant l'échange de différentes substances. Les trachéides du bois d'été ont une paroi plus épaisse et remplissent d'avantage une fonction de soutien. Dans la structure des résineux on retrouve aussi des cellules de parenchyme en

orientation axiale et radiale qui permettent le stockage des substances nutritives. Enfin chez certains résineux on trouve des canaux résinifères en direction axiale, radiale ou les deux.

Les feuillus présentent un plan ligneux plus différencié. L'ensemble du tissu se compose en grande partie de fibres orientées axialement et ayant une fonction de soutien et de quelques trachéides. Ces fibres ont une lumière plus petite et une paroi plus épaisse que celles des trachéides des résineux. L'épaisseur de la paroi est variable selon les essences leur donnant ainsi à chacune une densité spécifique. Les vaisseaux assurent la fonction de conduction chez les feuillus. Les vaisseaux ont une lumière beaucoup plus grande que les fibres et sont consitués de cellules alignées bout-à-bout dont la paroi transversale est dissolue. Lorsque ces vaisseaux ont environ la même taille et sont répartis de façon homogène dans le cerne, on parle de bois à pores diffus sinon, s'ils sont plus nombreux aux abords de la limite de cerne, on parle de bois à zone initiale poreuse. Ici aussi des cellules axiales et radiales de parenchyme assurent le stockage des substances nutritives.

3.1.1.3.Les parois cellulaires

La paroi cellulaire des fibres de bois se divise en différentes couches arrangées de manière concentrique. Cet arrangement est dû à la différence de constitution chimique et d'orientation des éléments strucuturaux. Les éléments structuraux sont appelés fibriles et sont composées entièrement de cellulose. Entre les cellules il existe une fine couche qui colle les cellules ensemble. C'est la lamelle moyenne (ML, Figure 3).

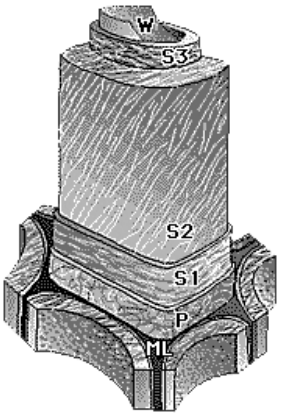


Figure 3: Représentation schématique des différentes couches composant la paroi cellulaire des fibres de bois. ML : lamelle moyenne ; P : paroi primaire ; S : paroi secondaire avec ses couches S1, S2 et S3 ; W : couche verruqueuse (Selon Core *et al.* 1979).

Elle ne contient normalement peu de cellulose mais des substances pectiques et de la lignine (Tableau 1). La seconde couche est la paroi primaire (P, Figure 3) où les fibrilles forment de fines couches croisées. La paroi primaire est la première couche qui se dépose lors de la formation de la cellule, elle contient peu de cellulose. La couche suivante est la paroi secondaire. Elle se divise en plusieurs couches.

Tableau 1: Distribution des composants de la paroi cellulaire selon les différentes couches de trachédéide de *Picea abies* (Fengel 1969, 1970).

Région	Couche	Cellulose		Polyoses		Lignine	
		% couche	% total cellulose	% couche	% total polyoses	% couche	% total lignine
Bois d'été	ML	13.9	4.1	27.1	20.6	59.0	26.8
	S1	36.4	8.9	36.4	23.2	27.2	10.4
	S2+S3	58.5	87.0	14.4	56.1	27.1	62.8
Bois de printemps	ML	13.7	2.5	27.4	15.0	58.9	18.4
	S1	34.6	5.2	34.6	15.6	30.8	7.9
	S2+S3	58.4	92.3	14.5	69.4	27.1	73.7

La couche S1 (Figure 3) présente une répartition hélicoïdale des fibriles avec un angle large. La couche S2 est la couche de la paroi la plus épaisse. Les fibriles y sont parallèles et y ont une répartition hélicoïdale avec un angle aigu. La troisième couche (S3) est présente dans les cellules de parenchyme et les fibres des plantes monocotyledones. La dernière couche (W) à la limite de la lumière de la cellule présente des fibriles orientées avec un angle large sans être véritablement parallèles les unes aux autres. Cette couche présente une importante quantité de substances non structurales (Fengel et Wegener 2003).

3.1.2.Composition chimique du bois

Les propriétés physiques, chimiques et mécaniques du bois sont directement liées à sa composition en polymères naturels. Les trois principaux polymères du bois sont la cellulose, les hémicelluloses et la lignine. En plus de cela il existe des substances de faible poids moléculaires (extraits et substances minérales), généralement plus spécifiques aux différentes essences de bois.

3.1.2.1.La cellulose

La quantité de cellulose du bois varie de 40% à 50% (Fengel et Wegener 2003). La cellulose est composée d'unités de monomère de β ─ D ─ glucopyranoses. Deux de ces monomères disposés alternativement sont liés par leur groupement hydroxyles des carbones C1 et C4 du cycle pyranose et forment des unités de cellobiose (Figure 4). Il en résulte une chaîne linéaire d'unités de cellobiose reliées par des liaisons glucosidiques formant le polymère de cellulose (Figure 5).

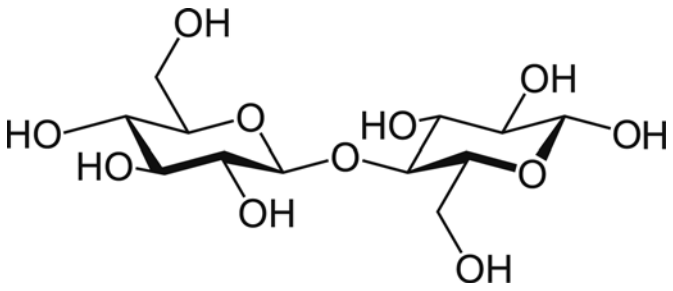


Figure 4: Deux unités de β ─ D ─ glucopyranoses formant une unité de cellobiose.

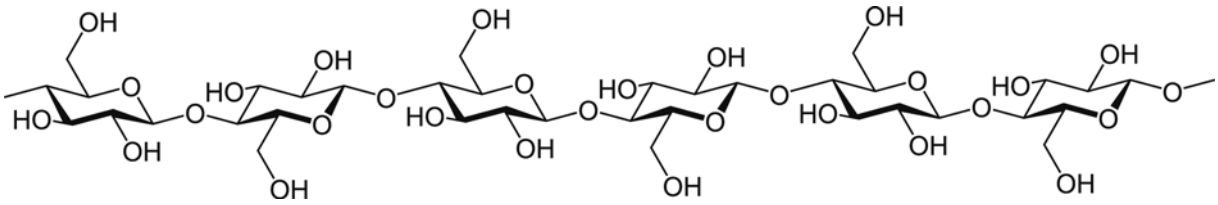


Figure 5: Structure chimique partielle de la cellulose.

Les chaînes de cellulose sont associées étroitement grâce à un réseau étendu de liaisons hydrogène formant ainsi les microfibrilles qui sont les principaux éléments structuraux de la paroi cellulaire. Lors de sa formation, la cellulose cristallise partiellement. Le reste des chaînes, moins ordonné, forme la cellulose amorphe. Les microfibrilles sont liées par de nombreuses liaisons hydrogène à d'autre composés cristallins et amorphes. De nombreuses méthodes telles que la diffraction à rayons X, la raisonnance magnétique nucléaire (RMN) et la spectroscopie infrarouge (IR), ont permis de les mettre en évidence. A cause de sa grande cristallinité le polymère de cellulose est relativement stable chimiquement et thermiquement.

3.1.2.2.Les hémicelluloses

Comme la cellulose, les hémicelluloses sont des polysaccharides, mais elles sont composées de différentes unités de sucres. Le degré de polymérisation des hémicelluloses est beaucoup plus bas que celui de la cellulose et celles-ci sont moins ordonnées et courtes. Certaines peuvent tout de même former des unités critallines. Elles diffèrent aussi de la cellulose par le fait que certains de leurs groupements hydroxyles sont naturellement acétylés et que des groupements carboxyles sont aussi associés à cette structure. La chaîne principale d'une hémicellulose présente de courtes ramifications d'unités glucosidiques. Les unités oses sont représentées par des pentoses, des hexoses des acides hexauroniques et des désoxyoses. La chaîne principale d'un polyose peut être soit un homopolymère (cas des xylanes, Figure 6) ou un hétéropoymère (cas des glucomannanes, Figure 7). Il existe aussi d'autres types de structures d'oses ramifiés (glucanes, galactanes et pectines) en plus faible quantité. A cause de leur nature généralement amorphe, les hémicelluloses contiennent la plus grande proportion de groupements hydroxyles accessibles de la paroi.

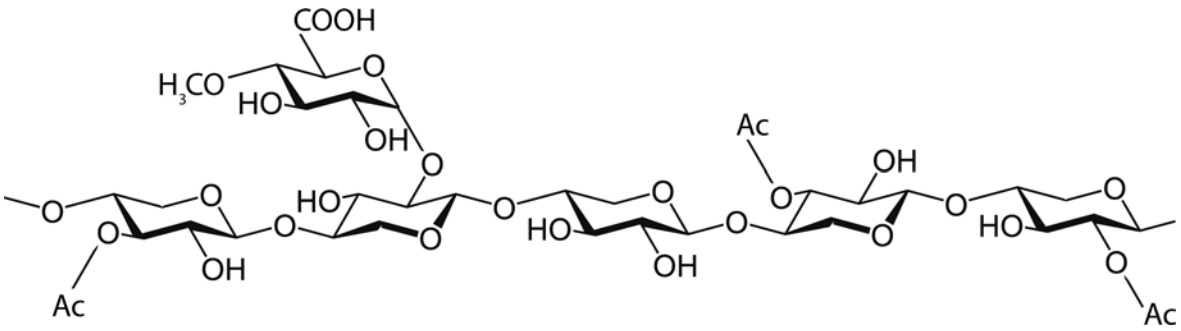


Figure 6: Structure chimique partielle d'un xylane de feuillus (O-acetyl-4-O-methylglucoronoxylane).

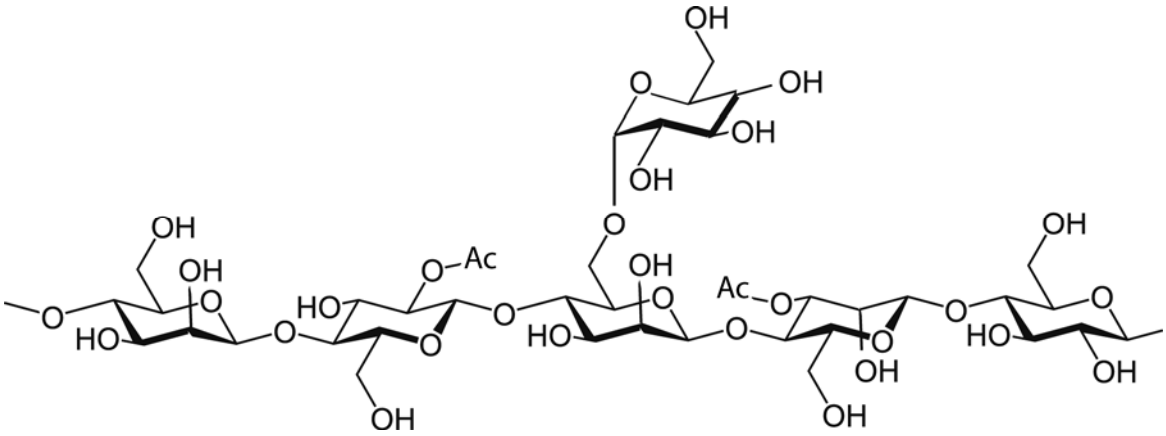


Figure 7: Structure chimique partielle d'un mannane de résineux (O-acetyl-galactoglucomannane).

Elles réagissent donc assez facilement et sont thermiquement beaucoup moins stables que la cellulose et la lignine. Les hémicelluloses jouent le rôle d'agent de couplage entre la cellulose polaire et la lignine beaucoup moins polaire (Hill 2006). Les hémicelluloses forment des liaisons hydrogène avec la surface des microfibrilles et des liaisons covalentes avec la matrice de la lignine (Koshijima et Watanabe 2003). La proportion d'hémicelluloses est généralement plus élevée dans les feuillus que dans les résineux avec une plus grande proportion de pentoses et un plus grand degré d'acétylation. La dégradation des hémicelluloses rend le bois fragile et rigide. Les hémicelluloses ont donc un rôle très important dans les propriétés viscoélastiques du bois.

3.1.2.3.La lignine

La lignine est un polymère phénolique amorphe d'un poids moléculaire indéterminé. Les feuillus contiennent 18% à 25% de lignine alors que les résineux en contiennent 25% à 35% (Fengel et Wegener 2003). La lignification de la paroi cellulaire provoque la diffusion d'unités de phénylpropane, les précurseurs de la lignine (Figure 8).

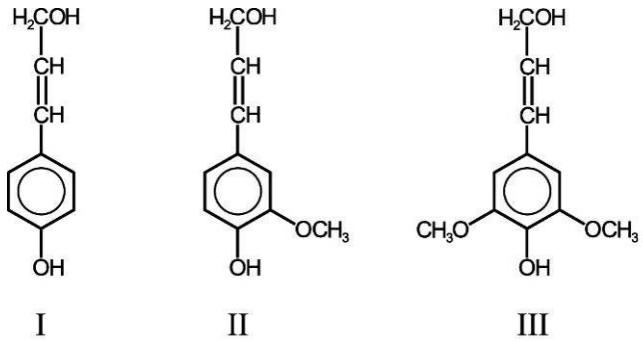


Figure 8: Précurseur de la lignine: alcool p-coumarylique (I), alcool conifèrilyque (II), alcool sinapylique (III) (Fengel et Wegener 2003).

Leur polymérisation commence par une déshydrogènation enzymatique conduisant à la formation de radicaux phénoxy (Figure 9).

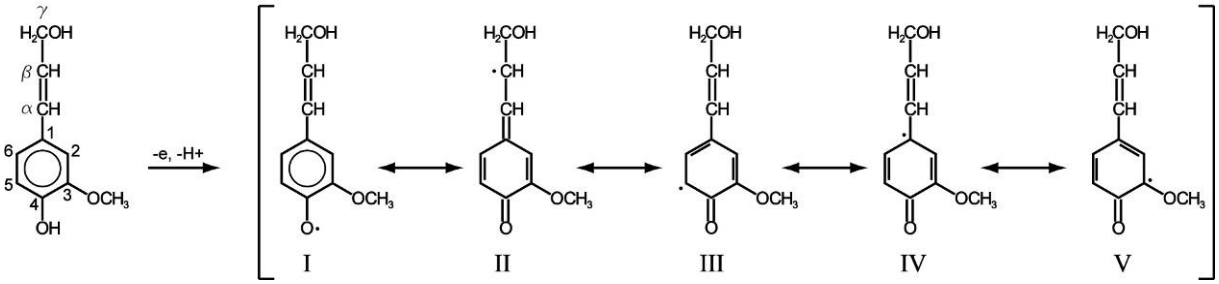


Figure 9: Formation des radicaux phénoxy à partir de l'alcool conifèrilyque par déshydrogènation enzymatique (Fengel et Wegener 2003).

Il se produit ensuite des couplages des formes I à IV formant ainsi un réseau tri-dimensionnel (Figure 10). A cause de la nature aléatoire de la réaction de polymérisation il n'existe pas de structure définie de la lignine. Pourtant la fréquence d'apparition de types définis de liaisons est bien établie. Les liaisons aryle ether telle que la liaison β ─ O ─ 4 sont les plus favorisées. Dans la lignification de la cellule la lignine se forme en comblant les espaces entre les fibrilles de polysaccharides déjà en place. Elle forme aussi des liaisons covalentes avec ces polysaccharides. La lignine a une faible concentration de groupements hydroxyles et est donc beaucoup plus hydrophobe que la cellulose et les hemicelluloses. On peut différencier les lignines par la fréquence de leurs unités phénylpropanes (hydroxyphényl issue du précurseur I, guaiacyl issue du précurseur II ou syringyl issue du précurseur III). Les lignines de résineux possèdent beaucoup plus d'unité guaiacyl que les lignines de feuillus.

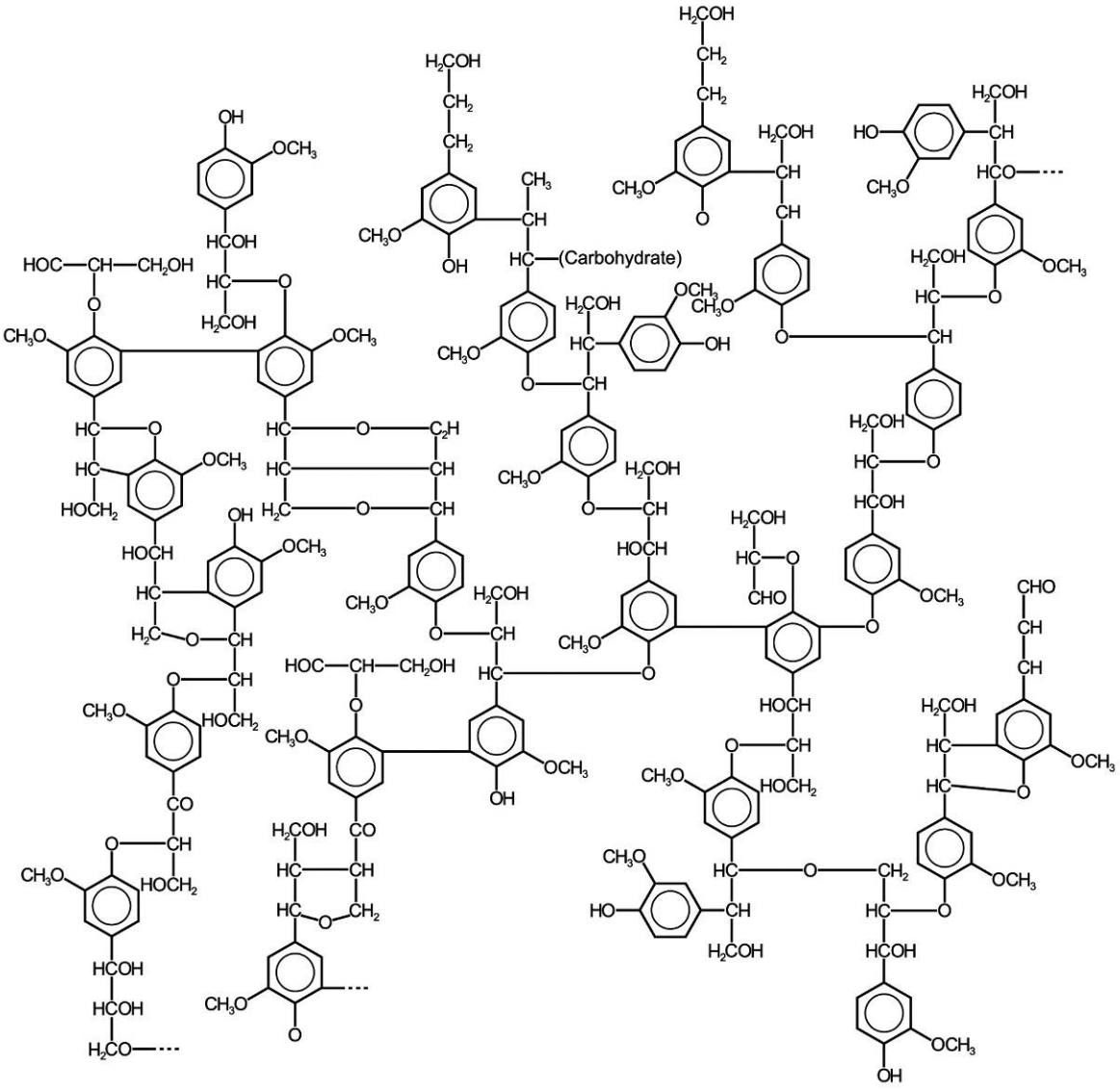


Figure 10: Représentation de la structure moléculaire d'une lignine de résineux (d'après Adler 1977).

3.1.2.4. Les extractibles

Selon les essences le bois peut contenir 0,5% à 20% en masse d'extractibles. Il s'agit d'espèces chimiques très diverses extractibles avec des solvants polaires et apolaires. On y trouve des composés insaturés, acides gras et glycérides. On y trouve aussi des terpènes, lignane, flavonoïdes et autres composés aromatiques. Leur présence peut poser des problèmes par exemple pour le collage et l'impregnation, mais aussi des allergies chez les utilisateurs et des colorations indésirées du bois. Cependant de nombreux extraits sont également utilisés pour des applications médicales, en agro-alimentaire, pour des colorations, etc.

3.1.3.Réactivité des constituants du bois

Les hémicelluloses contiennent de nombreux groupements carboxyles qui font du bois un matériau plutôt acide. Les composants suceptibles d'être hydrolysés participent donc eux-même à l'acidification du milieu attirant aussi l'eau grâce à leurs groupements hydroxyles. La température et la teneur en eau peuvent fortement changer les caractéristiques du milieu réactionnel.

L'hydrolyse des liaisons glucosidiques

L'hydrolyse acide est une réaction typique des polysaccharides. Elle présente trois étapes successives définies par Fengel et Wegener (2003). Le mécanisme de droite est le plus probable (Figure 11). L'hydrolyse ne peut avoir lieu qu'en présence d'eau et sous catalyse acide.

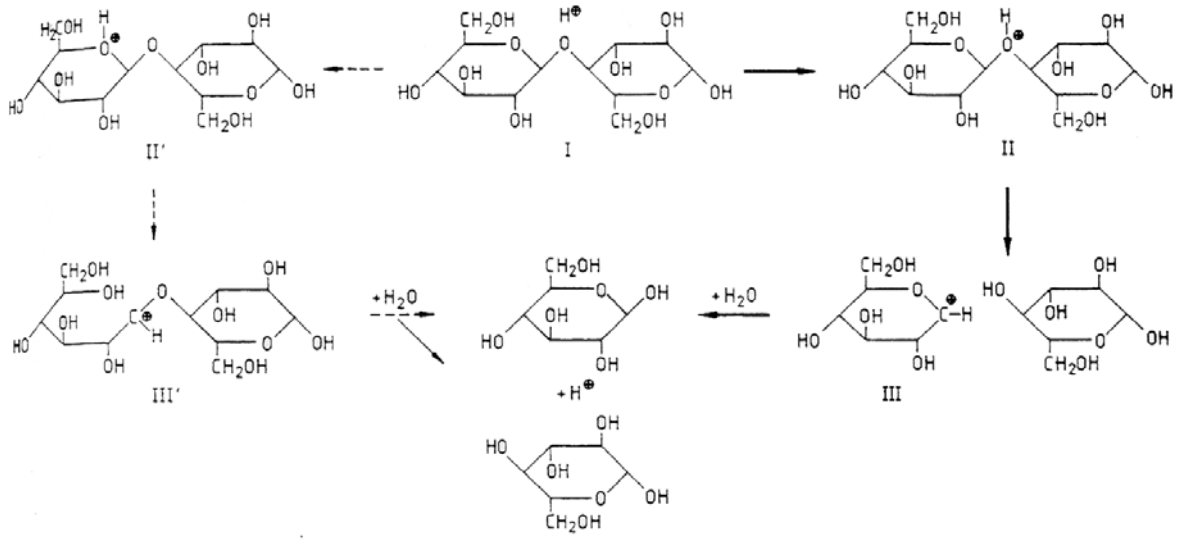


Figure 11: Méchanisme réactionnel de l'hydrolyse des polysaccharides (Fengel et Wegener 2003).

Les réactions de déshydratations et de condensations

Bien que les produits directs de l'hydrolyse soient relativement stables en condition acide, ils peuvent subir d'autres réactions, comme la déshydratation, la condensation ou la fragmentation. Ces réactions génèrent divers produits notamment du furfural (Figure 12).

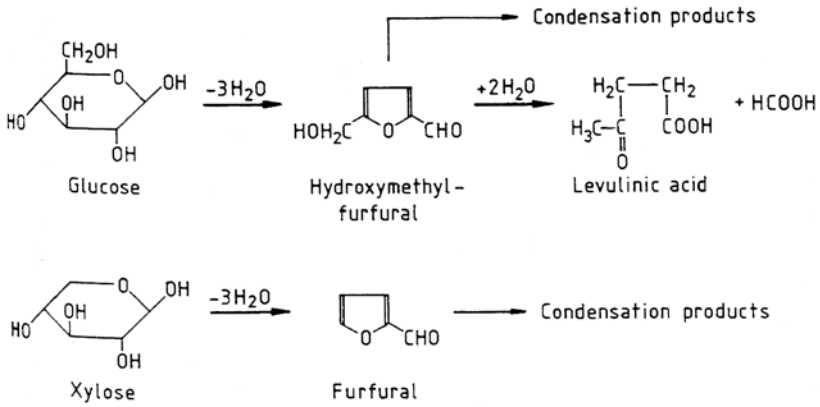


Figure 12: Formation du furfural, de l'hydromethylfururaI, d'acides lévuliniques et formiques à partir de monosaccharides en milieu acide (Fengel et Wegener 2003).

3.1.4.Dégradation thermique du bois

La dégradation thermique du bois est largement documentée dans la littérature étant donné qu'elle est liée à de nombreux procédés industriels impliquant un traitement à haute température. C'est le cas par exemple du séchage, de la stabilisation dimensionnelle par divers types de traitements thermiques, de la fabrication de la pâte à papier, de la production des panneaux de particules et de fibres et de l'utilisation énergétique du bois. La température influence fortement les propriétés physiques, chimiques et structurelles du bois. Généralement les traitements thermiques font intervenir des interactions entre la température et d'autres paramètres physiques tels que le temps, le type d'atmosphère, la pression, la quantité d'eau présente et son état. Sous ces conditions des changements peuvent débuter dès 100°C (Fengel et Wegener 2003).

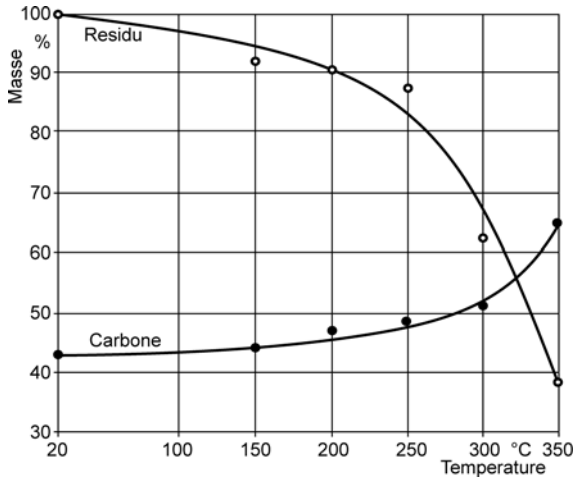


Figure 13: Perte de masse et teneur en carbone de *Fagus sylvatica* après un traitement thermique progressant de 5°C par minute (selon Košík *et al.* 1969).

Il s'agit notamment de changements tels que la réduction de la sorption, la diminution de masse sèche et des dimensions du bois. La Figure 13 montre par exemple l'évolution de la perte de masse en fonction de la température chez *Fagus sylvatica*. La perte de masse diminue et atteint 10% pour 200°C en même temps que la teneur en carbone augmente indiquant une conversion thermique des résidus. L'influence de la teneur en eau et de la température peut être mise en évidence par le ramollissement du matériau. Les bois de feuillus et résineux ramollissent vers 180°C avec un maximum à 380°C. Plus la quantité d'eau est élevée, plus le ramollissement se produit avec une température basse. Les dégradations de la structure, la conversion des composants et l'apparition de gaz issus des dégradations commencent à 200°C environ. La pyrolyse du bois débute à des températures supérieures à 270°C. Les analyses thermogravimétriques ont permis de mettre en évidence que les changements des composants chimiques du bois dépendaient du fait qu'ils soient isolés ou incorporés dans la paroi cellulaire (Figure 14).

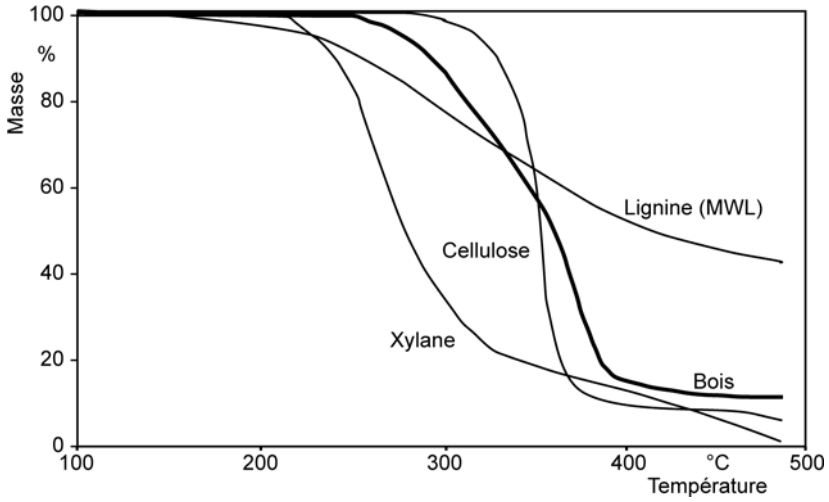


Figure 14: Diagramme thermogravimetrique de *Populus sp.* et de ses principaux composants isolés (Shafizadeh et DeGroot 1976).

L'effet de la température sur le bois ne peut donc pas être interprété directement comme l'addition des effets sur ses composés isolés (Fengel et Wegener 2003). Les méthodes par analyse thermique différentielle permettent de mettre en évidence les réactions dues au traitement thermique. Cette méthode a été appliquée au bois de *Fagus sylvatica* par Košík *et al.* (1968) (Figure 15). Généralement on trouve un premier maximum endothermique aux alentours de 120-150°C ce qui correspond à l'évaporation de l'eau. Les pics exothermiques à 200-250°C et 280-320°C puis ceux supérieurs à 400°C proviennent de la dégradation des composants du bois. L'oxidation des composants du bois semble être un facteur important d'influence de la disposition des pics exothermiques (Fengel et Wegener 2003). Les conditions du traitement ainsi que sa durée influencent aussi fortement les réactions thermiques. L'apparition de micropics exothermiques à des températures inférieures à 150°C environ et sous certaines conditions a aussi été mise en évidence par Kollmann (1960). La

présence d'eau affecte énormément la chimie des modifications thermiques du bois et le tranfert de chaleur à l'intérieur du bois (Burmester 1981). Ceci a été beacoup étudié dans le cadre de la stabilisation thermique du bois et des procédés appliqués à la biomasse.

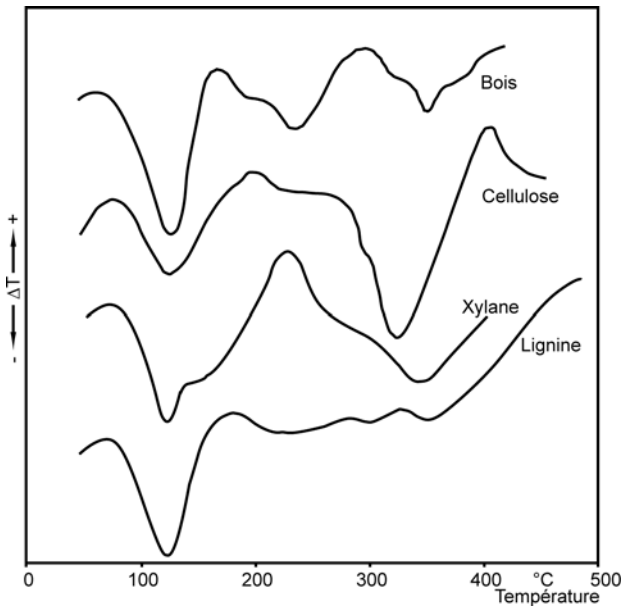


Figure 15: Analyse thermique différencielle de *Fagus sylvatica* et de ses principaux composants (Košík *et al.* 1968).

3.1.4.1.Température de transition vitreuse des composants du bois

La température de transition vitreuse (T_g) d'un polymère amorphe (ou parfois semi-cristallin) marque la frontière entre l'état vitreux (dur, cassant) et l'état caoutchouteux. Le passage du premier au deuxième de ces états se traduit par une baisse du module d'élasticité et une augmentation du taux d'élongation du matériau. Cette extensibilité trouve son origine dans l'activation thermique des molécules qui diminue les cohésions inter- et intra-moléculaires. Les mouvements moléculaires de grande amplitude sont donc permis grâce à la rotation autour des liaisons covalentes (C ─ C et C ─ O). Back et Salmén (1982) ont rassemblé plusieurs informations sur la T_g des constituants du bois. Si les conditions sont anhydrides la T_g est relativement élevée et on se trouve dans le domaine de décomposition. La présence d'eau permet donc d'obtenir un état caoutchouteux sans dégrader les composants. Les deux figures suivantes (Figure 16) montrent les températures de transitions vitreuses des éléments du bois isolés en fonction de la teneur en eau et celles de la matrice hémicellulose lignine en fonction de l'humidité ambiante.

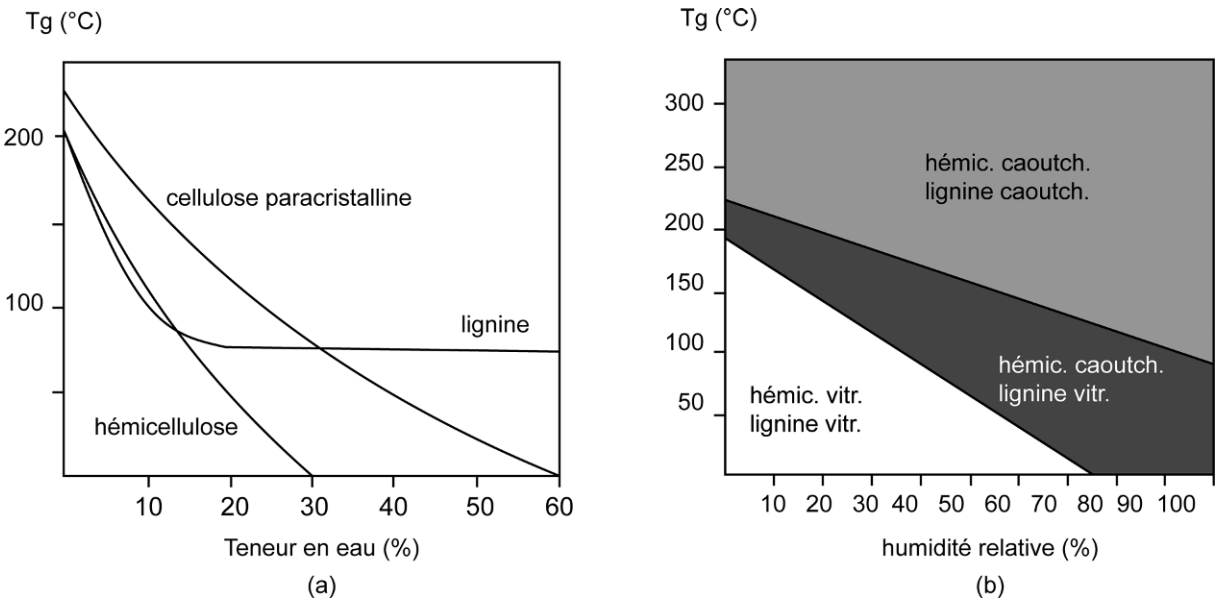


Figure 16: Température de transition vitreuse: (a) des constituants isolés en fonction de la teneur en eau, (b) de la matrice hémicellulose-lignine native en fonction de l'humidité relative de l'air (Selon Salmén 1982).

3.1.4.2.Changements chimiques

Hemicelluloses

Lorsque le bois subit l'influence de la température, les premiers éléments les plus fragiles se dégradant sont les hémicelluloses, ce qui commence à environ 100°C. Leur dégradation provoque la production d'acide acétique, de méthanol et d'autres composés volatiles hétéroclites. Leur craquage forme des polymères de furfural de faible hygroscopie. La quantité des hémicelluloses du bois baisse jusqu'à 200°C. Les analyses des différents auteurs ayant travaillé sur la dégradation des hémicelluloses ne convergent pas toutes (Hill 2006), notamment en ce qui concerne le domaine de température de leur dégradation. Ce qui apparaît clairement est que les groupements O ─ acétyl ont une grande importance dans la stabilité thermique des hémicelluloses. Ces groupements sont labiles et favorisent la formation d'acide acétique catalysant ainsi la dégradation des polysaccharides. Il semble que la dégradation des hémicelluloses puisse se réaliser aussi via des radicaux libres intermédaires (Fengel et Wegener 2003). Les polymères d'hemicellulose se dépolymérisent en oligosaccharides et monosaccharides qui, déshydratés, forment du furfural et de l'hydroxymethylfurfural (Figure 17). Les pentosanes (en plus grande quantité chez les feuillus) sont plus suceptibles de se dégrader thermiquement que les hexosanes, et ont une plus grande quantité de groupements acétyles.

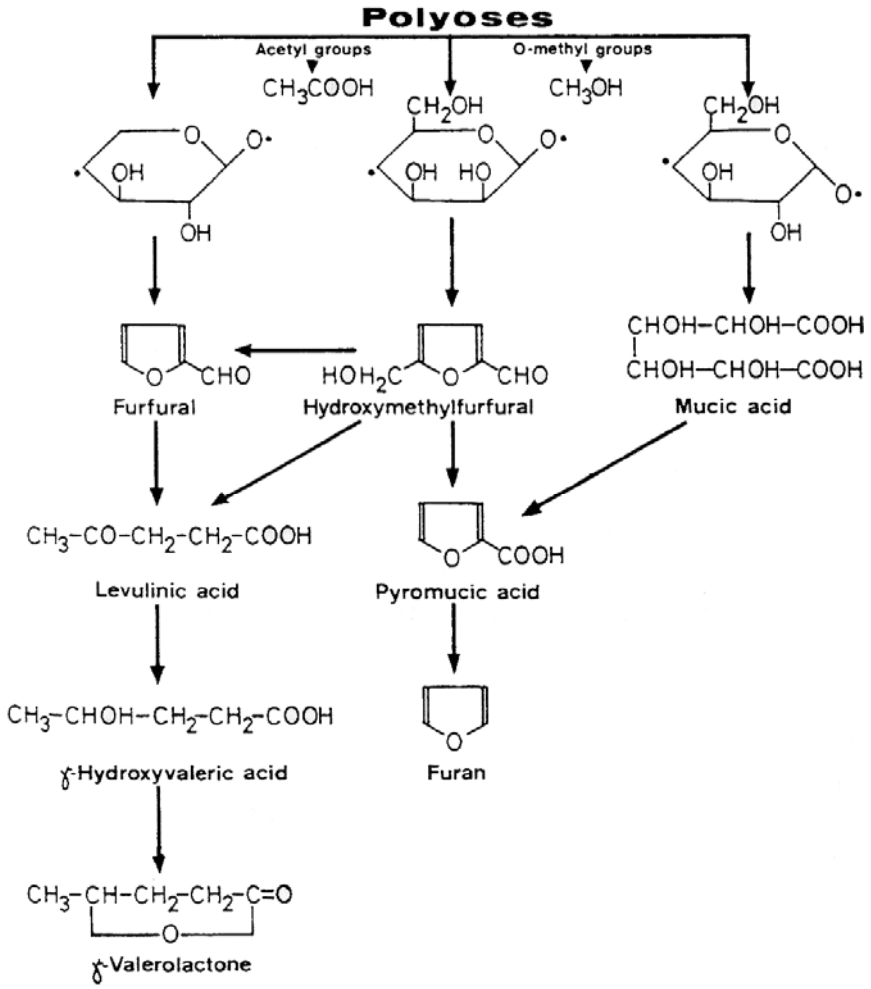


Figure 17: Etapes probables de la dégradation thermique des hémicelluloses (Fengel et Wegener 2003).

Cellulose

La cellulose est le composé le plus stable du bois vis-à-vis d'un traitement thermique grâce à sa haute cristallinité. Sa dégradation se produit pour des températures plus élevées que les hémicelluloses. Les régions amorphes de la cellulose sont plus sensibles à la dégradation thermique et ont un comportement similaire à celui des hémicelluloses. La cellulose cristalline se dégrade véritablement vers 300-340°C (Kim *et al.* 2001), bien que de légers changements soit perceptibles dès 200°C. Son taux de dégradation diminue si la quantité d'eau est plus élevée. En effet l'eau favorise l'accessiblité aux parties amorphes de la cellulose (Fengel et Wegener 2003). L'augmentation de la température provoque la rupture des chaînes de celluloses, produisant des oligosaccharides, engendrant ainsi une baisse du degré de polymérisation et de cristallinité de la cellulose. Cette augmentation des oligosaccharides explique l'observation d'une augmentation de la teneur en hémicelluloses pour certaines mesures de dégradation thermique du bois à de telles températures (Fengel et Wegener 2003). Le chauffage en présence d'air de la cellulose engendre la production de groupements carbonyles, carboxyliques et de groupement hydroperoxydes très instables

issus de l'oxydation des groupements hydroxyles de la cellulose. Si le traitement thermique est plus long, la quantité de groupements carbonyles formés augmente. Les produits dérivés de la cellulose ayant subit un traitement thermique sont le levoglucosane, le furan et les dérivés du furan (Figure 18).

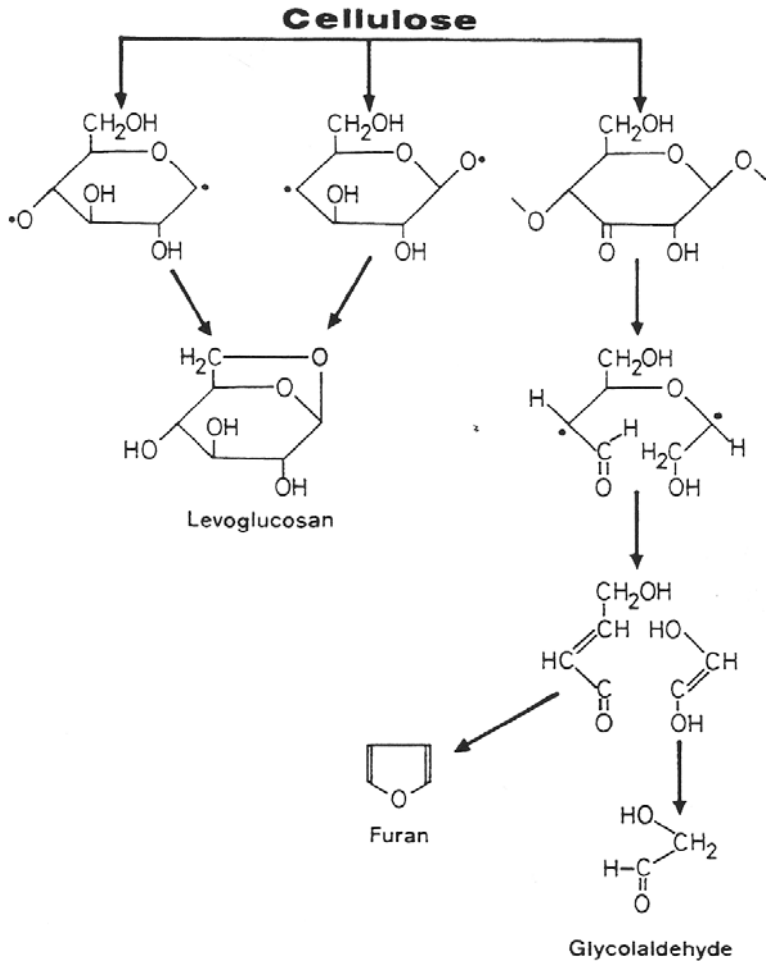


Figure 18: Etapes probables de la dégradation thermique de la cellulose (Fengel et Wegener 2003).

La quantité de levoglucosane a été trouvée faible à 250°C, elle augmente fortement à partir de 300°C. Il semblerait que la partie amorphe de la cellulose puisse ralentir la formation de levoglucosane (Fengel et Wegener 2003).

Lignine

La lignine est considérée comme le composant le plus stable de la paroi, cependant certaines décompositions se produisent pour des températures plutôt basses entraînant la production de produits dérivés variés (Figure 19). Des analyses thermiques différentielles de la lignine isolée ont montré que les réactions étaient endothermiques de 50°C à 200°C et qu'une petite réaction exothermique se produisait pour 220°C (Nassar et McKay 1984). Les réactions exothermiques seraient duent au réarrangement de la lignine lors de son ramollissement.

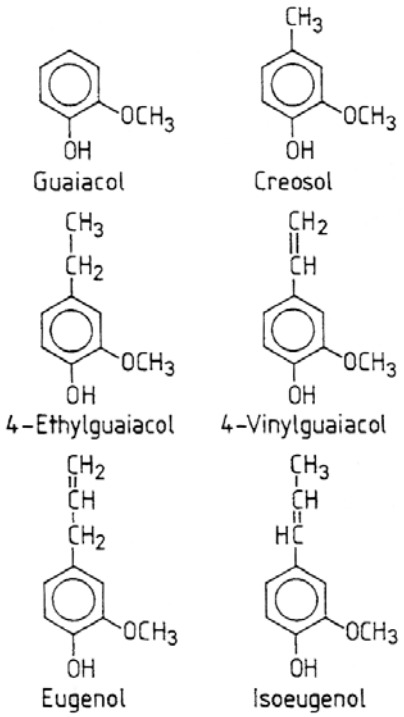


Figure 19: Produits issus de la dégradation thermique de la lignine (Fengel et Wegener 2003).

D'autres réactions largement exothermiques ont été trouvées pour des températures plus élevées. Les réactions de dégradation significatives commencent pour 280°C. Pour des températures comprise entre 220°C et 335°C il se produirait un clivage des liaisons ether aryle-alkyle (Haw et Schultz 1985). Des réactions de réticulation de la lignine ont été observées pour plusieurs essences par de nombreux auteurs dans un domaine de température allant de 180°C à 230°C (Hill 2006). Il se produit une augmentation de la teneur en groupements hydroxyles phénoliques (visibles en FT-IR, Nuopponen *et al.* 2004) attribuée au clivage des liaisons β ─ O ─ aryl par perte des groupements méthoxyles des unités de lignine en présence d'eau ainsi qu'une augmentation de la teneur en radicaux libres (Sivonen *et al.* 2002). Les auteurs considèrent que ces changements permettent des couplages entre les noyaux aromatiques et augmentent ainsi le taux de réactions de réticulation du réseau de la lignine.

3.2.Assemblage par collage du bois

L'assemblage du bois avec des adhésifs est une une technologie dont l'orgine est très ancienne (plus de 3000 ans) (River 1994). Bien que le collage du bois et du papier soient les applications les plus courantes dans l'utilisation d'adhésifs, leur fonctionnement est assez complexe. On connaît bien la chimie des adhésifs mais les phénomènes d'adhésion permettant à deux pièces de bois de tenir ensemble sous des contraintes internes et

externes restent l'objet de nombreuses recherches. Les adhésifs sont formulés selon l'application à laquelle ils sont destinés, c'est pour cela qu'il en existe beaucoup (synthétiques structuraux, élastomères, thermoplastiques et naturels). Le marché le plus grand consommateur d'adhésif est celui du panneau à base de bois. Une autre utilisation importante est celle de la construction bois dans les collages de laméllé-collés, de l'aboutage par entures multiples, de la fabrication de poutre en I et d'autres éléments structuraux massifs collés. L'industrie du meuble utilise aussi beaucoup d'assemblages collés. La croissance de la construction bois et des produits issus de l'ingénierie du bois provoque une augmentation de la consommation d'adhésifs. La résistance d'un adhésif est définie mécaniquement comme la force nécessaire pour séparer les substances collées ensemble. Elle dépend notamment des liaisons chimiques des polymères de l'adhésif, du bois et de l'interface bois-adhésif. On décrit généralement trois étapes du procédé de collage (Rowell 2005) : la préparation de la surface, la mise en contact de l'adhésif avec la surface au niveau moléculaire et enfin la solidification de l'adhésif. Le développement d'un assemblage collé fait donc appel à des connaissances en rhéologie, chimie organique, chimie des polymères et résistance des matériaux.

3.2.1.Théories de l'adhésion

Plusieurs théories ont été développées concernant la notion fondamentale d'adhésion. Il existe cinq théories principales (Allen 2005) : la théorie mécanique, la théorie d'adsorption, la théorie chimique, la théorie de diffusion et la théorie électrostatique.

Théorie mécanique

Elle implique l'emboîtement de l'adhésif solidifié dans les porosités et irrégularités du substrat concerné. Cette théorie est significative pour le bois d'autant plus qu'elle peut s'appliquer de l'échelle macroscopique à l'échelle atomique. L'interface prend donc dans ce cas la nature d'un composite.

Théorie de l'adsorption

Elle fait intervenir les forces secondaires, ou de Van der Waals, entre l'adhésif et le substrat. Elles sont impliquées dans tous les joints collés. Il faut pour cela que les deux matériaux soient apportés intimmement le plus proche possible l'un de l'autre. Pour s'en assurer on choisit souvent de développer un adhésif sous forme liquide, permettant ainsi une meilleure mobilité. Bien que ces forces soient faibles, si elles se présentent en grand nombre elles apportent une énergie considérable au joint. Elles sont cependant sensibles, particulièrement à l'eau.

Théorie chimique

Selon cette théorie des liaisons chimiques primaires sont impliquées et apportent une autre contribution à la résistance du joint. Il s'agit de liaisons covalentes mais aussi de liaisons ayant un caractère ionique considérable. Ces liaisons ont été trouvées par analyse des surfaces rompues du joint. Les interactions acide-bases et liaisons hydrogène jouent aussi un rôle important dans la théorie chimique.

Théorie de diffusion

Dans le cas spécifique de polymères n'ayant pas dépassé leur T_g et étant en contact étroit il peut y avoir diffusion des extrémités des chaînes de polymère ou de segments à travers l'interface dans les deux directions.

Théorie électrostatique

L'existence d'une double couche électrique à l'interface entre un métal et un polymère adhérents a été démontrée et pourrait contribuer à la résistance totale du joint. Cette théorie reste poutant très discutée et critiquée.

Il existe enfin une théorie qui considère que la mesure de l'adhésion par test mécanique reflète simplement la rhéologie du joint, particulièrement pour les adhésifs et qu'elle ne donne donc aucune information sur les forces qui agissent à l'interface.

Généralement on considère que ces théories sont combinées dans l'interaction d'un adhésif avec son substrat et que l'un ou plusieurs des facteurs peuvent être dominants. Plus il y aura de modes d'adhésion différents appliqués à l'interface, plus le joint sera résistant.

3.2.2. Evaluation des caractéristiques mécaniques des assemblages bois collés

Ce paragraphe se rapporte aux mesures de la résistance mécanique d'un joint collé à son substrat, il ne concerne pas la caractérisation des adhésifs.

3.2.2.1. Méthodes d'évaluation des caractéristiques mécaniques des assemblages bois collés

Il existe une multitude de méthodes de test de l'adhésion utilisées pour évaluer la qualité d'un assemblage collé, ses limites d'utilisation, l'efficacité de la préparation du substrat, pour sélectionner un adhésif et enfin pour évaluer l'effet du vieillissement. Un test bien choisi doit fournir des résultats sensibles aux facteurs critiques affectant la performance du joint. Les tests sont aussi dépendants de la nature viscoélastique de l'adhésif. Les trois principales configurations sont la traction, le cisaillement et le pelage (utilisé généralement uniquement pour les collages avec élastomères).

Le **test par cisaillement** du joint de simple ou double recouvrement est le test le plus utilisé car il est facile à préparer et à effectuer (pour le bois : EN 205). Cependant la distribution des contraintes dans ce test est complexe (Tod 2005). En effet elle est très dépendante de la façon dont sont conçus le test et les échantillons.

Le **test par la traction** peut prendre plusieurs formes, il s'agit cependant toujours d'un test dont les forces sont perpendiculaires au plan de soudage. La contrainte à la rupture est déterminée à partir de la force appliquée et de la surface rompue.

Un certain nombre de tests sont conçus pour observer les **effets d'une exposition environnementale**. Il s'agit notamment des tests à l'eau sous contrainte ou non, de tests aux chocs ou de tests avec un traitement à haute température (cas des essais de résistance au feu).

Des tests complètement différents sont classés dans les méthodes de test de **mécanique de la rupture**. L'objectif de ces tests est de mesurer les réelles propriétés du matériau du joint de collage indépendamment de la géométrie des échantillons. Ces méthodes demandent des préparations minutieuses des échantillons où toutes les variables expérimentales doivent être contrôlées. Le résultat typique obtenu est la valeur de l'énergie de rupture qui est déterminée en fonction d'un certain nombre de paramètres.

Enfin il existe aussi des tests appellés « **tests de durabilité** » qui permettent d'observer le vieillissement et la performance à long terme des adhésifs. Des tests accélérés ont été développés permettant de bien simuler le vieillissement des adhésifs (River 1994). Il s'agit notamment des tests sous chargements cycliques et parfois, pour le bois, soumis à des variations climatiques permettant ainsi d'observer l'influence des phénomènes de retrait et de gonflement.

Tous ces tests donnent une « valeur » soit sous la forme d'une force par unité de surface ou sous la forme d'une énergie par unité de surface. Cette valeur d'adhésion englobe les propriétés de l'interface, de l'adhésif, du substrat, et des interactions entre eux (Tod 2005). Souvent le changement d'une géométrie d'échantillon a directement un impact sur la valeur d'adhésion obtenue. Seuls les tests de mécanique de la rupture permettent d'obtenir (et là encore uniquement dans une certaine limite d'interprétation des résultats) les propriétés fondamentales du joint.

3.2.2.2.Mécanique de la rupture appliquée aux joints collés de bois

Les joints d'adhésif, montrent une défaillance généralement par l'initiation et la propagation d'une fissure. C'est le cas de la plupart des substances solides. L'existence de défauts gourverne la résistance d'un matériau (Kinloch 2005). L'objectif de la théorie de la mécanique de la rupture aux assemblages collés est d'analyser, de façon mathématique, la

force responsable de l'initiation et de la propagation d'une rupture dans le substrat, dans l'adhésif ou dans les deux. La rupture est due à un défaut dans l'un des deux ou dans les deux matériaux. Selon le critère d'énergie suggéré par Griffith (1921) la rupture apparaît lorsque suffisamment d'énergie est réstituée par la propagation de la fissure fournissant l'énergie nécessaire à la création de deux nouvelles surfaces. L'énergie restituée est la somme de l'énergie élastique emmagasinée et de l'énergie potentielle du système chargé. La somme de ces deux énergies est appelée « énergie surfacique de rupture » ou « taux de restitution d'énergie de déformation ». Dans le cas des matériaux dont le comportement est considéré comme linéaire-élastique, le taux de restitution d'énergie G_c, s'écrit:

$$G_C = \frac{P_C^{\,2}}{2b} \times \frac{\partial C}{\partial a} \qquad (1)$$

Où P_C est la force correspondante au début de la propagation ou "force critique", b est l'épaisseur de l'éprouvette, C la complaisance et a la longueur de la fissure. G_C s'exprime en J/m^2. Il existe trois principaux modes de rupture d'un matériau déterminant différentes conceptions de tests de mécanique de la rupture (Kinloch 2005). Le mode de rupture approprié pour la mesure du taux de restitution d'énergie est le mode par ouverture, ou clivage (mode I). Le mode II est le mode par cisaillement plan et le mode III le mode par cisaillement anti-plan. Le mode par clivage est réputé pour être le plus dangereux dans les structures, c'est pour cela qu'il est souvent étudié.

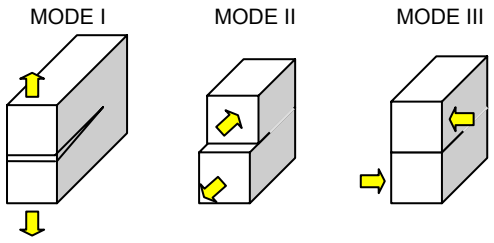


Figure 20: Illustration des 3 modes élémentaires de rupture d'une plaque fissurée.

La mécanique de la rupture appliquée au bois commence dès 1964 avec les travaux de Porter. Plusieurs auteurs s'intéresseront par la suite à ce sujet (Barett et Foschi 1977, Hunt et Croager 1982, Mall *et al.* 1983, Triboulot *et al.* 1984, Valentin et Caumes 1989, Vasic et Smith 2002, Yoshihara et Kawamura 2006). Divers tests sont effectués pour évaluer l'énergie nécessaire à la propagation d'une fissure dans le bois. La plupart des travaux ont été effectués en mode I avec l'éprouvette DCB (Double Cantilever Beam). Cependant certains auteurs présentent des résultats en mode mixte I et II (Valentin 1989) avec d'autres géométries d'éprouvettes. Plusieurs géométries d'éprouvettes tels que les DCB, CDCB

(Contoured Double Cantiler Beam), éprouvette à entaille centrale, CT (Compact Tension) éprouvette de double torsion, éprouvette cantilever trapézoïdale et SENT (Single Edge Notched specimen in Tension) sont utilisées pour les essais. On remarque, dans les travaux les plus récents, que les éprouvettes DCB sont utilisées de préférence aux éprouvettes CDCB. Les éprouvettes CDCB demandent une longue et contraignante préparation. La méthode de test DCB demande cependant un traitement mathématique des résultats adapté (Gagliano et Frazier 2001).

L'utilisation des adhésifs se développant aussi dans l'industrie du bois, les chercheurs se lancent dans l'étude de la mécanique de la rupture des liaisons bois-colle. L'importance de divers facteurs influençant la propagation d'une rupture dans un joint bois-colle est alors analysée. L'influence du type d'adhésif ainsi que les paramètres affectant la polymérisation de l'adhésif ont été pris en compte par tous les auteurs. White et Green (1980) montrent l'influence de la densité du bois et de l'état de surface sur la ténacité du couple bois-colle. Mijovic et Koutsky (1979) montrent quelle est l'influence de l'orientation des fibres du bois. Ebewele et al. (1979) et Takatami et al. (1980) proposent des études sur l'épaisseur de colle. En 1984 Duchanois montre que le test de fracture en mode I avec l'éprouvette DCB est une approche très utile pour l'analyse de différents types de joints collés. Il effectue ces tests sur différents types d'adhésifs (urée formol, vinyle et époxy). Différentes méthodes de calcul sont ensuite développées pour évaluer le taux de restitution d'énergie des joints d'éprouvettes DCB : la méthode de la norme ASTM D 3433-75, le modèle de la poutre encastrée, le modèle de la double poutre sur fondations élastiques (Komatsu et al. 1976), le modèle d'Okihira, la méthode de la complaisance corrigée (Gagliano et Frazier 2001) et enfin la méthode de la complaisance expérimentale. On trouve ainsi dans la littérature de nombreux résultats concernant le bois et les liaisons collées bois-colle. Cependant la méthode reconnue comme étant la meilleure reste celle de la complaisance expérimentale (Duchanois 1984, Gagliano 2001). L'initiation d'une fissure est due à une discontinuitée géométrique du joint (River 1994). Elle peut être due à une différence de densité du bois (par exemple différence entre bois de printemps et bois d'été) ou de l'adhésif, une différence de pénétration de l'adhésif dans le bois ou encore un défaut intrinsèque ou inhérent. Il semblerait que le stress critique provoquant la propagation d'une rupture serait fonction de la taille du défaut (River 1994). L'étude de la stabilité de la propagation de la fissure donne aussi beaucoup d'information sur le comportement du joint. Une fois amorcée la fissure peut de propager de différentes manières (Figure 21).

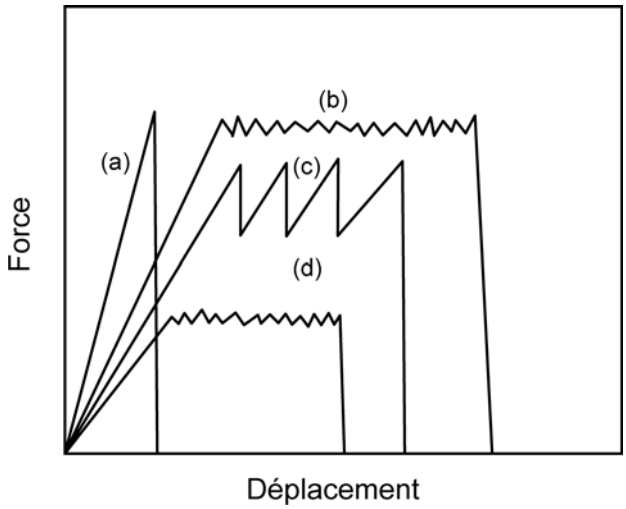


Figure 21: Les différents comportements de la propagation d'une rupture dans un joint bois-adhésif: (a) fort/instable, (b) fort/stable, (c) fort/modérément instable, (d) faible/stable (Selon River 1994).

Les joints les plus favorables sont ceux qui demandent une grande énergie d'initiation de rupture et montrent une propagation de rupture stable, soit le type (b). Ainsi avec ces informations on peut considérer que le comportement d'un joint peut être prédit correctement grâce à l'étude de sa mécanique de rupture.

3.3.Technologies de soudage

Les polymères et composites peuvent être assemblés par soudage, collage et assemblage mécanique. Le choix de la méthode d'assemblage dépend du type de polymère utilisé, de la configuration du joint, de la résistance requise, de la vitesse de production, du coût de production et la qualité recherchée. Le soudage consiste en la fusion des polymères adjacents grâce à une source de chaleur, la soudure se formant en refroidissant.

3.3.1.Classification

Il existe de très nombreuses méthodes de soudage qui peuvent être classées en trois principales catégories (Buxton 2005):

- Techniques utilisant une source de chaleur externe: soudage par plaques chaudes, soudage par barre chaude, soudage par impulsions, soudage avec un gaz chaud, soudage par extrusion, soudage flash-free.

- Techniques utilisant directement l'électromagnétisme: soudage par implantation de résistance, soudage par induction, soudage haute fréquence, soudage au laser, soudage infrarouge et soudage micro-ondes.
- Techniques pour lesquelles la chaleur est générée par un mouvement mécanique: soudage par vibration ou soudage par friction linéaire, soudage par rotation (spin welding), soudage orbital, le soudage par ultrasons et le soudage par friction rotative d'un outil guidé le long du joint (friction stir welding).

Toutes ces techniques de soudage sont gouvernées par les paramètres temps, température et pression. Pour obtenir des performances de haute qualité, une optimisation minutieuse des paramètres doit être réalisée pour chacune des applications.

3.3.2.Soudage par friction linéaire des plastiques

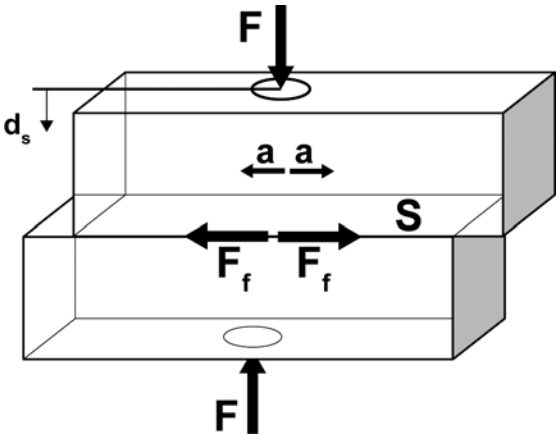
Le soudage par friction linéaire (ou soudage par vibration) est l'une des nombreuses techniques dans laquelle la chaleur est générée par le mouvement mécanique des pièces à souder. Les deux pièces à joindre sont mises en contact sous une certaine pression. Une pièce est bloquée tandis que l'autre effectue un mouvement linéaire réciproque dans le plan du joint. La chaleur générée par la friction au niveau des deux surfaces crée une zone de fusion locale. Ensuite la vibration est stoppée, les pièces sont alignées et le joint refroidit sous pression pour consolider la soudure.

Le soudage par friction linéaire peut être réalisé sur tous les matériaux thermoplastiques. L'alignement du joint est précis et sa résistance est proche de celle du matériau à souder. Cette technologie peut aussi être utilisée pour les matériaux composites, mais elle nécessite des pressions plus élevées et la dégradation des fibres qui se produit à l'interface peut engendrer des problèmes (Buxton 2005). On utilise cette technologie généralement pour des joints dont la dimension est trop grande pour le soudage par ultrasons et pour lesquels le soudage par plaques chaudes serait trop lent (le soudage par friction linéaire étant environ quatre fois plus rapide que le soudage par plaques chaudes pour des surfaces étendues). Les principaux inconvénients de la technologie sont le coût élevé des installations et la difficulté de souder des joints tri-dimensionnels.

Le soudage par friction linéaire est largement utilisé dans l'industrie automobile pour la fabrication de divers composants notamment ceux des tableaux de bords ou des parois intérieures de portes. On l'utilise aussi dans la fabrication des cadres, des housses rigides de divers appareils, les boîtiers de filtres, de tronçonneuses ou encore des valves de chauffage. Il s'agit généralement de productions de grand volumes de pièces de formes diverses.

3.3.2.1.Lois et principes

Le procédé de soudage par friction linéaire se caractérise par les paramètres temps de soudage (t_s), pression de soudage (p_s) = force appliquée (F) / surface du joint (S), temps de maintien (t_m), pression de maintien (p_m), amplitude (a) et fréquence (f) (Figure 22).



Paramètres machine:

- Foce appliquée F
- Amplitude a
- Fréquence f
- Temps de soudage t_s (commande temps)
- Déplacement de soudage d_s (commande déplacement)
- Temps de maintien t_m

Grandeurs résultantes :

- Pression de soudage p_s = F/ S
- Force de friction F_f
- Déplacement de soudage d_s ou temps de soudage t_s

Figure 22: Principe du soudage par friction linéaire (Selon Giese 1995).

Grâce au système d'entraînement et un à outillage adéquat, une vibration linéaire, oscillatoire est mise en place. Celle-ci peut être obtenue avec diverses fréquences. Généralement les machines ont des fréquences de travail de 100-300 Hz et des amplitudes continues de 0,25-2,5 mm (Hiermaier 1998). Si l'on considère le mouvement de friction comme une oscillation harmonique on obtient pour une amplitude a_0 et une élongation a_t en position de repos pour la fréquence f :

$$a_t = a_0 \times \sin(\omega t) \qquad (2)$$

avec

$$\omega = 2\pi \times f \qquad (3)$$

On en déduit la vitesse relative effective de friction v_t :

$$v_t = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} \times f \times a \qquad (4)$$

Les valeurs classique de la vitesse relative effective sont de 500 à 1300 mm/s.

3.3.2.2.Cycles de soudage

Des études sur le soudage par friction linéaire (Schlarb 1989, Giese 1995) ont montré que le déplacement de soudage (d_s), indépendamment de la géométrie des échantillons, du matériau et des paramètres, suit un cours temporel qui se divise en quatre domaines caractéristiques (Figure 23):

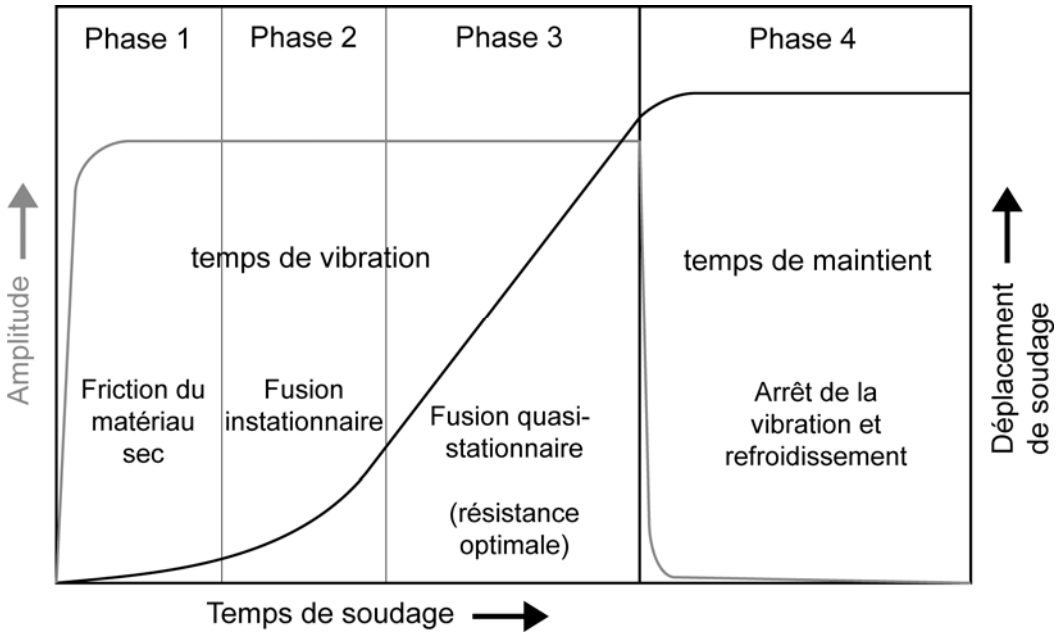


Figure 23: Représentation des différentes phases du procédé de soudage par friction linéaire (Selon Giese 1995).

- Phase 1: Friction du matériau sec: Au début du mouvement de vibration sous une pression définie se produisent des interactions complexes moléculaires et mécaniques intenses au niveau de l'interface. Ceci se traduit, dans la phase de friction sèche, par la déformation des irrégularités de surface, l'entraînement de particules arrachées et des effets d'adhésion entre les deux surfaces en contact. Plus les irrégularités de surface sont importantes et les efforts de pression importants plus les déformations mécaniques et arrachements seront importants. À partir de là on peut déterminer la contrainte de friction critique correspondante au moment où les forces de cisaillement résultantes sont dépassées localement. Des zones de désordre se forment dans le matériau sans pour autant montrer une augmentation de température.
- Phase 2: Fusion instationnaire. La température augmente dans l'interface et passe au-dessus de la température de transition vitreuse du matériau amorphe ou semi-cristallin formant alors un film fondu fin qui prend de l'extension avec le temps de vibration. L'énergie cinétique résultante du mouvement relatif de friction d'une part se dissipe durant cette phase dans la zone fondue par l'effort de cisaillement et d'autre part est emmagasinée sous forme élastique. Dans cette phase l'interface fondue s'épaissit jusqu'à ce qu'un équilibre s'installe entre la quantité de chaleur dissipée, la fusion du matériau et la perte de matériel.
- Phase 3: Fusion quasistationnaire. Cette phase, proche de l'équilibre, montre une épaisseur de l'interface soudée et une vitesse de friction constantes.

- Phase 4: Arrêt de la vibration et refroidissement. Dans cette phase l'arrêt de la vibration met fin à l'extrusion et il se produit un refroidissement du joint. Le déplacement de soudage (d_s) dans cette phase de maintien montre une légère augmentation due à l'écoulement encore existant du matériau à l'interface. Pendant la cristallisation du polymère, des structures supermoléculaires se forment à partir des agrégats de cristallites primaires (fibrilles ou lamelles) sous diverses formes géométriques. La cristallisation se compose en deux processus élémentaires consécutifs et parallèles : la formation puis la croissance de germes de cristaux. Les deux processus sont dépendants des conditions de température (température de cristallisation, vitesse de refroidissement et historique thermique) et de la déformation du joint.

Dans ces quatre phases du processus le matériau subit les contraintes du choix des paramètres de soudage et de l'état momentané des aggrégats de cristallites au niveau de l'interface.

3.3.2.3.Facteurs influençants la qualité du joint

Les joints des études de Schlarb (1989), Giese (1995) et Hiermaier (1998) ont été testés à la traction perpendiculaire et à la résistance au choc Charpy.

La qualité d'un joint soudé par friction linéaire est sans équivoque corrélée avec les paramètres de soudage (Giese 1985). La résistance obtenue est généralement considérée comme insuffisante si l'on arrête le processus dans la phase 1 (microsoudage) ou 2 (soudage inhomogène) du soudage.

En revanche lorsque l'état quasistationnaire est atteint (phase 3), on obtient de très bonnes qualités d'assemblage qui semblent être non dépendantes de l'amplitude mais plutôt de la pression de soudage. Si la pression de maintien reste identique à la pression de soudage ou est légèrement inférieure les résultats obtenus sont meilleurs uniquement si la valeur de la pression de maintien est supérieure à la pression de soudage. Des essais de soudage sur des pièces de polypropylène de 2, 3 et 4 mm d'épaisseur ont montré que l'épaisseur dans ce petit domaine n'avait pas d'influence directe sur la résistance mécanique.

Pour le soudage par vibration linéaire on fait la différence entre deux possibilités de positionnement des échantillons vis-à-vis de la direction de vibration: vibration dans la longueur et vibration dans la largeur (Figure 24). Il en résulte différentes formes d'extrudats. Dans le soudage sur la largeur le joint de soudage est beaucoup plus cisaillé et la pression exercée sur l'interface varie périodiquement. Par conséquent la vitesse de friction est plus élevée. Le soudage dans la longueur conduit à des joints plus fin et à beaucoup moins d'inhomogénéité que dans le cas du soudage sur la largeur (Giese 1995).

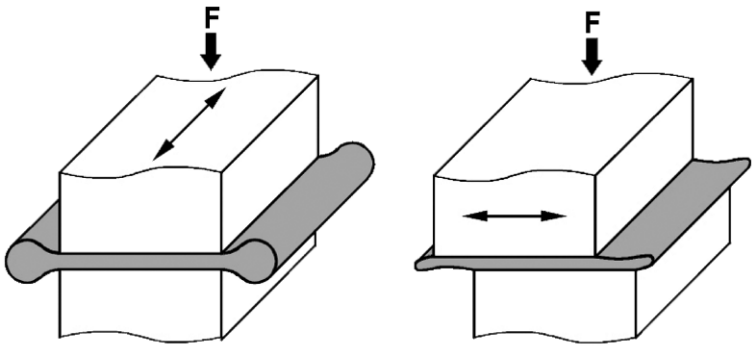


Figure 24: Représentation de la déformation de l'extrudat pour une vibration dans la longueur (à gauche) et une vibration dans la largeur (à droite) (Selon Giese 1995).

Ceci est en corrélation avec la résistance mécanique des joints qui est donc plus élevée dans le cas du soudage sur la longueur. Le soudage orbital (ou biaxial), à cause du déplacement relatif en cercles, ne correspond pas à un niveau intermédiaire entre le soudage dans la longueur et le soudage dans la largeur. La déformation de l'extrudat devient dans ce cas plus complexe et son effet sur la vitesse de friction reste inconnu. Les effets sur la résistance mécanique de joint de polypropylène observés par Hiermaier (1998) ont montré peu de différences entre le système linéaire et le système orbital.

3.3.2.4.Appareillage de soudage par friction linéaire

Les machines de soudage par vibration transmettent un mouvement oscillatoire généré par un système d'entraînement de fréquence constante ou variable et d'amplitude donnée sur l'une ou les deux pièces à souder.

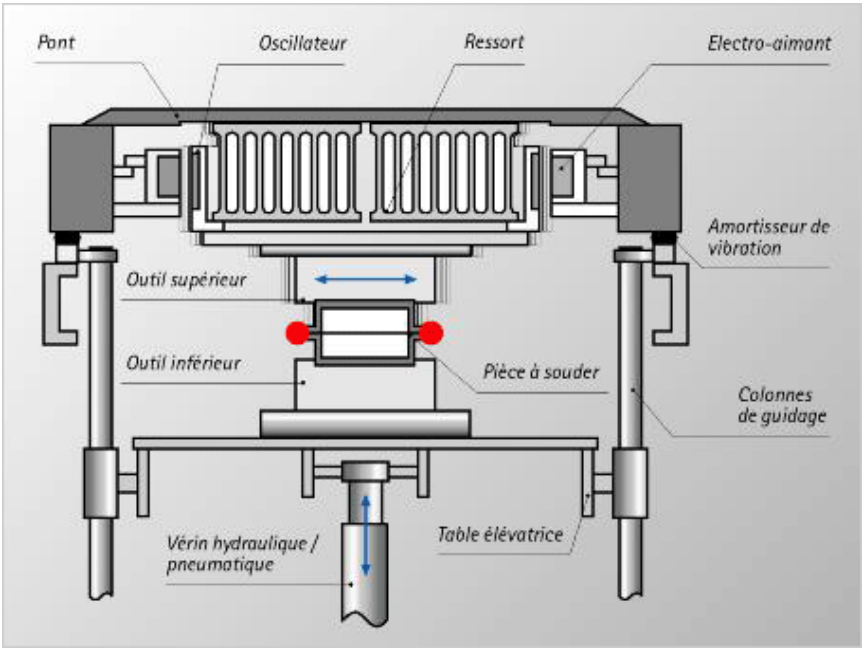


Figure 25: Principe de fonctionnement d'une machine de soudage par friction linéaire à entraînement électromagnétique (Branson Ultraschall, Dietzenbach – Allemagne).

Généralement le système d'oscillation travaille en résonance. Au même moment une pression de soudage est exercée par l'intermédiaire d'une force définie (Giese 1995). Les systèmes d'entraînement de l'oscillation sont de trois types: mécaniques, électomagnétique ou hydrauliques. Le système d'entraînement électromagnétique est basé sur la génération d'une oscillation de résonance par une excitation électromagnétique. L'oscillation de la tête vibrante des machines standards est ainsi obtenue par le biais de bobines électromagnétiques (électro-aimants), la force de rappel et de pression étant fournies par des blocs-ressort (Figure 25). Les pressions de soudage et de maintien sont générées par un système de vérin pneumatique ou hydraulique. Le procédé de soudage est généralement commandé par l'intermédaire d'un ordinateur logique programmable.

3.3.3.Soudage du bois

3.3.3.1.Historique du soudage du bois

Le terme de soudage du bois ou « wood welding technologies » n'a pas toujours eu la même signfication durant ces 15 dernières années. Ce terme apparaît la première fois en 1993 (Gerber et Gfeller 2000) pour désigner un ensemble de technologies basées sur l'assemblage du bois par l'intermédiaire d'un matériau thermoplastique fondu et redurcit grâce à une technologie du soudage. Ce sujet a fait l'objet de plusieurs projets de recherche du département Architecture, Bois et Génie Civil de la Haute Ecole Spécialisée Bernoise depuis 1993 (dont le nom était SWOOD jusqu'en 2004). Ces technologies ont été présentées comme étant de nouvelles alternatives aux adhésifs classiques permettant de réaliser des joints de façon extrêmement rapide. Divers matériaux thermoplastiques (polyamides, polycarbonates et acrylonitrile-butadien-styrene) et duroplastiques ont été testés sur des bois de feuillus et résineux. Les soudages ont été réalisés par ultrasons, par friction linéaire et enfin par friction rotative (spin welding). Il s'agissait d'assemblages surfaciques par application d'un film de thermoplastique ou d'assemblages ponctuels par l'introduction d'un tourillon thermoplastique (cas du soudage rotatif). De l'un de ces projets est née l'entreprise WoodWelding SA dont l'activité est le développement de solutions de fixation pour les produits bois et le domaine médical grâce à une technolgie de soudage ultrasons de tourillons thermoplastiques.

L'idée de souder du bois massif sans aucun autre matériau d'apport apparaît pour la première fois en 1996, telle que le témoigne le brevet d'invention de Sutthof *et al.* (1996). Ce brevet propose un procédé pour la réalisation de joints soudés par friction permettant l'assemblage de pièces de bois sur lequelles une pression est exercée simultanément à une friction entraînée par un mouvement relatif des pièces. Mais aucune précision sur les essais

de Sutthof concernant cette invention ne se trouvent dans la littérature. En 2001, Gliniorz et Natterer définissent deux types de soudage du bois (wood welding): le soudage par adhésif chaud (hot glue welding) et le soudage par pyrolyse (pyrolyse welding) sans adhésif. Les auteurs ne donnent que très peu d'informations sur les essais menés et insistent essentiellement sur les technologies utilisées (ultrasons pour le soudage par adhésif chaud et friction pour le soudage par pyrolyse). Les premières études détaillées publiées sur le soudage du bois sans adhésif seront celles de Gfeller *et al.* (2003), sur le soudage par friction linéaire, et celle de Pizzi *et al.* (2004) sur le soudage par friction rotative.

3.3.3.2.Soudage par friction linéaire du bois

La première étude scientifique exhaustive de la HESB sur le soudage par friction linéaire du bois sans adhésif est proposée par Gfeller *et al.* (2003). La technologie utilisée est le soudage par friction linéaire. Des couples d'échantillons de *Fagus sylvatica* et de *Picea abies* sont soudés ensemble avec diverses combinaisons de paramètres. La température de l'interface est mesurée par l'intermédiaire de thermocouples, donnant une valeur maximale de 170°C au moins à la fin de la vibration. Les joints sont testés mécaniquement en cisaillement (EN 205) et observés en microscopie électronique à balayage (MEB). Une analyse de la matière de l'interface soudée est réalisée par RMN^{13}C/CP-MAS ainsi qu'une analyse thermo-mécanique du joint soudé. Les auteurs expliquent que la principale cause de l'adhésion observée est la fusion de la lignine du bois.

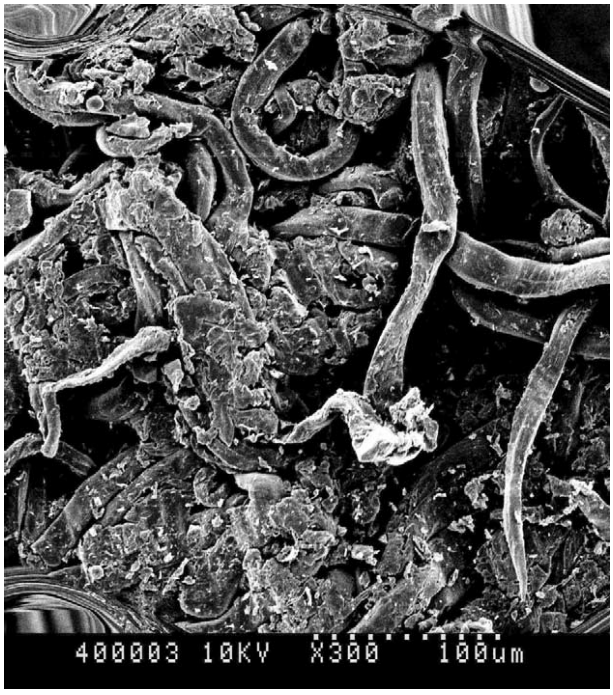


Figure 26: Image de microscopie électronique à balayage de l'interface soudée ouverte mettant en évidence l'existence d'un réseau de fibres de bois enchevêtrées et bloquées dans une matrice durcie de matériel inter-cellulaire (Gfeller *et al.* 2003).

Ils observent sur les images MEB au niveau de l'interface un enchevêtrement de fibres de bois emprisonnées dans une matrice de matériel intercellulaire fondu et re-durcit (Figure 26). Les analyses chimiques révèlent l'existence de réactions de polymérisations et des réticulations du furfural, issus de la décomposition thermique des polysaccharides, avec la lignine se déroulant probablement après la friction. Ceci explique le fait que des temps de maintien plus long donnent de meilleures résistances mécaniques au joint. Ces réactions semblent selon les auteurs avoir un effet mineur par rapport à l'ancrage mécanique des fibres enchevêtrées à l'interface. La technologie est aussi dans ce travail dénominé par l'expression « soudage par fusion du bois induite mécaniquement » (mechanically-induced wood fusion welding). Leban *et al.* (2004) effectuent ensuite des mesures de densitométrie aux rayons X des joints soudés de *Fagus sylvatica*, *Quercus sp* et de *Picea abies*. Leurs observations montrent que le soudage du bois s'accompagne d'une forte densification du matériau au niveau du joint (Figure 27).

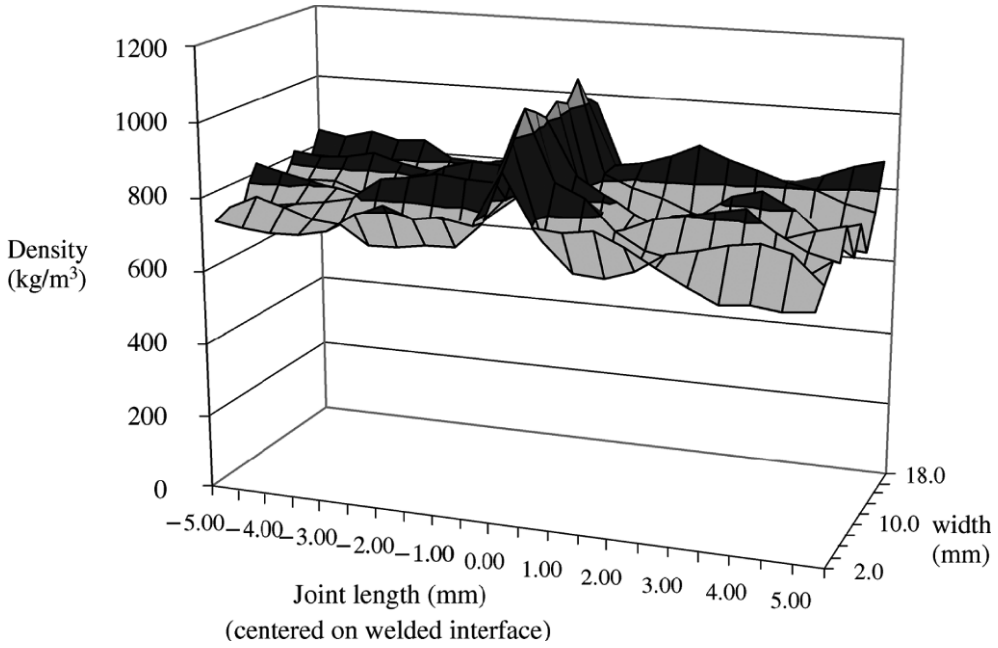


Figure 27: Résultat d'une densitométrie aux rayons X d'un joint soudé de *Picea abies* (Leban *et al.* 2004).

Plus la densification est fine et régulière et plus la résistance du joint est élevée. Les fortes différences de densité, telle que l'alternance entre bois de printemps et bois d'été, sont ainsi des facteurs limitants de la technologie.

Properzi *et al.* (2005) montrent que l'orientation des pièces de bois a une influence importante sur la solidité du joint. Les pièces soudées en fil parallèle montrent de meilleures résistances mécaniques que les pièces soudées en fil croisé.

Wieland *et al.* (2005) effectuent des observations des surfaces soudées par tomographie aux rayons X (XTM) et spectroscopie de résonance du spin électronique (ESR). Les auteurs

donnent une description des couches successives de l'interface des couches les plus éloignées aux couches les plus proches de l'interface. Ces analyses confirment la fusion du matériel inter-cellulaire et l'enchevêtrement des fibres observés par Gfeller *et al.* (2003). L'ESR permet à Wieland *et al.* (2005) de mettre en évidence une augmentation de la teneur en radicaux lors de la friction montrant que les réactions de polymérisations et condensations de la phase de maintien observées par Gfeller *et al.* (2003) pourraient suivre une voie radicalaire. Enfin, *Wieland et al.* (2005) montrent qu'une addition de certains additifs naturels (tannin de pin ou furfural) permet d'augmenter légèrement la résistance du joint soudé.

3.4.Thermographie infrarouge

Les méthodes de mesures sans contact de la température sont choisies dans le cas où le sujet à mesurer se trouve dans un environnement hostile aux mesures par contact ou que le sujet est en mouvement, trop loin ou encore trop chaud. La thermographie infrarouge (TIR) est l'une des méthodes de mesure sans contact de la température les plus flexibles et l'une des plus précises. Elle est utilisée dans des domaines de plus en plus nombreux (déperditions thermiques des bâtiments, maintenance électrique, contrôle de la qualité en production industrielle, diagnostique de certaines pathologies ou traumatisme dans le domaine médical, activités militaires, restauration des œuvres d'art, etc…).

La TIR s'effectue à l'aide de thermomètres thermiques (mesure ponctuelle) ou de caméras thermiques (mesure bi-dimensionnelle). Une caméra infrarouge possède un détecteur qui a pour fonction de fournir un thermosignal (signal électrique) proportionnel au flux rayonnant issu de la scène thermique. Souvent il s'agit de détecteurs thermiques: des microbolomètres en silicium amorphe. Pour ceux-ci, le signal est fonction de leur propre température, leur conductivité thermique évolue avec cette température. Ces microbolomètres sont rassemblés en une matrice dite "à plan focal non refroidie" (Uncooled Focal Plane area). En effet les éléments ne nécessitent pas de refroidissement mais une stabilisation thermique très fine par élément thermoélectrique Peltier (ThermaCam 2004). Enfin vient s'ajouter le dispositif de visualisation et de stockage des données. Les caméras thermiques ou caméras infrarouges sont définies par leur résolution spatiale (le plus petit objet visible) et leur résolution thermique (la plus petite différence de température perceptible).

Meloa et Carlomagno (2004a) ont proposé une revue de littérature très étendue sur les utilisations de la TIR et de ses avancées technologiques durant les 20 dernières années. L'ensemble des études reportées dans cette revue permettent de valider la TIR comme un

instrument de mesure complet et comme une nouvelle technique capable de s'adapter à des conditions difficiles dans les lesquels d'autre types de mesures sont impossibles. Parmi les différentes applications décrites les auteurs montrent que la TIR est très utilisée en dynamique des thermofluides pour l'observation du comportement des flux et la compréhension des phénomènes de chauffage et de refroidissement liés à ces fluides. Elle sert notamment beaucoup en tant que méthode non destructrice pour l'évaluation de la performance des procédés industriels (usinage, formage, assemblage par soudage et collage), la vérification de traitement spéciaux (plasma froid, réticulation) et l'évaluation de l'hétérogénéité des matériaux (détection d'inclusions, de délamination ou de fissures).

Elle semble être une méthode attractive pour la détermination du flux thermique durant le soudage (Wikle *et al.* 2001). L'efficacité de cette méthode de mesure pour le contrôle en production est documenté de façon étendue dans la littérature (Wang and Chin 1986; Banerjee et al. 1993; Davé et al. 2001; Wikle et al. 2001; Meola et al. 2004c; Venkatraman et al. 2005). Nishar *et al.* (1994) ont pu développer un système performant de contrôle du soudage à l'arc du métal avec la TIR. Meola *et al.* (2004b) montrent que le contrôle du soudage par laser de l'acier est efficace par la TIR. Des expériences de Russek (2003) montrent aussi que c'est le cas pour le soudage laser des matériaux thermoplastiques. Darras et al. (2007) effectuent des expériences de mesure en TIR sur le soudage par friction rotative d'un outil guidé le long du joint (stir friction welding) sur des plaques métalliques. Cette technologie permet l'évaluation des changements de température avec des temps de réponse très courts et des fréquences pouvant atteindre 900 Hz. Des études ont montré que la mesure par thermocouples est gênée par la vibration du fait que le contact entre les électrodes et le substrat est moins adaptée (Nishar *et al.* 1994, Gfeller et Properzi 2003, Gfeller et al. 2004)

3.5.Méthode des éléments finis dans le cadre de la modélisation du soudage

3.5.1.Modélisations et simulations des procédés de soudage

Durant les 20 dernières années de nombreuses techniques de soudage existantes ont été simulées grâce à des méthodes numériques et particulièrement par des méthodes aux éléments finis (Mackerle 2002). La simulation numérique d'un procédé de soudage est complexe étant donné qu'elle fait intervenir des interactions thermiques, mécaniques et, pour les métaux, électriques et métallurgiques. Le procédé de soudage a un aspect transitif où une zone locale et non-linéaire se tranforme en une structure élastique. La modélisation du soudage permet d'observer l'influence des paramètres géométriques des échantillons, les

transferts de chaleur, les flux des fluides, les contraintes résiduelles, la mécanique de la rupture ou encore le comportement à la fatigue des structures soudées. La modélisation requiert pour le soudage des maillages de haute densité et de grande résolution dans la zone locale soudée. Les interactions entre la zone soudée et les zones non affectées peuvent aussi être étudiées ce qui rend le calcul très complexe. Les modèles peuvent être en 2D ou 3D et traiter des contraintes et distorsions, de la prédiction de la résistance mécanique finale, des problèmes thermo-mécaniques, des problèmes thermo-viscoplastiques, des transitions de l'état ductile à l'état rigide, de la microstructure de l'interface, des imperfections de soudage, etc.

La modélisation aux éléments finis du soudage par friction a été appliquée essentiellement aux métaux : acier 36CrNiMo4 (Fu *et al.* 2003), Ti 6A14V (Vairis et Frost 1999 et 2000) ou encore aciers A45 et A34HNM (Kubiszyn and Pietras 2003). Dans ces trois cas les auteurs ont construit des modèles numériques bi- ou tridimensionnaux leur permettant de simuler la distribution et l'intensité du flux thermique dans le joint, les effets des changements thermiques sur le stress vibrationnel, l'évolution des déformations du matériau et l'effet des paramètres du procédé sur le comportement thermique du matériau. Vairis et Frost (1999 et 2000) ont même procédé à la simulation numérique de la phase d'extrusion lors du soudage par friction linéaire. Cependant ces résultats portent sur des matériaux dont le comportement thermique est isotrope et qui sont généralement très conducteur de chaleur ce qui les rend difficilement comparables au soudage du bois.

3.5.2.Modélisations aux éléments finis appliqués au bois

La méthode des éléments finis (FEM) est une méthode d'approximation numérique adaptée à la résolution d'équations différentielles. Elle permet de déterminer des contraintes ou encore des flux dans un champ donné. La base de la méthode se situe dans la discrètisation de la région à analyser en un nombre défini d'éléments réguliers de taille déterminée. Une fonction mathématique est définie par unité et appliquée aux éléments en termes de paramètres nodaux inconnus. L'anayse FEM utilise des principes variables pour déterminer les valeurs optimales des paramètres inconnus aux nœuds et par conséquent la fonction optimale (Fagan 1992).

Dans les 10 dernières années la FEM est devue la technique prédominante pour l'analyse des phénomènes physiques dans les domaines de la structure, des solides et de la mécanique ainsi que pour la résolution de problèmes dans ces champs d'études (Mackerle 2005). Pour le bois la FEM est utilisée dans les domaines de la construction, de l'adhésion et de l'assemblage, des problèmes de mécanique de la rupture, des procédés de séchages et des propriétés thermiques incluant la simulation des procédés tels que la fabrication des panneaux dérivés du bois impliquant un chauffage.

Le principal problème est que le bois est un matériau anisotrope pouvant présenter de nombreuses irrégularités de grain ou encore des nœuds, ce qui rend naturellement sa modélisation difficile. Cependant dans la plupart des études numériques on l'assimile à un matériau orthotrope en lui appliquant certaines conditions supplémentaires qui permettent de se rapprocher de la strucuture naturelle du matériau. Pour simuler une combinaison de problèmes thermiques, mécaniques et de flux de matière tel que c'est le cas du soudage il est donc préférable dans un premier temps de procéder à une simplification de la géométrie du materiau et de le simuler comme étant orthotrope.

4.Matériel et Méthodes

4.1.Eprouvettes d'essais

4.1.1.Matériaux

Les essais de soudage linéaire ont été menés sur différentes essences de bois et matériaux dérivés du bois. Ces matériaux sont utilisés dans la pratique pour la confection de meubles ou d'éléments de structures en bois, pour des utilisations aussi bien en intérieur qu'à l'exterieur. L'essence la plus utilisée est *Fagus sylvatica L.*, qui a servi à la caractérisation du développement de la microstructure. Cependant *Acer campestre L.* et *Quercus robur L.* ont aussi été utilisées lors des analyses. Pour la détermination de l'influence du substrat sur le soudage de nombreuses essences ont été utilisées : *Abies alba M., Betula alba, Carpinus betulus L., Paulownia tomentosa, Picea abies L., Pinus sylvestris L, Populus nigra L., Robinia pseudoacacia L.*, etc. Les matériaux dérivés du bois suivants ont aussi été utilisés : le panneau de particules, le panneau de grandes particules orientées (OSB), le contreplaqué d'okoumé, le contreplaqué mixte hêtre/peuplier et le panneau de fibres à haute densité (MDF) (Tableau 2). Quelque soit le matériau ou le bois utilisé, celui-ci a été conditionné avant et après les essais à 65 ± 5% d'humidité et 20 ± 5°C afin d'avoir une humidité d'équilibre du bois d'environ 12%. Le débit de bois (sur dosse, quartier ou faux-quartier) a été choisi selon les besoins des différents essais. Lorsqu'il n'est pas précisé, il s'agit d'un débit sur faux-quartier. Les éprouvettes ont été usinées de façon à ce qu'elles ne contiennent aucun des défauts suivants : nœuds, fil tord, poches de résines, colorations anormales ou fortes différences de densité visibles. La surface à souder des pièces est rabotée sauf dans les cas spécifiques qui seront précisés.

4.1.2.Géométrie

Les échantillons se présentent sous forme de parallélépipèdes rectangle de dimension 15 x 20 x 150 mm. Les parallélépipèdes sont toujours assemblés par deux sur la surface 20 x 150 mm et forment donc une interface de soudage de 30 cm^2. Dans le cas de mesures infrarouge de la température la hauteur des échantillons est plus élevée : il s'agit de parallélépipèdes de dimension 30 x 20 x 150 mm assemblés sur la surface 20 x 150 mm. Pour les besoins d'essais spécifiques tels que la mesure du taux de restitution d'énergie, les tests sur des grandes surfaces, le soudage de surfaces profilées et les développements pré-industriels, d'autres dimensions d'éprouvettes spécifiques ont été développées, il s'agit cependant toujours de la même géométrie c'est-à-dire de parallélépipèdes. Selon les besoins, trois principales orientations des pièces ont été utilisées : radiale (sur quartier), tangentielle (sur dosse) et mi-radial mi-tangentielle (sur faux-quartier). Elles sont indiquées

par la suite par la valeur de l'angle formé entre les cernes d'accroissement naturel du bois et la ligne de soudage tel qu'il est décrit sur la Figure 28.

Tableau 2 : Caractéristiques des matériaux testés pour le soudage linéaire à 12% d'humidité (* densité à 4% d'humidité environ).

Matériaux	Densité	Reférence
Abies alba M.	484 ± 55 kg/m^3	mesurée
Acer campestre L.	626 ± 10 kg/m^3	mesurée
Acer saccharum Marsch.	740 ± 40 kg/m^3	Wagenführ (2000)
Betula alba (traitement Plato)	577 ± 20 kg/m^3*	Plato®wood
Betula alleghaniensis Britt.	670 ± 40 kg/m^3	Wagenführ (2000)
Carpinus betulus L.	779 ± 10 kg/m^3	mesurée
Contreplaqué d'okoumé (épaisseur 18 mm)	550 ± 50 kg/m^3	Plysorol
Contreplaqué mixte hêtre/peuplier (épaisseur 20 mm)	600 ± 50 kg/m^3	Hess & Co
Fagus sylvatica L.	670 ± 40 kg/m^3	mesurée
Fagus sylvatica L. (traitement Plato)	668 ± 70 kg/m^3*	Plato®wood
Hevea brasiliensis	610 ± 10 kg/m^3	Wagenführ (2000)
MDF (épaisseur 19 mm)	750 ± 10 kg/m^3	Kronogroup
OSB (épaisseur 19 mm)	640 ± 10 kg/m^3	Kronogroup
Panneau de particules (épaisseur 19 mm)	600 ± 10 kg/m^3	Kronogroup
Paulownia tomentosa	300 ± 30 kg/m^3	Wagenführ (2000)
Picea abies L.	415 ± 10 kg/m^3	mesurée
Picea mariana Mill.	410 ± 10 kg/m^3	Wagenführ (2000)
Picea sitchensis	450 ± 90 kg/m^3	Wagenführ (2000)
Pinus strobus L.	400 ± 60 kg/m^3	Wagenführ (2000)
Pinus sylvestris L.	632 ± 70 kg/m^3	mesurée
Populus nigra L.	450 ± 40 kg/m^3	Wagenführ (2000)
Populus sp. (traitement Plato)	446 ± 36 kg/m^3*	Plato®wood
Quercus robur L.	731 ± 46 kg/m^3	mesurée
Robinia pseudoacacia L.	749 ± 70 kg/m^3	mesurée

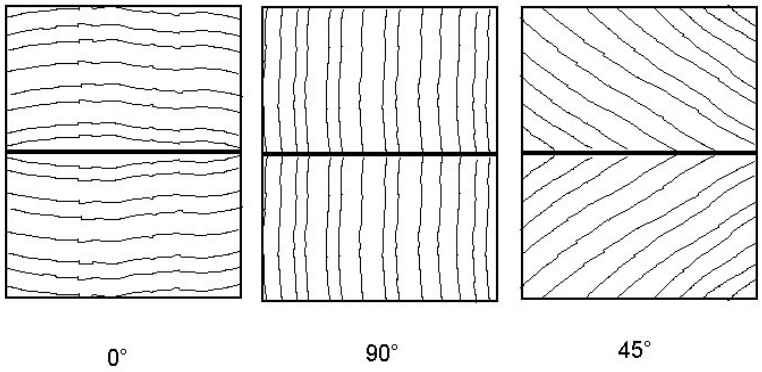


Figure 28: Direction du plan de soudage par rapport aux cernes d'accroissement naturel. De gauche à droite : orientation tangentielle (0°), orientation radiale (90°), orientation mi-radiale mi-tangentielle (45°).

Pour les essais standards la valeur de l'angle utilisée a été de 45°. Si une autre valeur de l'angle a été utilisée, elle est alors indiquée dans le texte. Pour d'autre type d'essais spécifiques on a effectué des soudages en bois de bout, cela signifie que le plan de soudage est perpendiculaire au fil du bois. Pour certains essais de soudage les pièces ont été usinées avec un profil et contre-profil (5.6). Trois types de profils ont été expérimentés : le profil en entures multiples (A), le profil en dents de scie (B) et le profil en dent de scie modifié (C) tels qu'ils sont présentés sur la Figure 29. Ces profils ont été usinés sur toute la longueur du chant à souder.

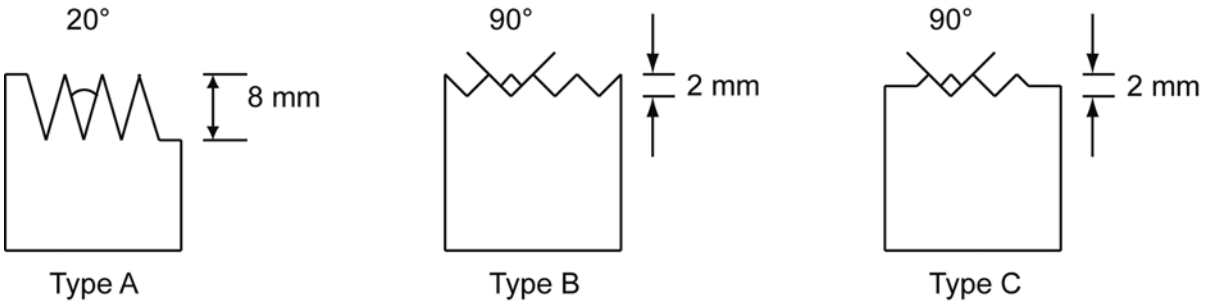


Figure 29: Schéma des types A, B et C de profils testés pour le soudage par friction linéaire.

4.1.3.Traitements thermiques du bois

Pour certains essais le bois a été traité thermiquement (5.5.4.1) par le procédé Plato Wood®. Ce traitement a été effectué par Plato International BV (Pays-Bas). Les pièces traitées étaient de dimensions 40 x 100 x 3000 mm et d'humidité 16-12% (*Fagus sylvatica L., Betula alba* et *Populus sp.*). Le traitement s'effectue en deux étapes. Dans la première étape les pièces sont traitées en environnement humide sous pression super atmosphérique (6-8 bar) en utilisant de la vapeur saturée comme moyen de chauffage. Cette « hydro thermolyse à la vapeur » (steam hydrothermolysis) a été effectuée à 165°C sur l'installation industrielle. Le refroidissement est ensuite mené par une baisse rapide et contrôlée de la pression et par

une circulation d'eau froide dans les parois du réacteur. Les pièces de bois ont été ensuite séchées par une méthode conventionnelle à 50-60°C. Après ce séchage les pièces sont thermiquement traitées dans un « four de traitement » (curing kiln) spécial, il s'agit de la deuxième étape. Le traitement est effectué sous conditions atmosphériques sèches à 170-180°C. Pendant cette étape de la vapeur d'eau surchauffée a été utilisée afin d'exclure l'oxygène réduisant ainsi les risques d'incendie et les réactions d'oxydation indésirables. Les pièces ont ensuite été découpées aux dimensions standards de soudage (4.1.2).

4.2.Soudage linéaire

4.2.1.Machines de soudage linéaire

Les études sur le soudage ont été effectuées sur la machine de soudage par vibration linéaire modèle 2700 de Branson Ultraschall. Cette machine est équipée d'une seule tête de vibration et d'un outil de fixation des pièces pour une surface à souder de 20 x 150 mm, son système d'asservissement est analogique. Dans les cas de développements préindustriels et d'essais spécifiques, la machine M-DT24L de Branson Ultraschall a été utilisée. Il s'agit d'un prototype voué aux productions pilotes. Plusieurs outils de fixation de pièces de diverses dimensions ont été développés sur cette machine (5.6). D'autre part elle présente des caractéristiques de puissance et de dimension plus élevées grâce notamment à quatre têtes de vibration synchronisées, un système numérique d'asservissement, des capteurs de pression et de déplacement et un système de vérin hydraulique permettant d'obtenir des pressions beaucoup plus élevées que le modèle 2700 (informations complémentaires dans l'Annexe 9.1). Sur cette machine, les données des cycles de soudage peuvent être enregistrées et traitées informatiquement. Ces deux machines sont des installations du laboratoire de la Haute École Spécialisée Bernoise.

4.2.2.Paramètres de soudage

En soudage par vibration linéaire, les paramètres influençant le procédé et, par conséquent, la résistance finale des assemblages sont : la pression de soudage p_s, la pression de maintien p_m, le temps de soudage t_s, le temps de maintien t_m, l'amplitude a et la fréquence de vibration f. La fréquence f est constante, soit 100 Hz, et est donnée par le système d'entraînement électromagnétique. Le temps de maintien est généralement de 5 s et l'amplitude de 3 mm (1,5 mm de chaque côté) sauf spécifications spéciales indiquées dans l'analyse des résultats. Pour les essais, p_m est maintenue identique à p_s, sauf lorsque ceci est spécifié. Pour les bois profilés (4.1.2) p_s et p_m correspondent à la pression sur la surface

du chant avant profilage et non la surface totale de contact. Les paramètres principaux que l'on a fait varier lors des études sont t_s, p_s et a. Pour certains essais sur la machine M-DT24L, la perte dimensionelle a été utilisée comme paramètre de soudage. En effet le système d'asservissement permet de stopper la vibration non pas selon un temps chronométré mais selon le déplacement vertical de la table inférieure de la machine grâce à un capteur de déplacement. Ceci a été testé lors d'essais de développement pré-industriel de la technologie de soudage. Cette méthode permet de garantir des dimensions d'échantillons identiques quelque soit le temps de soudage t_s. Le déplacement de soudage d_s et le déplacement de maintien d_m ont été donc ajoutés aux paramètres de soudage standards (Tableau 3).

Tableau 3: Ordre de grandeur des paramètres de soudages étudiés.

Paramètre	Abbréviation	Unité	Ordre de grandeur
Pression de soudage	p_s	N/mm^2	0,5 – 3
Pression de maintien	p_m	N/mm^2	0,5 – 3
Temps de soudage	t_s	s	0,5 - 15,0
Temps de maintien	t_m	s	2,0 - 35,0
Amplitude de vibration	a	mm	1 – 4
Fréquence de vibration	f	Hz	Fixe : 100
Déplacement de soudage	d_s	mm	0,1 - 4
Déplacement de maintien	d_m	mm	0,1 - 4

4.3.Méthodes et matériel d'analyse des liaisons soudées

La structure des liaisons soudées a été analysée ainsi que leurs performances mécaniques. La structure de la ligne de soudage a été observée lors de sa formation *in situ* grâce à la TIR et, après soudage, grâce à des observations macro- et microscopiques. Les tests mécaniques effectués sont : la traction perpendiculaire, le cisaillement par la traction, la flexion 4 points et la mesure du taux de restitution d'énergie en mode I par l'éprouvette DCB. Enfin des analyses chimiques des fumées et des liaisons soudées ont été effectuées.

4.3.1.Thermographie infrarouge

4.3.1.1.Mesures de température pendant le procédé de soudage

Les éprouvettes pour la mesure de température sont légèrement plus hautes que les éprouvettes standards (4.1.2). En effet, le métal ayant une forte capacité à réfléchir le rayonnement infrarouge, particulièrement lorsqu'il est plan et lisse, il est important que la zone à mesurer soit éloignée de l'outil de soudage. Avec des éprouvettes plus hautes, les erreurs d'émissivité du matériau dues à la proximité du métal sont éliminées. La caméra infrarouge utilisée est une ThermaCAM® S60 de Flir avec les caractéristiques techniques listées dans le Tableau 4.

Tableau 4: Caractéristiques techniques de la caméra infrarouge ThermaCAM S60.

Caractéristiques	Spécifications
Réponse spectrale	7,5 – 13 µm
Détecteur	Focal Plane Area (FPA) à microbolomètres non refroidis
Résolution	320 x 240 pixels
Sensibilité	De 0,08°C à 30°C pour 50/60 Hz
Gamme de mesure	-40°C à +500°C
Corrections	Automatiques (transmission atmosphérique, température interne, transmission optique et optique externe)

L'optique de la caméra est positionnée à une distance d de 370 mm de la surface de l'échantillon (Figure 30).

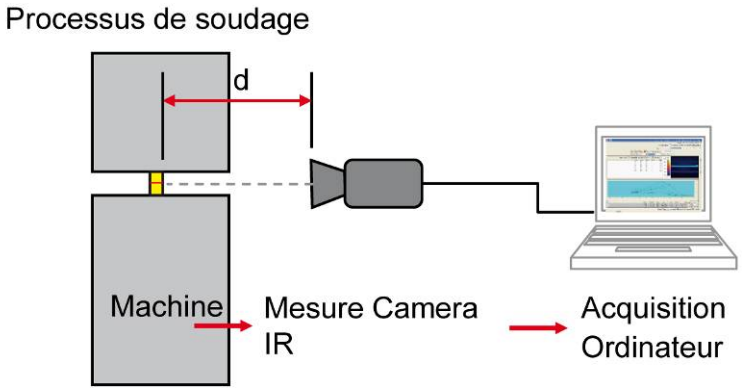


Figure 30: Description de l'installation pour la mesure de température infrarouge.

Pour faciliter le positionnement et l'ajustement de la caméra, les contours de l'éprouvette sont mis en évidence en réchauffant la surface de l'éprouvette grâce à un décapeur thermique tout en ne dépassant jamais une température de 40°C de la surface du bois. A

cette distance l'échelle de la thermographie est de 2 pix./mm. Les conditions de mesure sont de 20°C et de 50% d'humidité relative de l'air. Chaque essai est filmé depuis 2 secondes avant le début de la vibration jusqu'à 2 secondes après la fin du temps de maintien avec une résolution de 50 images/s. Le traitement des données est ensuite réalisé avec le logiciel ThermaCAM Researcher. Les films thermographiques sont traités en plusieurs étapes avec différents outils d'analyse afin d'en ressortir des grandeurs caractéristiques permettant de comparer les séquences entre elles. La valeur de l'émissivité du bois rabotée à 20°C choisie est celle conseillée pour les utilisateurs de ThermaCAM (ThermaCam Resarcher 2004) c'est-à-dire 0,90. Une fois que la valeur de l'émissivité a été corrigée sur la séquence, les températures peuvent être relevées. Six différentes étapes sont à effectuer pour déterminer les valeurs de températures nécessaires à une analyse pertinente. Elles sont présentées ci-dessous :

Etape 1: Détermination de la température maximale de l'image.

C'est le premier critère de comparaison choisi. Pour cela on lance un enregistrement de la valeur maximale de la température de la scène thermique pendant tout le processus de soudage. La courbe obtenue est ensuite exportée sous forme de données. Ceci nous permet alors de donner la valeur maximale de la température pour le film entier. Il est important, lors de cette étape, de relever la date correspondante à la température maximale. En effet cette date servira aux étapes suivantes.

Etape 2: Détermination de la température moyenne maximale de la ligne de soudure.

Grâce à des objets d'analyse de type « ligne », il est possible de suivre la température moyenne de la ligne de soudage. On trace alors cinq lignes horizontales sur la ligne de soudage décalées d'un pixel les unes par rapport aux autres. On effectue ensuite un enregistrement de la valeur moyenne de ces lignes. La moyenne la plus élevée est récupérée par transfert des données de la courbe. (La température maximale de l'image peut-être recherchée en même temps que la température moyenne maximale de la ligne de soudage).

Etape 3 : Détermination de la pente de la courbe de la température maximale moyenne.

Pour déterminer la pente on utilise les données récupérées lors de l'opération précédente et on trace la courbe d'augmentation de la température en fonction du temps seulement lors de la période de vibration. Une fois cette courbe obtenue, on trace la courbe de régression qui correspond. L'équation de cette courbe nous donne la pente de la courbe.

Etape 4: Profil de la température maximale sur la ligne de soudage.

En utilisant les données précédentes on recueille les valeurs de température de la ligne dont la température moyenne la plus élevée à la date où la température est maximale. On obtient

ainsi le profil de la ligne de soudure. Celui-ci nous permet d'apprécier l'homogénéité de la soudure le long de l'éprouvette.

Etape 5: Evolution de la diffusion de la température sur la largeur de l'éprouvette lors du soudage.

On trace une ligne verticale dont la longueur correspond à la largeur du couple d'éprouvettes visibles. La ligne est placée au centre de l'éprouvette (Figure 31).

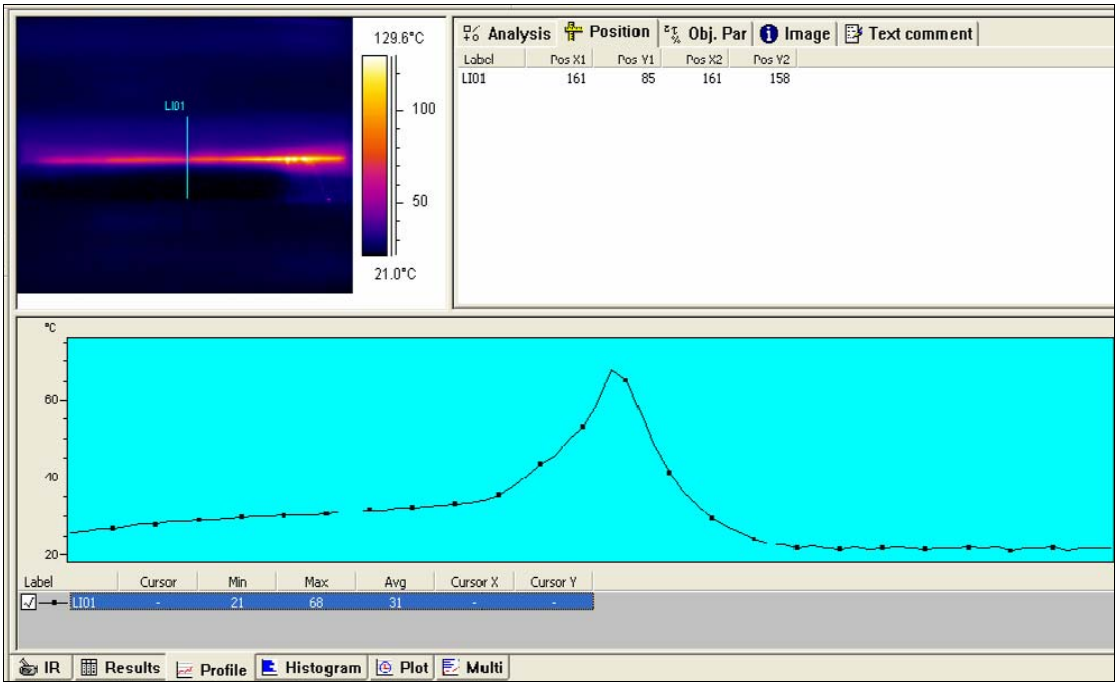


Figure 31: Analyse du profil de la température sur la largeur de l'éprouvette lors du soudage.

On effectue ensuite les relevés des valeurs du profil de température de cette ligne à intervalles réguliers (toutes les 0,5 secondes). On obtient alors un graphique en trois dimensions qui traduit l'évolution de la température au cours du temps de soudage au niveau de la largeur de l'éprouvette.

Etape 6: Profil de température sur la surface de l'éprouvette à la date où la température est maximale.

On peut grâce à cette analyse comparer l'état de diffusion de la température de l'éprouvette en cinq lignes représentatives de sa surface. On procède de la même manière que dans l'étape 5 mais en utilisant plusieurs lignes au lieu d'une (Figure 32). Plus on utilisera de lignes et plus la mesure est détaillée. On se place ensuite à la date de la température maximale de l'image et on relève les profils de températures des lignes.

Etape 7: Variation de la température au cours du soudage sur la longueur de l'éprouvette.

On peut par cette analyse observer les conséquences de la longueur de l'éprouvette sur la température du soudage, mesurer les effets de bord et observer d'éventuelles

hétérogénéités de soudage sur la longueur de la ligne. Pour effectuer cette analyse on prend comme source 15 points de référence sur la ligne de soudage. Ces points sont les températures maximales de plages circulaires (objets de type « cercle ») disposées sur la ligne de soudage. Les cercles sont tous identiques (9 pixels de diamètre, soit 4,2 mm), situés à la même ordonnée qui correspond à la ligne de soudage et espacés de 20 pixels (Figure 33).

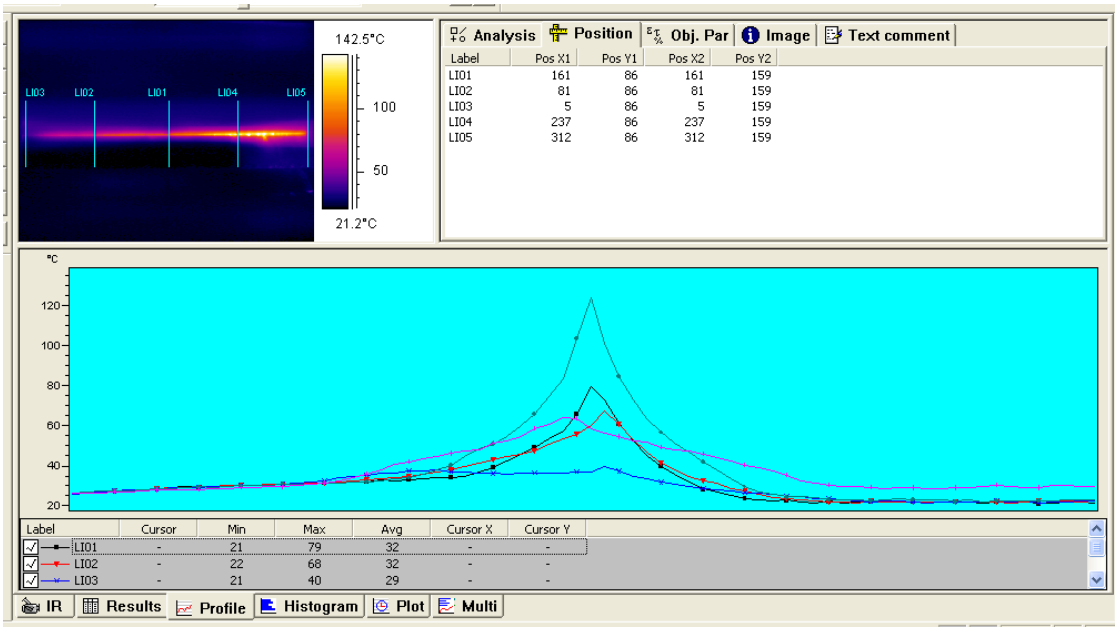


Figure 32: Analyse de la répartition surfacique de la température à la température maximale lors du soudage.

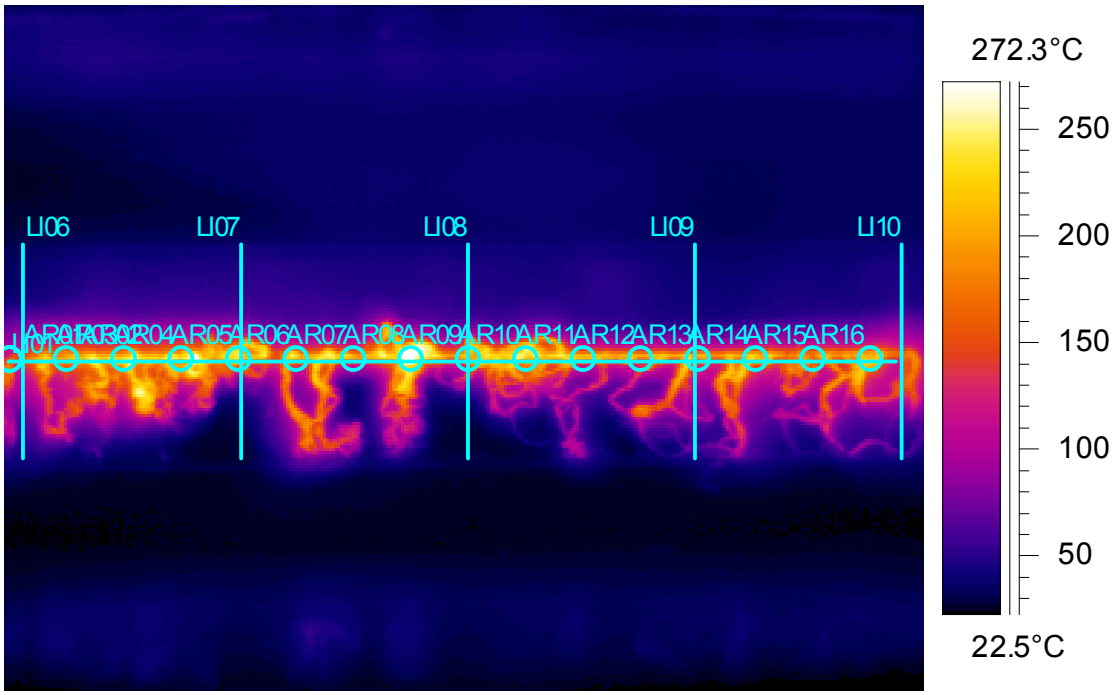


Figure 33: Points de contrôle pour la mesure de température infrarouge le long de la ligne de soudage.

On effectue ensuite un enregistrement des données de ces points pendant toute la durée du soudage. Dans le traitement on a choisi de prendre les valeurs de ces points chaque demi-seconde. On obtient ainsi un graphique en 3 dimensions.

4.3.1.2.Mesure de température interne

Pour ces thermographies, on a utilisé des éprouvettes de *Fagus sylvatica* avec une géométrie telle qu'elle est décrite en 4.1.2 et avec une orientation des cernes d'accroissement naturel de 45° vis-à-vis du plan de soudage. Les paramètres de soudage sont décrits dans le Tableau 5.

Tableau 5: Paramètres de soudage des essais de mesures de température interne.

Paramètre	**Valeur**
Machine	BRANSON 2700 en mode automatique
a	3,0 mm
p_s	1.33 N/mm^2
t_s	4 s
t_m	2 s

Les surfaces étaient rabotées. L'essai s'est déroulé comme suit : lors du soudage de l'éprouvette le film a été déclenché à 4s c'est-à-dire juste à la fin de la vibration. Devant la caméra était installé un étau pour permettre le maintien de la pièce.

Figure 34: Ouverture d'un joint soudé filmée par caméra infrarouge.

Celle-ci a ensuite été ouverte le plus rapidement possible à l'aide d'un ciseau à bois et d'un marteau (Figure 34). On a ensuite relevé la température maximale de chaque image de cette thermographie (4.3.1.1). Pour chaque échantillon on obtient une courbe typique telle qu'elle est présentée sur la Figure 35.

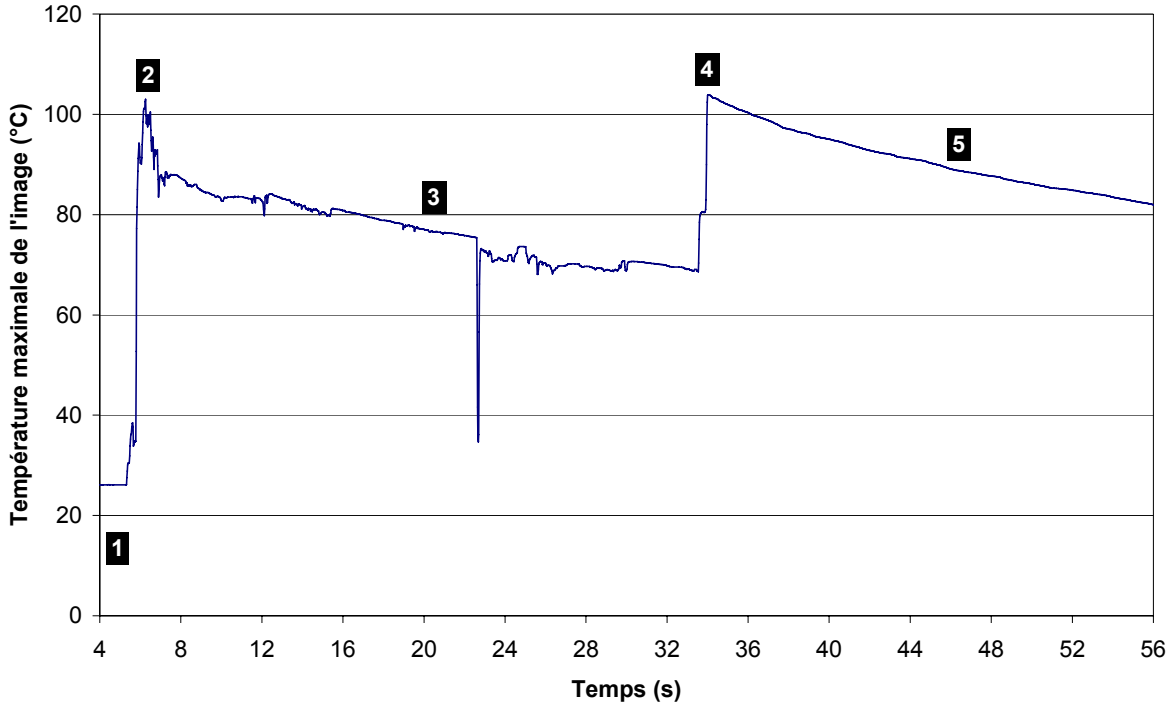


Figure 35: Relevé de températures maximales lors de l'ouverture d'une éprouvette après soudage.

Les différents pics correspondent aux pas successifs de l'opération :

1 : Installation sans éprouvette

2 : Arrivée de l'éprouvette dans le champ de la caméra

3 : Installation de l'éprouvette et opération de séparation des deux pièces

4 : Eprouvette ouverte

5 : Refroidissement du joint au contact de l'air.

Les captures d'images du fil thermographique suivant correspondent à ces pas successifs (Figure 36). La valeur maximale de température du 4ème pas est relevée pour chaque échantillon ainsi que la date (en s) à laquelle elle correspond par rapport au début de la vibration.

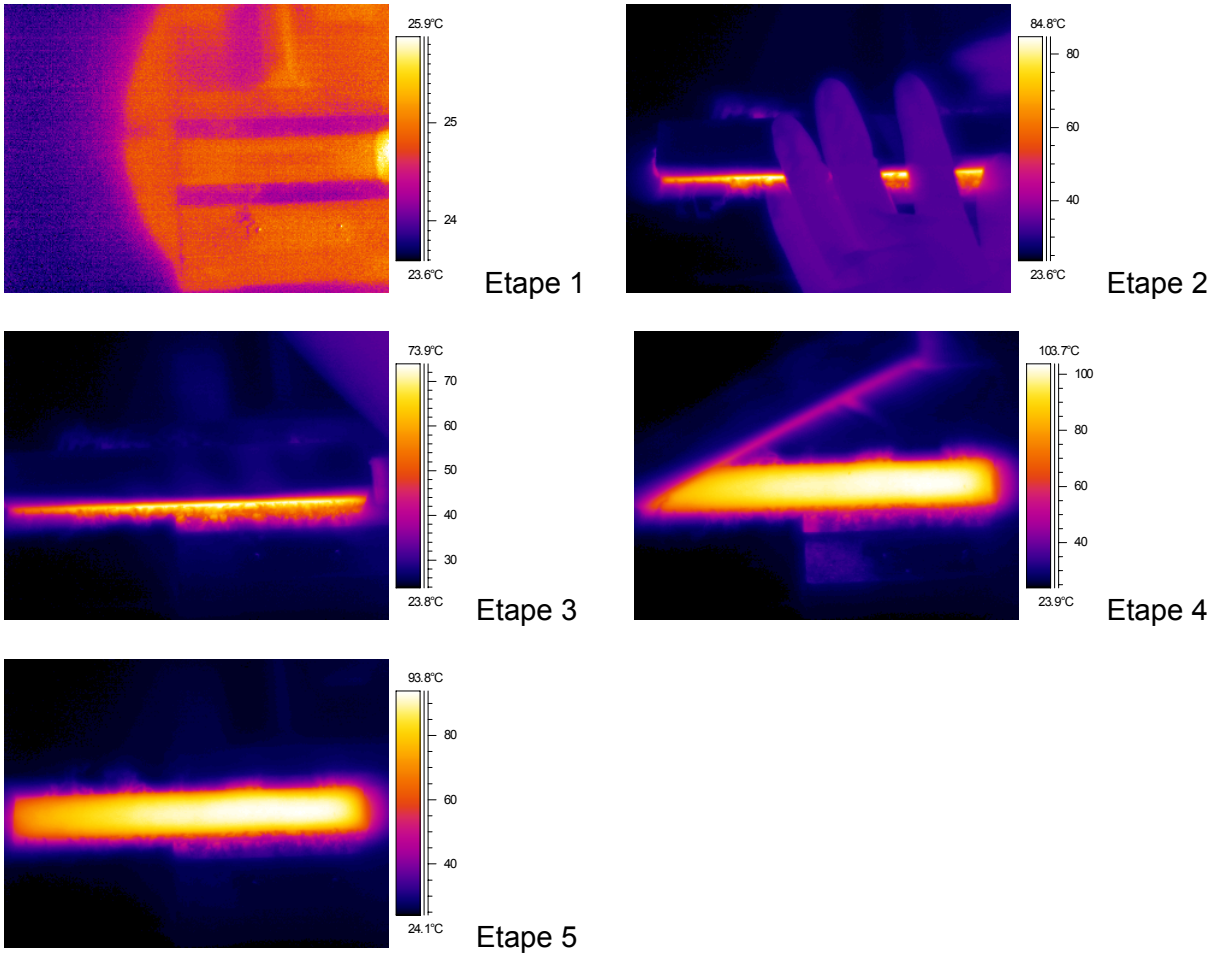


Figure 36: Pas successifs sur une TIR lors de l'ouverture d'une éprouvette.

4.3.2.Microscopie optique en lumière réfléchie

Pour l'observation au microscope en lumière réfléchie, des petits échantillons de 20 x 10 x 10 mm ont été découpés dans les échantillons de bois soudés pour obtenir des sections transversales (A) ou longitudinales (B) du joint (Figure 37).

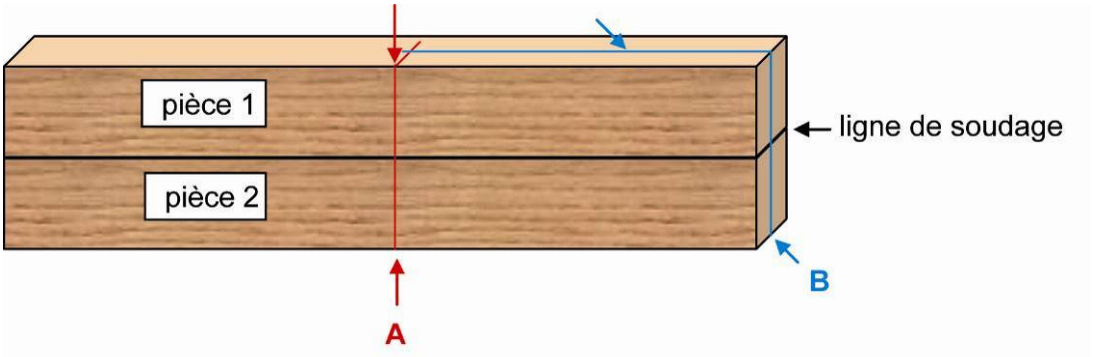


Figure 37: Schéma des coupes effectuées sur les échantillons soudés pour les observations microscopiques.

Ces petits échantillons sont ensuite coulés dans de la résine époxy (système Struers). Après durcissement (au moins 24 heures) les pièces, emprisonnées dans la résine époxy sont ensuite polie sur une polisseuse Struers en utilisant successivement des papiers de grain de plus en plus fin jusqu'à un papier tissé et pour finir un papier dont la surface est recouverte d'un agent chimique (MD Chel de Struers). Ceci permet d'obtenir un état de la surface parfaitement lisse et donc une coupe nette et parfaitement analysable. D'autre part, le sertissage sous vide avec la résine époxy permet de bien conserver les échantillons et donc de faciliter les observations ultérieures. Le microscope utilisé est un Leica DMLM (25-500 X). Les images ont été capturées par l'intermédiaires d'une caméra numérique Leica DC 300 et traitées sur le logiciel Leica IM 1000. Les mesures ont été faites sur 3 éprouvettes pour chaque temps de soudage et à 3 endroits sur chacune de ces éprouvettes perpendiculairement au plan de soudage (Figure 38).

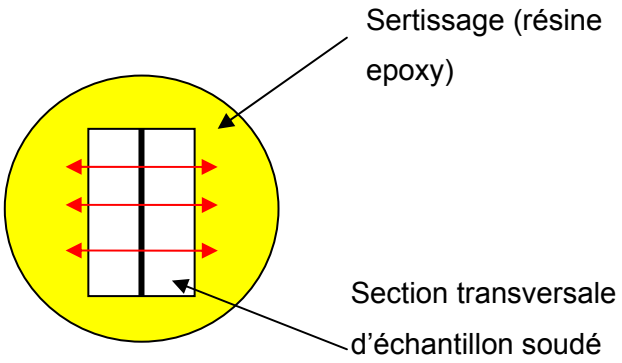


Figure 38: Schéma de la méthode de mesure de la largeur des zones atteintes par le soudage au microscope (les flèches rouges indiquent le sens de la mesure).

4.3.3.Microscopie électronique à balayage

Pour les images en Microscopie Electronique à Balayage (MEB), les éprouvettes ont été fendues au niveau du joint et la surface noircie a été métallisée avec de l'or-palladium. L'équipement utilisé était un microscope électronique à balayage Hitachi S-520. Un microscope électronique à balayage LEO 1450 VP à pression variable a également été utilisé. Les échantillons ont été introduits dans la chambre d'analyse sans aucun traitement au carbone. Toutes les images ont été obtenues avec une accélération à 20kV, le filament utilisé était de 2.715 A. La pression dans la chambre était comprise entre 50 et 54 Pa. Les magnifications sont spécifiées sur les figures.

4.3.4.Microdensitométrie aux rayons X

Des sections de 1,88 ± 1 mm d'épaisseur sont prélevées dans les échantillons soudés en suivant une coupe transversale A (Figure 37) et analysées par microdensitométrie aux

rayons X. L'équipement se compose d'un tube à rayons X produisant une radiation douce « soft rays » à un haut niveau d'énergie avec des caractéristiques d'ondes longues et émises à travers une fenêtre de béryllium. La distance au tube est de 2,5m. Cette distance est importante pour minimiser le flou de l'image sur le film utilisé. Les conditions d'exposition classiques sont : 4 h, 7,5 kW et 12 mA. Deux échantillons de calibration sont placés sur chaque négatif afin de pouvoir calculer la densité du bois. Les échantillons sont testés de cette manière sur un équipement composé d'un générateur électrique (Inel XRG3000), d'un tube à rayons X (Siemens FK60-04 Mo, 60 kV, 2 kW) et d'un film négatif Kodak (Industrex M100). Pour chaque échantillon une carte de densité est ensuite effectuée et les valeurs sont reportées sur 150 colonnes et 30 lignes. Ensuite une valeur moyenne des 30 lignes est calculée et permet d'obtenir le profil moyen de l'éprouvette.

4.3.5.Tests mécaniques

4.3.5.1.Cisaillement

Les tests de cisaillement par la traction sont effectués selon les indications de la norme EN 205 (European Standard 2003). Des couples de dimensions standards (4.1.2) ont été soit calibrés pour avoir une épaisseur de 10 mm (5 mm de part et d'autre de la ligne de soudage) ou alors ont été testés avec leur épaisseur de fabrication (30 mm). Les tests de cisaillement en traction sont menés sur la machine universelle de test Zwick 1454 équipée de pinces serrantes permettant le maintien de l'éprouvette (Figure 39). Les tests sont effectués à la vitesse de 2mm/min.

4.3.5.2.Traction

Selon la géométrie des pièces soudées il n'était pas toujours convenable d'effectuer des tests en cisaillement. Des tests de traction perpendiculaire ont donc été effectués en utilisant les mêmes paramètres de test que pour les essais en cisaillement et sur la même machine de test (4.3.5.1) mais avec des montages différents. Deux types de tests ont été réalisés. Dans le cas de pièces soudées où la largeur de l'éprouvette (dimension de part et d'autre de la ligne de soudage) était importante (supérieure à 50 mm) et de longueur plutôt réduite, les essais ont été effectuées en utilisant le montage avec pinces serrantes pour le cisaillement par la traction (4.3.5.1). Les tests sont effectués à la vitesse de 2mm/min. Dans le cas de soudage d'éprouvettes de petites dimensions (longueur du plan de soudage inférieure à 50 mm) on a effectué des tests de traction perpendiculaire en utilisant le montage destiné à la mesure de cohésion interne des panneaux dérivés bois (EN 319). Dans ce cas les éprouvettes ont été collées sur des pièces métalliques avec une colle hotmelt. Les tests sont effectués à la vitesse de 10 mm/min. La Figure 39 présente les différents types de montages

pour les tests au cisaillement et à la traction effectés sur les différentes éprouvettes soudées. La ligne rouge représente le plan de soudage.

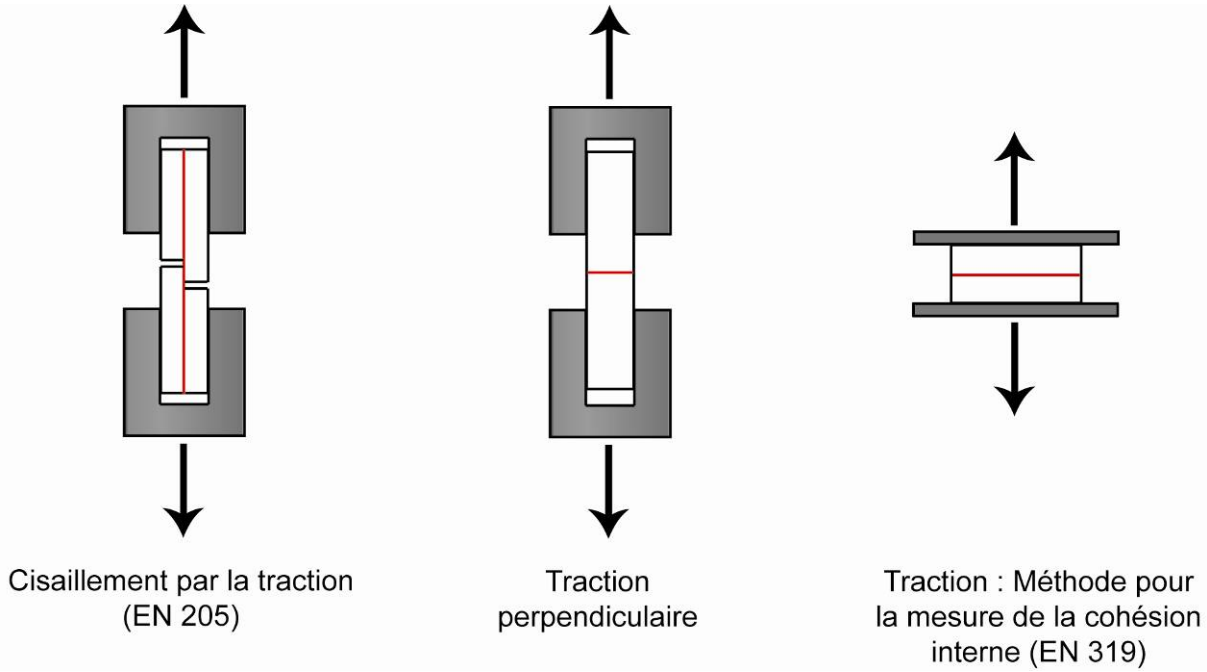


Figure 39: Différentes méthodes de tests mécaniques en traction des éprouvettes soudées.

4.3.5.3.Essais cycliques en flexion quatre points

Ces essais ont pour but de déterminer les limites de chargement et de comprendre le comportement mécanique des connections. Les essais cycliques en flexion quatre points ont été effectués avec des échantillons de *Fagus sylvatica L.* soudés sous forme de poutres lamellées-soudées (5.6) et sous forme de poutre laméllée-collées avec un adhésif de type Polyvinylacétate (PVAc) Collano FL 310. Les poutres étaient composées de 4 lamelles de dimension 45 x 20 x 1650 mm assemblées sur leur surface 45 x 1650 mm afin de former des poutres de section 80 x 45 mm et de longueur 1650 mm. Les poutres laméllées-soudées ont été préparées avec les paramètres indiqués dans le Tableau 6.

Tableau 6: Paramètres de soudage pour les essais de chargement cyclique.

Paramètre	**Valeur**
Machine	BRANSON M-DT24L en mode automatique
a	3,4 mm
p_s	0.75 N/mm^2
d_s	0,4 mm
t_m	10 s

Le chargement cyclique est un chargement dont l'intensité varie de façon périodique. Les essais cycliques de flexion quatre points ont été réalisés sur un banc d'essais équipé de deux vérins hydrauliques permettant d'appliquer la charge voulue et commandés grâce au logiciel DionPro. Les deux points de charge étaient situés à 1/3 de la distance entre les appuis depuis chaque extrémité (Figure 40).

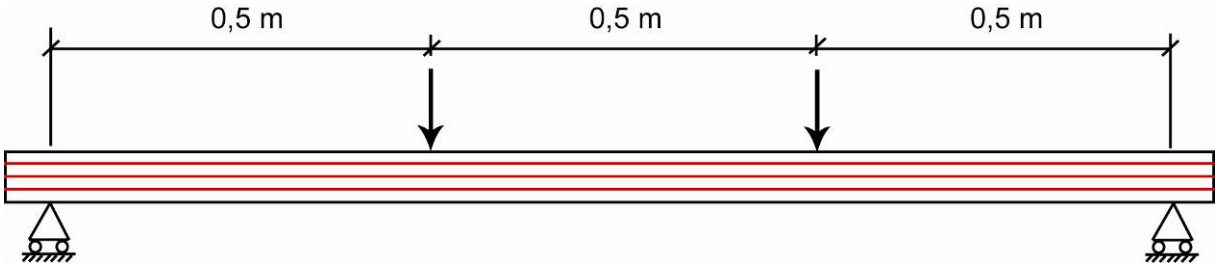


Figure 40: Schéma de l'installation de test de flexion quatre points.

Un chargement de type sinusoïdal d'une valeur minimale de 1,2 kN et d'une valeur maximale de 5kN par appuis a été appliqué. Ceci correspond à un effort de cisaillement de 2,08 N/mm^2 sur le joint du milieu, soit environ 30% de la résistance au cisaillement par la traction d'un joint de *Fagus sylvatica* soudé (Gfeller *et al.* 2004). Les cycles ont été effectués à la fréquence de 0,9 Hz. Quatre essais de chargements cycliques ont été effectués : 20'000 cycles, 40'000 cycles, 60'000 cycles et 90'000 cycles. Chacun des essais a été mené sur deux poutres en lamellé-collé et deux poutres en lamellé-soudé. La flèche a été mesurée grâce à un capteur de déplacement situé sous la poutre à égale distance des deux appuis. Les données des déplacements ont été collectées et analysées avec le logiciel CatMan. Après les essais de chargement cycliques, la résistance restante des joints collés et soudés a été évaluée par un test de cisaillement par traction. Pour cela on a fabriqué et testé des échantillons comme l'indique le paragraphe 4.3.5.1 à partir de poutres ayant subit les essais de chargements cycliques.

4.3.5.4.Double cantilever Beam (DCB)

Préparation et test des échantillons :

Pour les tests mécaniques de type Double Cantilever Beam (DCB) on a utilisé des éprouvettes de *Fagus sylvatica* conditionnées à 20°C et 65% HR. Les éprouvettes sont toutes issues de la même planche, sans défaut et débitées sur faux-cartier. On a utilisé deux dimensions d'éprouvettes : 319*20*20 mm et 328*20*20 mm. Chacune des pièces de dimension 319*20*20 mm a été soudée avec une pièce de 328*20*20 mm pour former un joint soudé sur une surface de 20*319 mm. Les éprouvettes sont orientées sur faux quartier (Figure 28). Les couples ont été soudés par cinq et l'opération a été effectuée deux fois afin d'obtenir 10 éprouvettes. Les paramètres de soudage choisis sont présentés dans le Tableau 7. Les pièces ont ensuite été mises à longueur et ré-usinées pour former des

couples soudés de 310*19*20 mm avec une surface soudée de dimension 310*19 mm. Les éprouvettes doivent être préparées pour l'essai comme l'illustre la Figure 41.

Tableau 7: Paramètres de soudage pour les éprouvettes DCB.

Paramètre	Valeur
Machine	BRANSON M-DT24L en mode manuel
a	3 mm
p_s	1,33 N/mm^2
p_m	2,00 N/mm^2
t_s	4,5 s

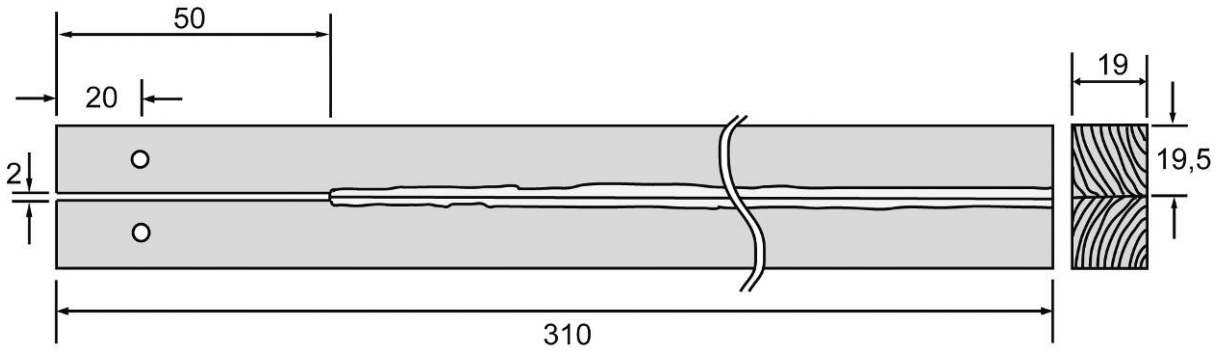


Figure 41: Schéma des éprouvette DCB (dimensions en mm).

Les éprouvettes sont percées, pour permettre leur fixation au montage de test par les tiges, puis entaillées à la scie à ruban sur une longueur de 50 mm en suivant le joint de soudage. Cette entaille permettra de guider la fissure lors de l'essai. On applique ensuite une peinture opaque craquelante (Tippex®) sur la ligne de soudage des deux côtés de l'éprouvette afin de recouvrir le joint brun. Ceci permet de visualiser proprement la longueur de la fissure lors de sa propagation. Les essais sont réalisés sur une machine de traction INSTRON dont la capacité maximale est de 30 kN. La traverse a une vitesse de déplacement constante de 1 mm/min, la force est enregistrée par l'intermédiaire d'une cellule de charge et le déplacement grâce à un capteur de déplacement. L'éprouvette est positionnée dans un montage rotulé afin d'éviter les phénomènes de torsion. La valeur de l'ouverture des lèvres est mesurée par l'intermédiaire d'un extensomètre (Test INSTRON 4467) positionné sur l'éprouvette comme l'indique la Figure 42. On provoque ensuite, en mettant l'éprouvette sous charge, la propagation de la fissure sur quelques centimètres (environ 3 cm), on interrompt le chargement, on repère l'emplacement du fond de la fissure par une marque sur les deux côtés de l'éprouvette, puis on décharge le système. Le cycle chargement-déchargement est effectué plusieurs fois et l'ensemble est enregistré sous la forme d'un graphique

force/déplacement. Cela permet ainsi de trouver une valeur moyenne du taux de restitution d'énergie pour une même éprouvette.

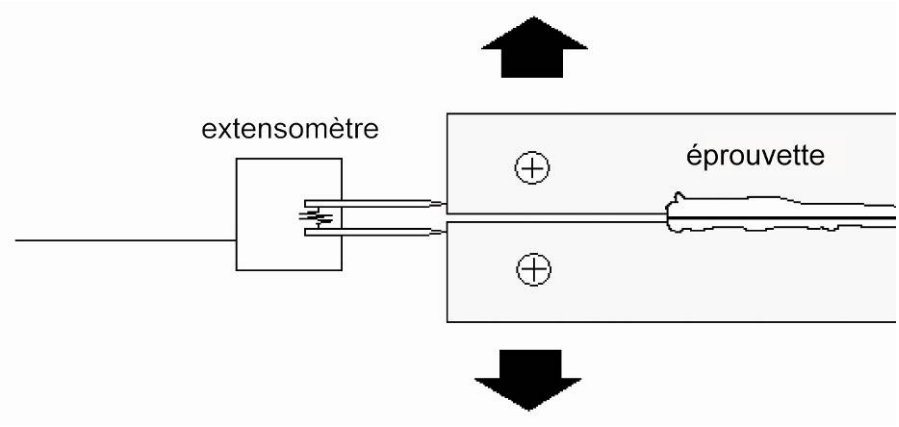


Figure 42: Schéma du montage pour la mesure de l'ouverture des lèvres de fissure sur une éprouvette DCB.

Taux de restitution d'énergie et analyse des données :

Il existe aussi différentes méthodes pour la détermination du taux de restitution d'énergie en mode I (G_{Ic}), soit par méthode expérimentale soit par méthode analytique (3.2.2.2). Dans le cas du couple bois/adhésif, la complaisance expérimentale est une méthode idéale pour décrire le comportement des éprouvettes DCB (Gagliano et Frazier 2001). C'est ce type d'analyse et ce type d'échantillon qui ont été choisis pour ces essais. Dans ce cas précis la complaisance est définie par le rapport :

$$C = \frac{\delta}{P_C} \qquad (5)$$

où δ est la valeur d'ouverture des lèvres de la fissure à la force critique P_c.

4.3.5.5.Tests de résistance à l'eau

L'évaluation de la résistance à l'eau des assemblages bois soudés a été réalisée en s'inspirant des indications des normes EN 204 et EN 205. Ces essais ont été menés sur des éprouvettes de *Fagus sylvatica* avec la géométrie standard (4.1.2) et soudées avec les paramètres présentés dans le Tableau 8. Le bois avait été préalablement stocké pendant 7 jours à 20°C et 65% HR avant usinage. Après le soudage, les pièces ont été usinées selon les indications de la norme EN 205 puis immergées dans de l'eau osmosée à 20°C pendant 1 ou 3 heures selon le type de série. Les pièces ont été ensuite stockées à 20°C et 65% HR durant 7 jours puis testées en cisaillement par la traction tel qu'il est indiqué dans le paragraphe 4.3.5.1.

Tableau 8: Paramètres de soudage pour les tests de résistance à l'eau.

Paramètre	Valeur
Machine	BRANSON 2700 en mode automatique
a	3 mm
p_s	1,33 N/mm^2
t_s	4,5 s

4.3.6.Analyses chimiques

4.3.6.1. Analyse des fumées

Lors du soudage du bois une certaine quantité de substances volatiles ou entraînées par la vapeur d'eau se forment et sont expulsées vers l'extérieur sous forme de fumées. La fumée de soudage est piégée dans un solvant, le dichlorométhane (DCM) pendant le soudage grâce à un système d'entonnoir relié à une pompe (Figure 43).

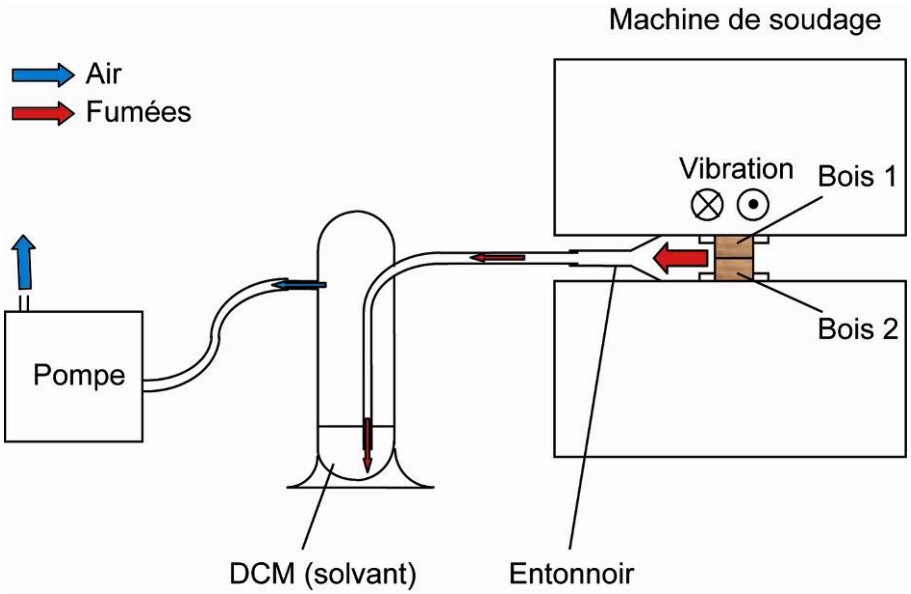


Figure 43: Schéma explicatif du prélèvement des fumées pendant le soudage.

On fait barboter la fumée de 20 soudages successifs d'*Acer campestre* dans le DCM (Figure 44).

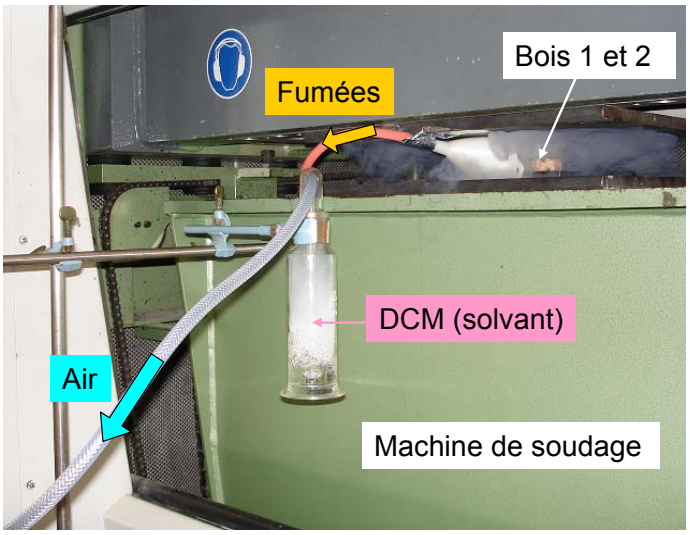


Figure 44: Photographie du prélèvement des fumées dans la machine de soudage Branson 2700.

Chaque échantillon de géométrie standard (4.1.2) a été soudé avec les paramètres de soudage indiqués dans le Tableau 9. La solution de DCM jaunie a ensuite été mesurée par chromatographie en phase gazeuse couplée à un spectromètre de masse (GC-MS). Les références de l'appareil utilisé sont les suivantes : Agilent GC 5890 Series II avec MSD 5972, colonne de chargement: J&W DB1, 30 m, 0,25 mm DM 0,25 um. La GC permet de séparer les substances volatiles et la MS de les identifier par ionisation. Cela ne permet que l'identification de substances de faible poids moléculaire (< 1000 amu).

Tableau 9: Paramètres de soudage pour l'analyse des fumées.

Paramètre	**Valeur**
Machine	BRANSON 2700 en mode manuel
a	3 mm
t_s	4 s
p_s	1,33 N/mm^2

Le spectromètre de masse donne les masses des composants entrant dans la structure des molécules correspondantes à chaque pic. Il ne donne pas le positionnement des atomes sur les molécules. Une base de données permet de retrouver des molécules qui ont ces masses et ces atomes. On obtient pour chaque pic trois réponses avec un taux de probabilité correspondant, cependant ces réponses ne sont pas forcément les correctes. Dans certains cas, en observant les composés du bois, on peut retrouver des isomères de constitution des molécules données par la base de données. Ce travail permet de diminuer l'erreur des réponses données par la base. Les molécules retrouvées par cette méthode sont signalées par le symbole «*» (5.2.6).

4.3.6.2. Spectroscopie infrarouge à Transformée de Fourier (FTIR)

La Spectroscopie infrarouge à Transformée de Fourier (FTIR) est basée sur l'absorption d'un rayonnement infrarouge par le matériau analysé. Elle permet via la détection des vibrations caractéristiques des liaisons chimiques, d'effectuer l'analyse des fonctions chimiques présentes dans le matériau. Des pièces de *Fagus sylvatica* ont été soudées puis testées mécaniquement en cisaillement par la traction (4.3.5.1). On a ensuite collecté la matière interfaciale par grattage sur la surface des éprouvettes ouvertes. Environ 1 g de matière a été collecté sur plusieurs échantillons soudés avec la même combinaison de paramètres. Un témoin a aussi été réalisé en collectant de la poussière de bois sur une éprouvette non soudée. Les échantillons de poudre de bois soudé ou non soudé sont passés à travers un tamis de 0,25 mm avant le test. Des pastilles de KBr avec une concentration d'échantillon de 1% ont ensuite été confectionnées pour chacun des échantillons et analysées dans le spectromètre Bruker Equinox. Les spectres FT-IR ont été réalisés par transmission directe en utilisant le logiciel Bruker OPUS. La détection des spectres a été faite grâce à un détecteur sulfate de triglycerine deutériée (DTGS). Chaque spectre a été réalisé avec une définition de 4 cm^{-1} et 60 scans par échantillon. La déconvolution des spectres corrigés avec le logiciel dmfit (Massiot 1996) permet d'obtenir la proportion relative de chaque composant. La bande d'élongation de la liaison C-O à 1036 cm^{-1} a été utilisée pour normaliser les intensités des autres bandes.

4.3.6.3. Résonance Magnétique Nucléaire du solide (RMN)

Il s'agit d'une méthode de spectroscopie reposant sur le magnétisme nucléaire de certains noyaux ayant un spin non nul. Grâce à cette méthode on peut étudier la structure et l'assemblage de molécules plus ou moins complexes. La méthode de polarisation croisée et de l'angle magique de la spectroscopie de résonance magnétique nucléaire du ^{13}C (RMN CPMAS) a été utilisée. Les échantillons ont été prélevés par grattage comme pour la mesure FT-IR (4.3.6.2). Les spectres ont été enregistrés sur un spectromètre Bruker MSL 300 à la fréquence de résonance du proton de 75,47 MHz. Les déplacements chimiques ont été calculés par rapport à la référence : le tetramethylsilane (TMS). La vitesse de rotation a été fixée à 4 Hz sur une sonde double résonance 7 mm Bruker. L'acquisition des spectres s'est faite avec des délais cycliques de 5s, un pulse à 90° de 5 µs et un temps de contact de 1 ms. Le nombre de transitions était de 3000. La CPMAS du ^{13}C avec déphasage dipolaire a été effectuée avec un délai de 50 µs. Le nombre de transitions était de 16000. Des déconvolutions du spectre corrigé avec le logciel dmfit permettent de donner la proportion relative de chaque composant.

5.Résultats et discussion

Cette partie se déroule en trois étapes qui ont pour but de comprendre les phénomènes fondamentaux ayant lieu au niveau de l'interface entre les deux pièces de bois durant les quelques secondes que dure une opération de soudage. Jusqu'à maintenant la plupart des travaux sur le soudage ont permis une première approche concernant les caracatéristiques des liaisons soudées (3.3). Les équipes de recherche se sont surtout intéressées aux analyses chimiques, microscopiques et densitométriques du joint soudé. La mise en évidence que d'importantes modifications du bois, dues à l'augmentation de température, devaient être responsables en partie des phénomènes d'adhésion entre les deux pièces de bois a été réalisée. Cependant les valeurs de température atteintes et leurs effets directs sur le bois n'étaient pas expliqués. L'analyse de la température a pu être étendue et beaucoup plus détaillée grâce à la TIR. Le premier pas du travail consiste donc en la présentation et la discussion des résultats issus des mesures par TIR de différentes expériences de soudage linéaire du bois. L'impact de l'action thermomécanique du soudage par friction linéaire sur l'anatomie et les propriétés physiques et chimiques du sont discutées dans un deuxième temps. Le soudage provoque une évolution graduelle de modifications physico-chimiques du bois qui apparaîssent chronologiquement. Les méthodes développées et les résultats obtenus au cours des deux premières étapes permettront de créer puis de vérifier un scénario : celui du développement de la microstructure interfaciale adhérente. Ce scénario et présenté dans la troisième partie de cette discussion.

5.1.Analyse de la température lors du soudage

Jusqu'à présent les études sur le soudage se sont concentrées essentiellement sur l'analyse des propriétés physiques et chimiques de la zone de soudage (Gfeller *et al.* 2003). Dans ces travaux une mesure de température pendant le soudage avait été effectuée grâce à des thermocouples positionnés à différentes distances de la ligne de soudage. Cependant l'utilisation d'une méthode de mesure par contact pourrait provoquer des erreurs. En effet si les thermocouples sont situés trop loin de ligne de soudage les valeurs obtenues sont inférieures aux valeurs réelles. Ceci est dû aux propriétés isolantes du bois. Si les thermocouples sont positionnés directement dans la ligne de soudage leurs éléments métalliques seront frictionnés entre les deux pièces de bois. La pression et les forces de friction exercées sur les thermoéléments peuvent alors provoquer leur dégradation. D'autre part la mesure par contact à l'endroit où des forces de friction sont exércées peut être erronée par le fait que la température dégagée correspond à la friction de l'élément lui-même contre le bois. L'étude de la température de soudage par TIR est une méthode sans contact qui nous permet d'éviter les sources d'erreurs citées précédemment.

5.1.1.Température de surface

La température relevée est une température de surface, elle ne peut donc pas être interprétée comme la valeur exacte de la température de soudage. Cette mesure permet son approximation et des comparaisons entre différents types d'éprouvettes. Le processus de soudage provoque une éjection de matériel ligneux qui se positionne dans le champ de vision entre l'éprouvette et la caméra. Dans ce contexte la température mesurée par la caméra est en partie aussi celle de ce matériel éjecté. Le soudage provoque enfin l'apparition de fumées et de vapeur d'eau qui réchauffent l'air situé autour du joint. Les méthodes d'analyses ont été développées afin d'éliminer au maximum ces sources d'erreurs de mesure.

5.1.1.1.Résultats

La température maximale de l'image correspondante à l'étape 1 de l'analyse thermographique (4.3.1.1) a été mesurée sur différentes essences de feuillus et résineux européens (*Acer campestre*, *Carpinus betulus*, *Quercus robur*, *Robinea pseudoaccacia*, *Abies alba*, *Picea abies* et *Pinus sylvestris*) pour des temps de soudage t_s variant de 3 à 5 s et des pressions de soudage p_s et p_m de 1,5 MPa (9.3). Lors de ces essais, le soudage a pu être considéré comme efficace car les pièces ont atteint le stade de l'extrusion et ont montré une bonne adhésion en fin de processus. Le domaine moyen pour la température maximale est de 200-275°C avec comme valeurs extrêmes 130°C pour la plus basse et 310°C pour la plus élevée. Comme il a déjà été expliqué plus haut la valeur maximale de température ne concerne qu'un seul point particulier de l'image et constitue un type d'indicateur de température trop restrictif. Les analyses selon l'étape 2 du traitement des thermographies concernent le critère « température moyenne maximale de la ligne de soudage » (4.3.1.1). Le domaine moyen pour ce critère est de 140-225°C avec des valeurs extrêmes de 90°C pour la plus basse et 250°C pour la plus élevée. Ce second critère donne des valeurs définitivement plus basse que le premier. Cependant son analyse permet de supprimer des écarts de température dus à des points particuliers telle que la température des fibres éjectées de la ligne. Comme ce critère semble bien représentatif du comportement thermique lors du soudage il sera utilisé très souvents pour les analyses. Un exemple de relevé de température selon l'étape 2 (4.3.1.1) est présenté sur la Figure 45. Sur cet exemple on remarque que pendant la période de friction (0-4s) la température augmente de 32°C à 223°C avec un taux de 47,5°C/s. Il apparaît de façon évidente que l'augmentation de la température n'est pas constante mais prend une forme sigmoïde. La température atteint 50°C en environ une seconde avec une pente de 19°C/s.

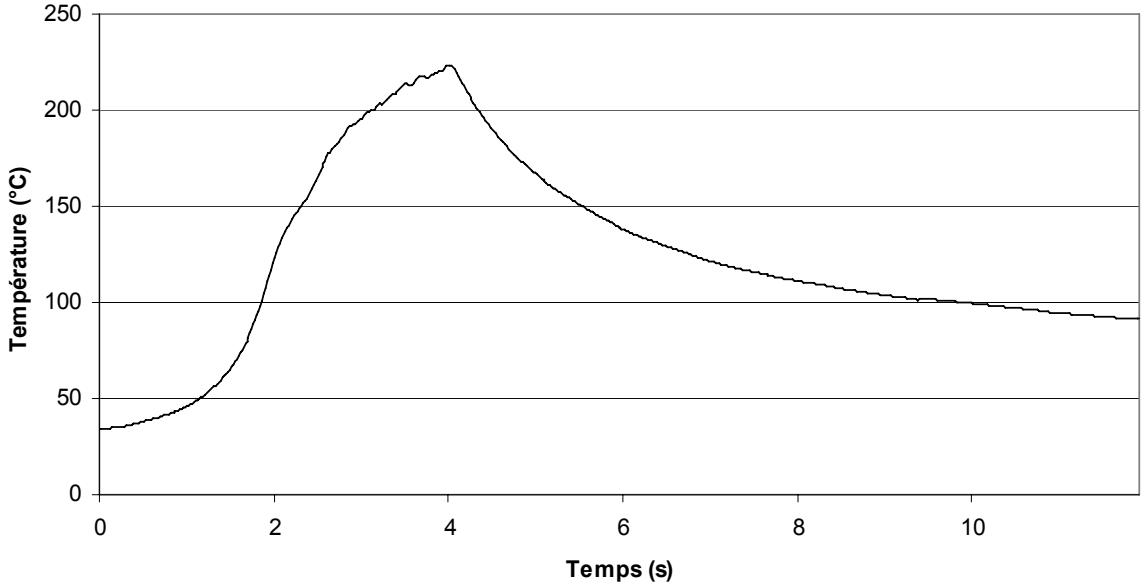


Figure 45: Profil de la température moyenne de la ligne de soudage durant un soudage sur une pièce d'*Acer campestre* avec t_s = 4s, $p_s = p_m$ = 1,5 N/mm^2.

Dans les 2 s suivantes la température augmente rapidement avec un taux de 69°C/s jusqu'à ce quelle atteigne 180°C. La pente d'augmentation de la température est beaucoup moins forte (30°C/s) lors de la dernière seconde de friction et semble prende une allure logarithmique pour arriver à environ 220°C. Un comportement thermique et des températures similaires avaient été obtenus en mesurant l'interface soudée de pièces de *Fagus sylvatica* par l'intermédiaire de thermocouples (Gfeller *et al.* 2004). La valeur de température (environ 500K soit 227°C) mesurée par thermocouples sur du bois de *Fagus sylvatica* à 4 s de soudage par friction orbitale (Stamm *et al.* 2005) est similaire à celle du soudage linéaire. Après l'arrêt de la friction, durant le temps de maintien de 5s, la température diminue de 220°C à 100°C (Figure 45). Quelques minutes plus tard la température de l'éprouvette est la même que la température ambiante. Les modifications du bois qui se produisent dans le domaine de température entre 40°C et 90°C sont essentiellement dues à des changements physiques comme la perte d'eau et de substances volatiles et provoquent des modifications chimiques mineures (Sundqvist 2004). Dans le domaine 90-180°C de plus forts changements apparaissent aussi bien chez les feuillus que chez les résineux qui ont une température de ramollissement aux alentours de 180°C. Cependant l'humidité a tendance à diminuer la température de transition vitreuse des constituants du bois (3.1.4). La conversion thermique du bois et le début de sa dégradation apparaît pour des températures avoisinant 200°C. La pyrolyse débute pour des températures supérieures à 270°C (Fengel et Wegener 2003). Ainsi on peut considérer, en se basant sur l'analyse de la température de soudage, que des transitions vitreuses et des conversions thermiques se produisent lors du soudage du bois.

La TIR permet aussi d'observer la température à un moment donné le long du joint en suivant la procédure de traitement des données de l'étape 4 (4.3.1.1). Cette étape d'analyse a été essentiellement utilisée au moment où la température est maximale. Elle permet d'apprécier l'homogénéité du soudage le long de l'éprouvette et de détecter d'éventuels défauts de soudage. La courbe présente une succession de pics qui correspondent aux zones directement visibles du joint ainsi qu'aux fibres éjectées de la surface (Figure 46).

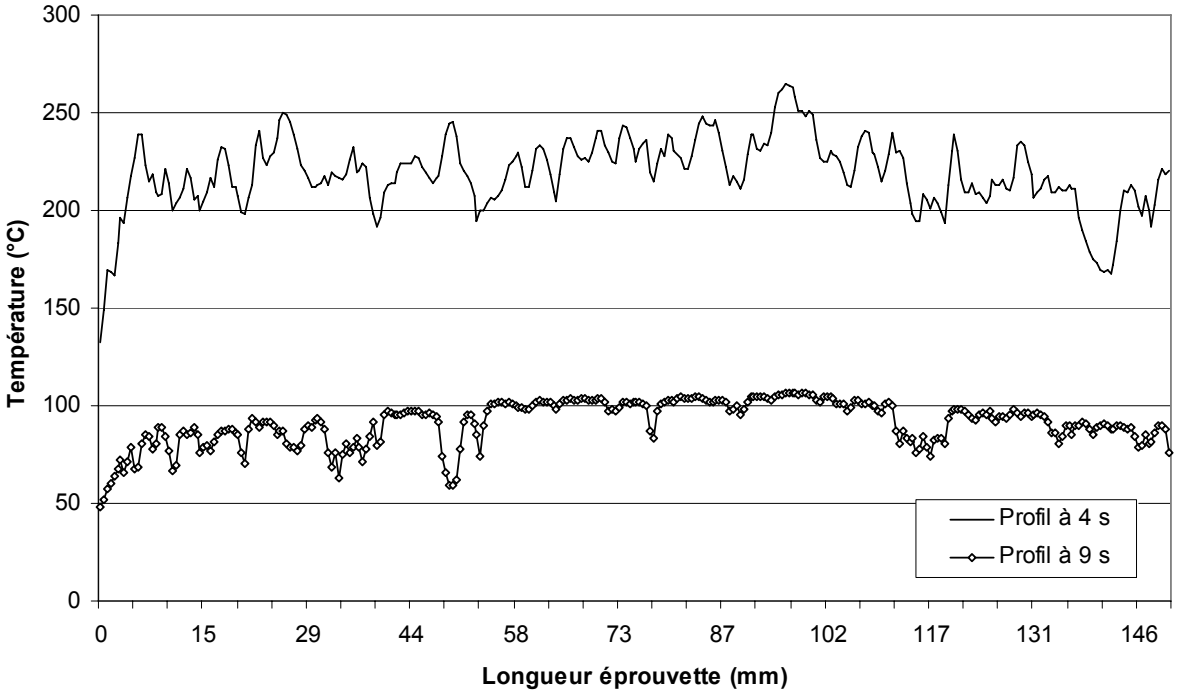


Figure 46: Profil de température de long de la ligne de soudage à 4 s et 9 s pour une éprouvette d'*Acer campestre* avec t_s = 4 s, $p_s = p_m$ = 1,5 N/mm^2.

Les pics de température les plus élevés correspondent au matériel éjecté. Après la vibration, lors du refroidissement on observe un applatissement voir une inversion des pics (Figure 46). En effet à cet instant on peut mettre en évidence que les fibres refroidissent plus vite que la ligne de soudage étant donné qu'elles sont entièrement en contact avec l'air environnant. Sur les extrémités de l'éprouvette la température est en moyenne légèrement plus basse. Cela concerne une zone de largeur inférieure à 6 mm de part et d'autre de l'éprouvette. Les extrémités refroidissent plus vite que le centre étant donné le sens de la vibration et l'amplitude de vibration. La question est de savoir si ce refroidissement a des répercussions sur la densité et la qualité du joint. Ce problème sera traité dans le paragraphe 5.4.

La TIR permet aussi l'observation du changement de température sur la ligne de soudage pendant toute la durée du processus. L'étape 7 du traitement des données thermographiques (4.3.1.1) permet d'obtenir une cartographie d'isothermes (Figure 47).

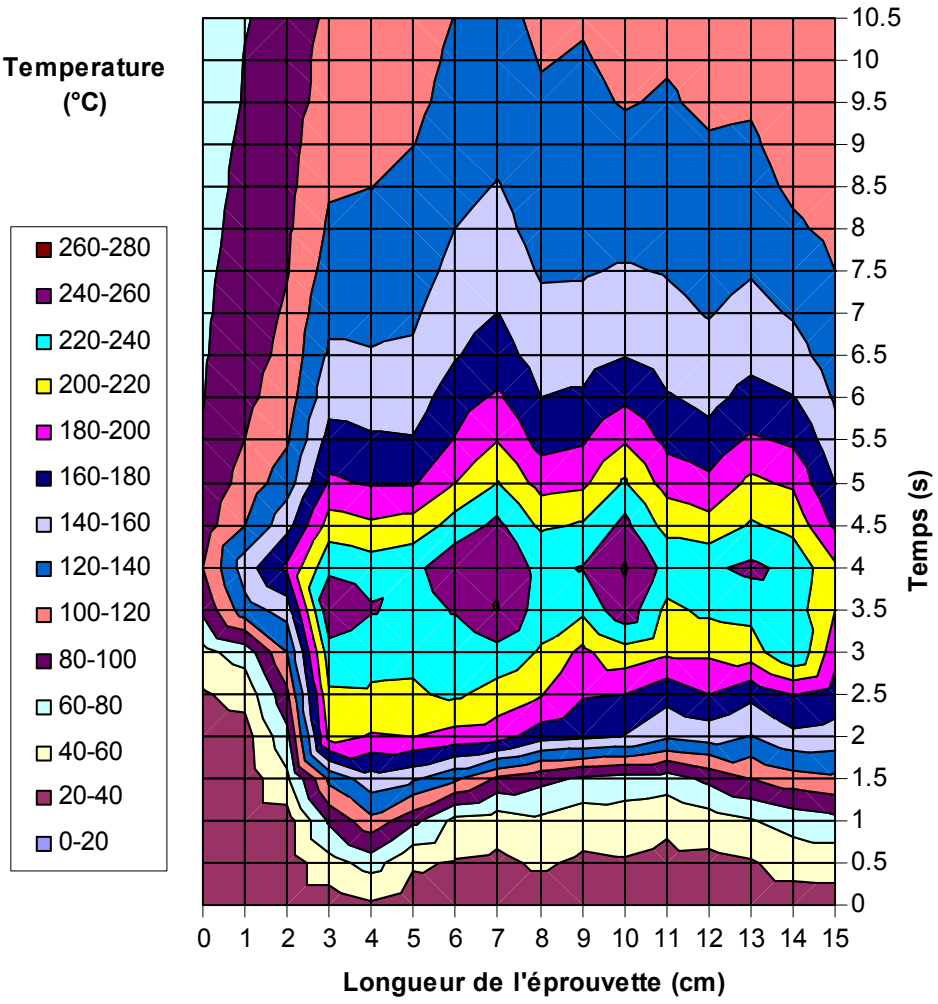


Figure 47: Profil de température sur la longueur du joint en fonction du temps de soudage sur une éprouvette de Acer campestre avec t_s = 4 s, $p_s = p_m$ = 1,5 N/mm^2.

Ce type de graphique permet d'obtenir l'évaluation globale du profil de température au cours du temps. Il permet l'identification des pics de température et de la pente de refroidissement de l'éprouvette. Cette analyse permet de regrouper toutes les étapes d'analyse précédentes en un seul graphique. Cependant ce genre traitement est trop complexe pour une analyse fine et peut d'avantage être utile pour un contrôle global de qualité du soudage.

La mesure par TIR de la température de surface du couple d'éprouvettes de bois impliquées dans un soudage linéaire par vibration permet de mettre en évidence le comportement thermique de l'interface au cours du processus. Ces informations collectées seront ensuite corrélées avec les autres résultats d'analyses physico-chimiques du bois soudé. La méthode de TIR mise en place présente des critères d'analyse efficaces. Ces données serviront aussi à l'élaboration de la simulation numérique du comportement thermique lors du soudage (5.4).

5.1.2.Température interne

Nous avons vu précédemment qu'il était possible de mesurer la température de surface au niveau de la ligne de soudage grâce à la TIR. Cette mesure permet de comparer différents types d'éprouvettes. Cependant elle ne donne pas la température réelle du cœur de l'éprouvette nécessaire à la compréhension des modifications chimiques qui se produisent pendant le soudage. Dans le but de connaître la température maximale à l'intérieur de l'éprouvette une expérience a été réalisée. L'idée a été de mesurer la température du joint ouvert juste après le soudage via la TIR. L'objectif est d'effectuer suffisamment de films thermographiques du même type d'éprouvette avec les mêmes paramètres de soudage. Avec des temps d'ouverture d'éprouvettes différents il est possible d'obtenir les valeurs de température permettant de déterminer une courbe de refroidissement interne du joint. Il est important de relever le plus de données possibles au début du refroidissement ce qui permettrait d'avoir le plus de précision. La température maximale relevée lors des pas 2 et 3 n'est pas à tenir en compte (4.3.1.2 - Figure 35). Il s'agit simplement d'observer la température à la surface de l'éprouvette au niveau du joint de soudage. A partir du pas 4 on observe véritablement la température de l'intérieur du joint.

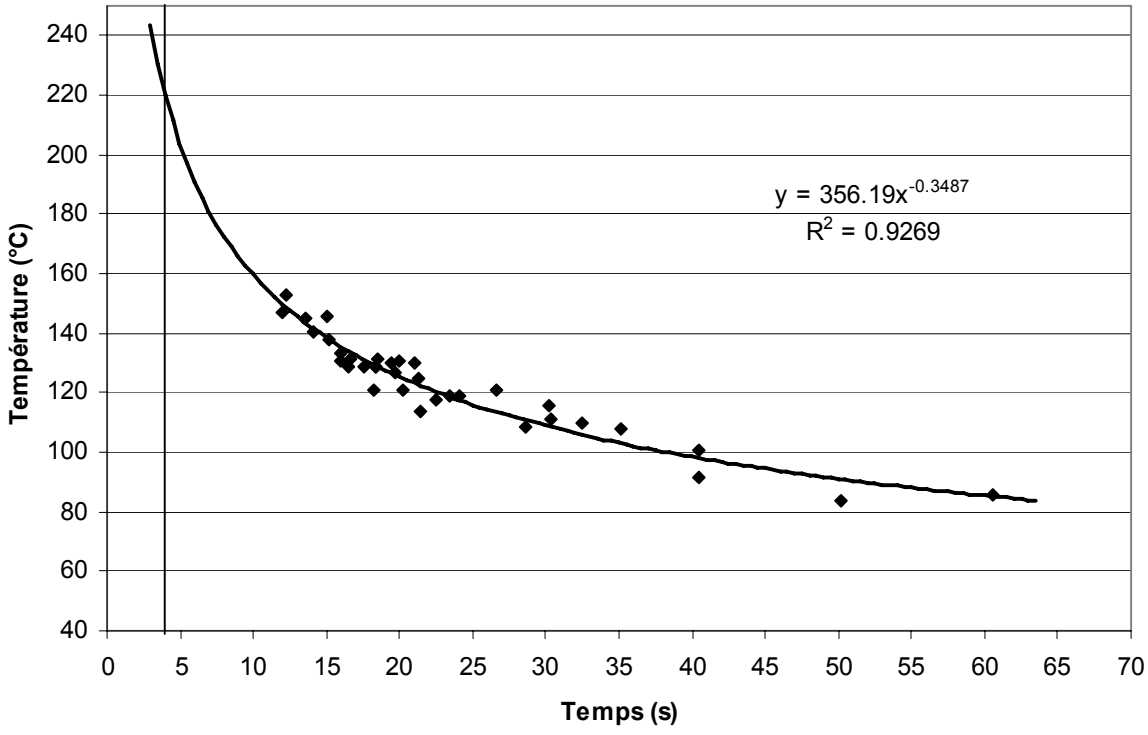


Figure 48: Mesure de températures internes lors du refroidissement après soudage.

Une petite série préalable d'éprouvettes soudées avec un temps de maintien plus court (t_m = 1 s) nous a permis d'une part de montrer que le temps de maintien n'avait pas d'influence notable sur la température interne de refroidissement et d'autre part de gagner en précision en réalisant des ouvertures d'éprouvette une seconde plus tôt. La Figure 48 présente les

résultats obtenus. Cette série de points a été traitée par une régression de type puissance. L'équation de la droite obtenue est alors :

$$y = 356{,}19x^{-0{,}3487} \quad (6)$$

La valeur du coefficient de régression r^2 obtenu est proche de 1 (r^2 = 0,9269). Si on applique cette équation pour un temps de 4s, on obtient une température de 220°C. Cette évaluation de la température interne semble correcte au vu des observations faites lors des mesures de températures moyennes précédentes (5.1.1). Une température moyenne de 220°C environ avait alors été obtenue en surface pour le même type d'éprouvette sous les mêmes conditions de soudage. Avec ces informations il est possible de faire une approximation de l'épaisseur de bois atteinte par cette température. En calculant l'énergie produite par le soudage au niveau de la surface et en connaissant les propriétés du bois on peut calculer l'épaisseur sur laquelle cette température maximale exerce une influence. L'énergie produite au niveau de la surface est due à deux types d'effort maintenus sur l'éprouvette pendant le soudage : la pression perpendiculaire F et le frottement linéaire F_f (Figure 22) reliés par l'équation :

$$F = \mu \times F_f \quad (7)$$

où F = 4000 N et μ est le coefficient de friction dépendant de la rugosité de la surface.

Or pendant le processus ce coefficient varie. En effet d'après l'étude de B. Stamm (2005), qui porte sur la variation de l'effort de friction pendant le soudage orbital du bois, le coefficient de friction du bois qui est de 0,35 au début du frottement, baisse brutalement à 0,05 pendant la première demi seconde. Si l'on utilise ces données, les forces F_1 et F_2 agiront successivement sur la surface pendant les 4 s, soit : F_1 = 0,35 x 4000 = 1400 N et F_2 = 0,05 x 4000 = 200 N. Les longueurs parcourues lors du frottement correspondent à :

$$l = f \times t_s \times a \quad (8)$$

Où l est la longueur de frottement parcourue (en mm). Ainsi : L_1 = 100 x 0,5 x 3 = 150 mm et L_2 = 100 x 3,5 x 3 = 1050 mm. S'en suit alors le calcul de l'énergie générée par cette force et définie par l'équation suivante :

$$E = F \times l \quad (9)$$

E_1 = 1400 x 0,15 = 210 N.m = 210 J et E_2 = 200 x 1,05 = 210 N.m = 210 J. Donc E_{totale} = E_1 + E_2 = 420 J = 0,42 kJ. L'énergie dispensée sur la surface de soudage après 4 s de vibration à une pression de 4000 N est donc de 420 J. Il s'agit maintenant de déterminer, grâce à cette énergie sur quelle profondeur la température maximale est atteinte. Le travail résultant correspond à :

$$W = \frac{E_{totale}}{\Delta t} \quad (10)$$

On sait que la conductivité thermique du bois λ s'exprime ainsi:

$$\lambda = \frac{W}{e \times \Delta T} \qquad (11)$$

Où e est l'épaisseur de la pièce parcourue par le flux thermique et ΔT la différence de température découlant de l'effet de l'énergie apporté à la surface (chauffage pendant le processus). Grâce aux équations 4 et 5 et connaissant C_p, la capacité calorifique du bois à 12% d'humidité, ainsi que la densité du bois ρ, on peut en déduire le volume V qui est chauffé par cette énergie :

$$V = \frac{E_{totale}}{C_p \times \rho \times \Delta T} \qquad (12)$$

Où V est le volume de bois chauffé en m^3, E_{totale} est exprimée en kJ, c est la capacité calorifique du bois selon humidité (ici 12%) en kJ/(kg.K), ρ la masse volumique du bois en kg/m^3, ΔT la différence de température entre le début et la fin de l'apport d'énergie en K. La valeur de C_p de *Fagus sylvatica* à 12% d'humidité est de 1,67 kJ/(kg.K), la masse volumique du bois ρ est de 630 kg/m^3 en moyenne. Pour connaître ΔT il faut connaître la température de départ du bois (293 K) et la température à la fin du processus de chauffage, c'est-à-dire celle qui a été déterminée par regression lors de l'essai de mesure de température interne (Figure 48). La valeur de température maximale calculée est de 473 K. Donc ΔT = 200 K. Ainsi : V = $1{,}996.10^{-6}$ m^3. A partir de là on peut en déduire l'épaisseur atteinte de part et d'autre de la ligne de soudage :

$$e = \frac{V}{S \times 2} \qquad (13)$$

Ainsi on obtient : e = $1{,}996.10^{-3}$ / (2 x 3000) = 0,33 mm. L'épaisseur atteinte par la température 220°C à 4 s, à la fin de la vibration, est donc de 0,33 mm. On devrait, d'après ce calcul, trouver les caractéristiques anatomiques et chimiques du bois modifiées par l'action d'une température d'environ 220°C jusqu'à 330 µm de part et d'autre de la ligne de soudage. Si l'on veut connaître l'influence de la température sur une distance plus élevée ainsi que la valeur de la température sur cette distance il faut calculer la diffusion de chaleur dans le bois à partir de la température centrale. Ceci sera l'objet d'une simulation numérique de la thermique du soudage (5.4). La valeur de l'épaisseur de bois atteinte par 200°C calculée précédemment doit être discutée en parallèle à des observations microscopiques et des analyses de la densification du bois. Il s'agit en effet d'une température pour laquelle le bois sera plastifié sous l'effet de la pression, ce qui devrait être visible et mesurable lors des analyses microscopiques.

La TIR se présente comme un outil très souple et fondamental pour l'analyse du soudage du bois. L'analyse numérique des thermographies grâce au traitement informatique permet d'obtenir de façon rapide et efficace de nombreuses informations thermiques. Les études

portant sur l'analyse de la température de surface pendant le soudage permettent de comparer différents types de cycles de soudages sur différents types d'éprouvettes. L'étude sur la température de refroidissement interne des éprouvettes a permis d'effectuer une approximation de la température interne à la fin de la vibration. Celle-ci est similaire à la température de surface mesurée à la fin de la vibration des deux pièces de bois.

5.2.Etude des propriétés physiques des assemblages bois soudés

5.2.1.Aspect macroscopique des joints soudés

Lors du soudage par friction de deux pièces de bois massif, il a été mis en évidence que le matériel lignocellulosique de l'interface, grâce une augmentation de la température provoquée par la friction se ramollissait (Gfeller *et al.* 2003). On a observé aussi qu'au bout de 2 secondes environ de soudage un matériel brun sortait de l'interface sous une forme d'extrudat. Ce matériel extrudé est visible tout autour du joint de soudage (Figure 49). Si l'on ouvre les éprouvettes après un temps de soudage court on constate sur la surface ouverte des amas de matériau fondu formant des vagues plus ou moins larges, dont la longueur est perpendiculaire au sens de la vibration. D'après les études précédentes (Gfeller *et al.* 2004) on a pu émettre l'hypothèse que le matériau à l'interface des deux pièces lors du soudage change d'état. En effet la lignine atteint sa température de transition vitreuse ainsi que les hémicelluloses sans se dégrader complètement. Le matériau est donc « mou » et comparable à une la pâte. Une expérience menée avec un matériau ayant des propriétés viscoélastiques semblant assez proche de celles du matériau chaud, extrudé au moment du soudage a été menée.

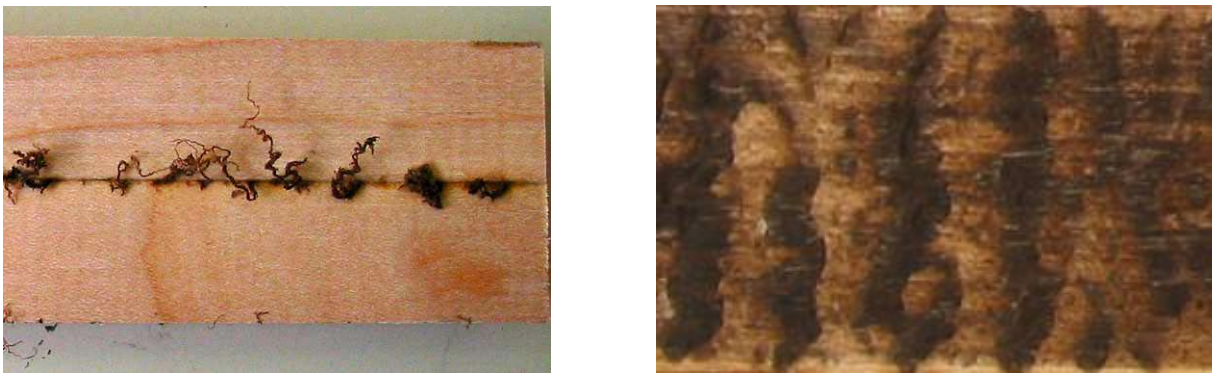


Figure 49: Matériel extrudé sortant de l'interface (à gauche), vagues formées par le matériau fondu sur la surface d'une éprouvette ouverte soudée avec un temps de soudage court (à droite).

Cette matière a été étalée entre les deux pièces de bois et celles-ci ont été frottées l'une contre l'autre. De même que lors du soudage du bois on a pu constater l'apparition de l'extrudat s'échappant de l'interface. En séparant les deux pièces on a pu aussi constater qu'il se formait des vagues du même type que pour le soudage (Figure 50). Cette expérience a permis de confirmer l'état « mou » du matériau qui aurait à haute température des caractéristiques mécaniques similaires à celle d'une pâte.

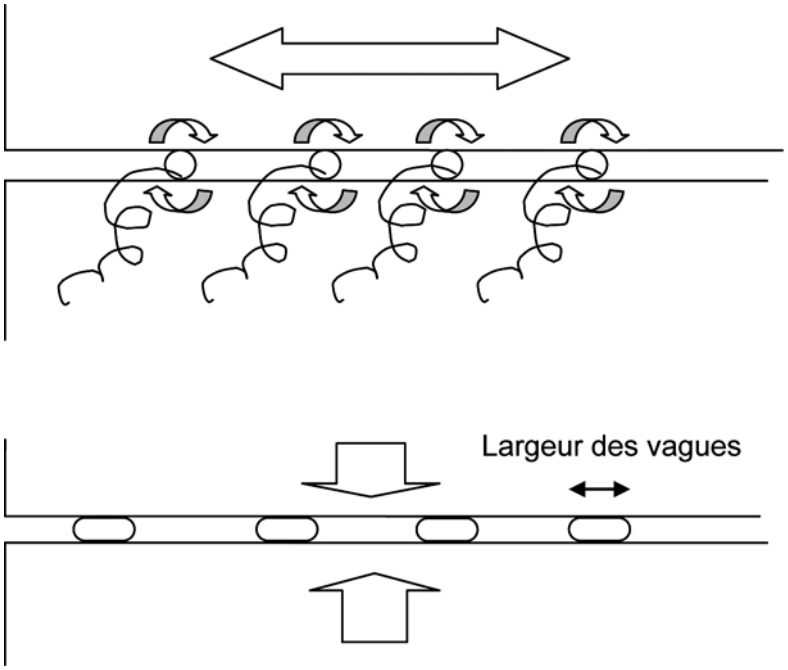


Figure 50: Mécanisme d'extrusion des fibres (en haut) et de formation des vagues (en bas).

5.2.2.Observations microscopiques des joints soudés

Des éprouvettes ont été soudées et préparées tel qu'il est défini dans le paragraphe 4.3.2 puis des images des coupes ont été réalisées. La Figure 51 montre des exemples de photographies des deux types de coupes A et B effectuées sur des pièces d'*Acer campestre* soudées. Des éprouvettes avec différentes orientations du fil (0°, 45°, 90°) ont également été préparées pour les observations microscopiques. Ces éprouvettes ont subi précédemment un soudage avec des mesures infrarouges de température et des mesures de densitométries à rayons X. On connaît aussi la résistance mécanique de ces éprouvettes. L'intérêt de l'observation microscopique est d'observer l'impact de la chaleur et de la pression sur l'anatomie du bois. On a effectué des observations à plusieurs grossissements avec un microscope à lumière réfléchie. Des essais de coupes minces au microtome ont été réalisés mais ils ne conviennent pas aux coupes transversales. En effet on ne parvient pas à avoir une coupe suffisamment fine sans que la ligne de soudage soit rompue.

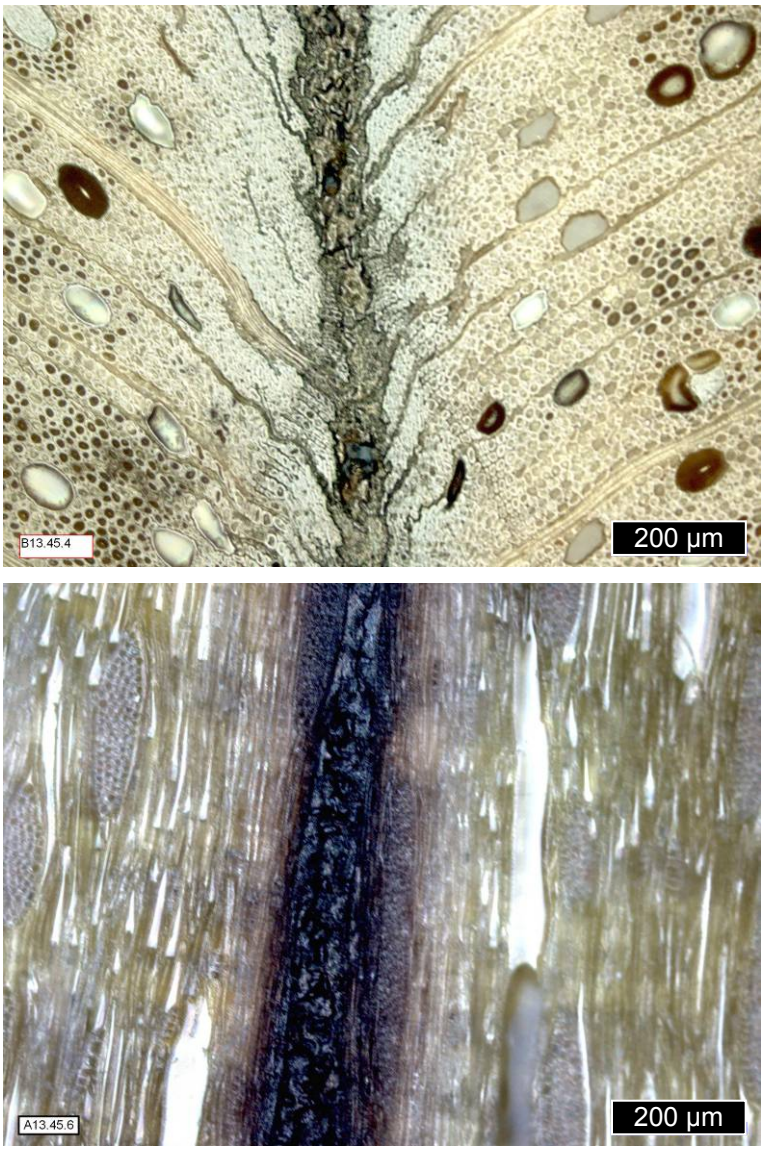


Figure 51: Exemples de coupes microscopiques selon les directions A (en haut) et B (en bas) sur des éprouvettes d'*Acer campestre*.

D'autre part les coupes minces ne permettent pas une bonne observation de l'anatomie vis-à-vis de la méthode avec le microscope à lumière réfléchie étant données la densité, la fragilité et la couleur très sombre de la ligne de soudage. Une autre difficulté rencontrée est la grande différence de contraste entre la ligne de soudage noire, très dense et le bois clair. Les traitements des images ont nécessité l'utilisation de filtres afin de diminuer le contraste dû à la ligne de soudage. Les modifications anatomiques proches de la ligne de soudage sont plus faciles à observer en coupe transversale. L'analyse a donc essentiellement été réalisée sur les clichés en coupe transversale (type A). Le traitement de l'image et la diffusion de résine Epoxy ou parfois de l'adhésif utilisés dans la préparation des échantillons peuvent créer des zones de couleurs différentes. Cela a pour conséquence que les variations de couleurs ne doivent pas être prises en compte dans l'analyse.

5.2.2.1. Observations de la zone de soudage pour des directions de fil différentes

Sur la Figure 52 est présentée une microscopie d'une éprouvette en coupe transversale dont l'angle entre des cernes d'accroissement naturel avec la ligne de soudage est de 0°.

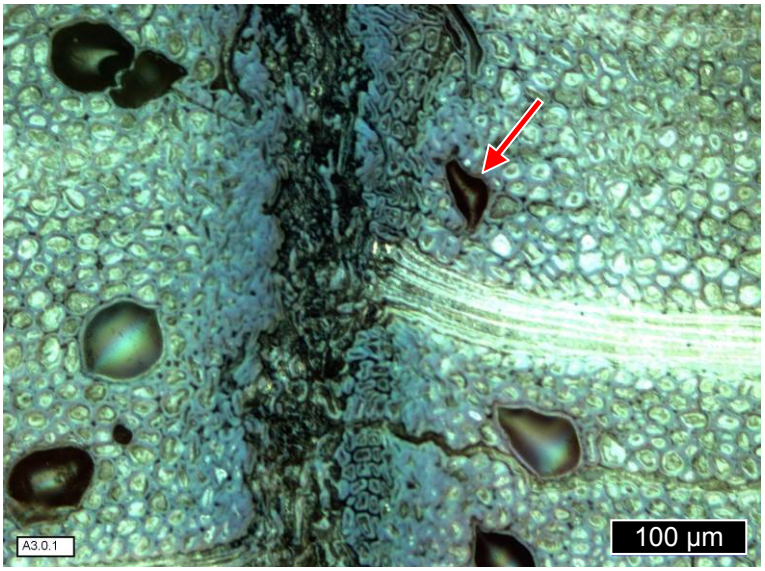


Figure 52: Observation d'une coupe transversale pour une orientation de fil de 0° d'une éprouvette soudée d'*Acer campestre*.

Cette orientation se retrouve bien ici puisque l'on voit un rayon ligneux plonger perpendiculairement dans la ligne de soudage. La ligne de soudage apparaît nettement au centre. La déformation des cellules et des vaisseaux ne semble pas dépasser 200 µm de part et d'autre de la ligne de soudage. A proximité de la ligne, les vaisseaux sont écrasés dans le sens de la pression, la forme de leur lumière n'est plus arrondie mais allongée, souvent en forme de "S" (flèche rouge). Ce que l'on peut aussi observer sur cette photo, est que plus on s'éloigne du rayon ligneux (verticalement) plus les cellules semblent avoir subi une modification. Sur la Figure 53 il s'agit du même type de cliché mais pour une orientation de 45° des cernes par rapport à la ligne de soudage. On voit que les rayons ligneux subissent une modification sur une longueur plus importante que dans le cas de l'orientation 0° (flèches rouges). D'autre part l'écrasement des cellules et leur déformation semblent être plus importants lorsque l'on se place dans l'angle aigu que forme le rayon avec la ligne de soudage. La Figure 54 est une microscopie d'une éprouvette orientée avec un angle des cernes de 90° par rapport à la ligne de soudage, on observe bien le positionnement parallèle à ligne de soudage des rayons ligneux.

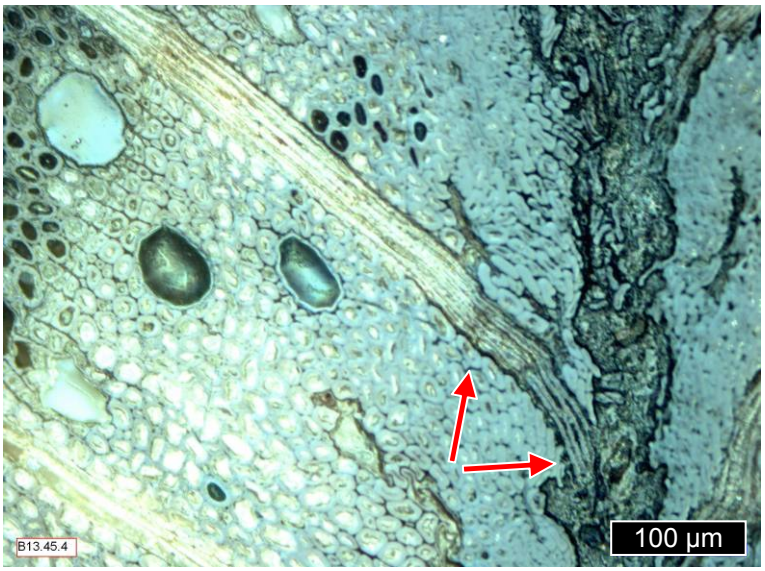


Figure 53: Observation d'une coupe transversale pour une orientation de fil de 45° d'une éprouvette soudée d'*Acer campestre.*

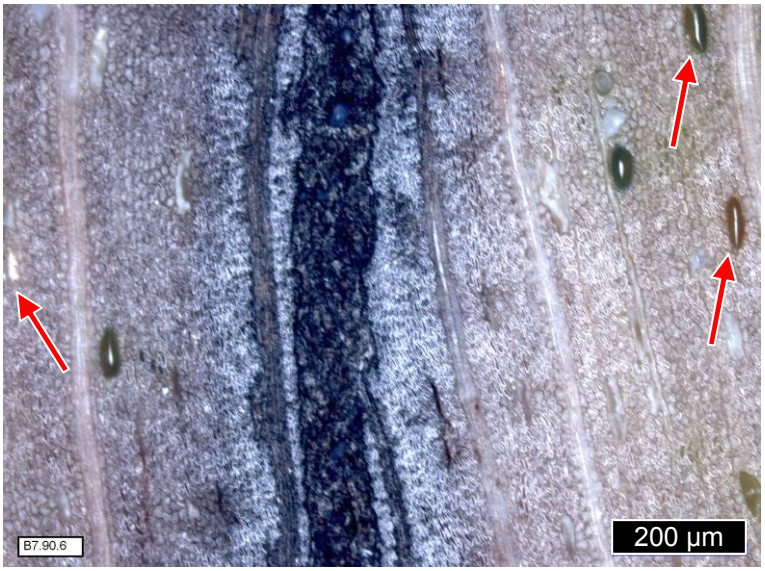


Figure 54: Observation d'une coupe transversale pour une orientation de fil de 90° d'une éprouvette soudée d'*Acer campestre.*

La largeur du matériel fondu (au centre) est aussi plus importante (environ 150 µm). Sur la photographie tous les vaisseaux sont déformés et écrasés (flèche rouge), la largeur de la déformation semble donc ici très élevée (plus de 500 µm). Les déformations de l'anatomie du bois dues à la pression sont facilement repérables au niveau de la microscopie optique à lumière réfléchie. La déformation du lumen des vaisseaux d'*Acer campestre* permet de définir sur quelle distance le bois est comprimé. Ces photos nous permettent aussi de déterminer la largeur de la couche noire où le matériel anatomique est complètement fondu. On a observé que la largeur de la déformation due à la compression était différente selon l'orientation de fil. On observe aussi qu'autour des rayons ligneux la déformation est moins importante qu'entre les rayons. Cela signifie que, lorsque leur direction est parallèle à celle

de la force appliquée, la résistance à la compression (due à l'orientation perpendiculaire des cellules) est plus élevée. Ainsi les cellules des échantillons d'orientation 0° sont comprimées sur une largeur beaucoup moins importante que celle des échantillons d'orientation 90°. Le fait que les cellules qui sont situées sous le rayon (dans le sens de la pression) de la Figure 53 soient aussi plus comprimées que celles qui sont au dessus du rayon, contribue à confirmer cette hypothèse. Comme nous l'avons vu sur la Figure 54, tous les vaisseaux à ce grossissement semblent déformés. Pour connaître quelle est la distance atteinte par cette déformation il faut faire une analyse au-delà de la ligne de soudage (sur une distance de part et d'autre de la ligne de soudage un plus élevée).

5.2.2.2. Observations au-delà de la zone de soudage pour les trois directions de fil

Les trois images présentées sur la Figure 55 sont des assemblages d'images prises à un fort grossissement sur une longueur de 5 mm environ sur des coupes transversales (type A) pour les trois directions de fil.

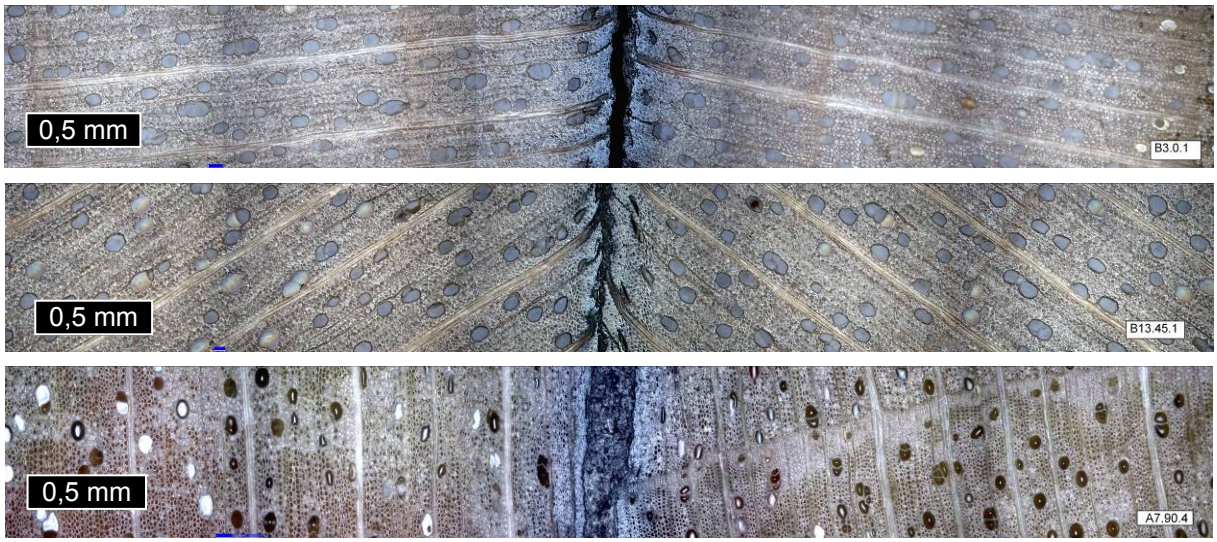


Figure 55: Observation microscopique de la zone de soudage pour un angle de 0° (en haut), pour un angle de 45° (au centre) et pour un angle de 90° (en bas) d'éprouvettes soudées d'*Acer campestre.*

On peut ainsi déterminer la distance à partir de laquelle la modification cellulaire n'est plus visible. Dans chaque cas on trouve trois types de zones. Leur dénomination a été choisie en s'inspirant des termes utilisés dans le domaine du soudage par friction linéaire (3.3.2 et Frost 1999).

- Une zone entièrement fondue que l'on appellera la Melting Zone (MZ)
- Une zone complètement plastifiée et déformée que l'on appellera la Fully Plasticised and Deformed Region (FDR)

- Une zone partiellement déformée que l'on nommera la Partial Deformed Region (PDR)

Les différentes caractérisiques anatomiques des zones déformées ont été observées sur des échantillons soudés de *Fagus sylvatica*.

Cas de la MZ :

Il s'agit d'une zone où le matériau est entièrement fondu et l'anatomie du bois n'est presque plus reconnaissable. Elle est bien délimitée, on y observe des débris de cellules et cette zone est particulièrement sombre tel que le montre la microscopie de la Figure 56.

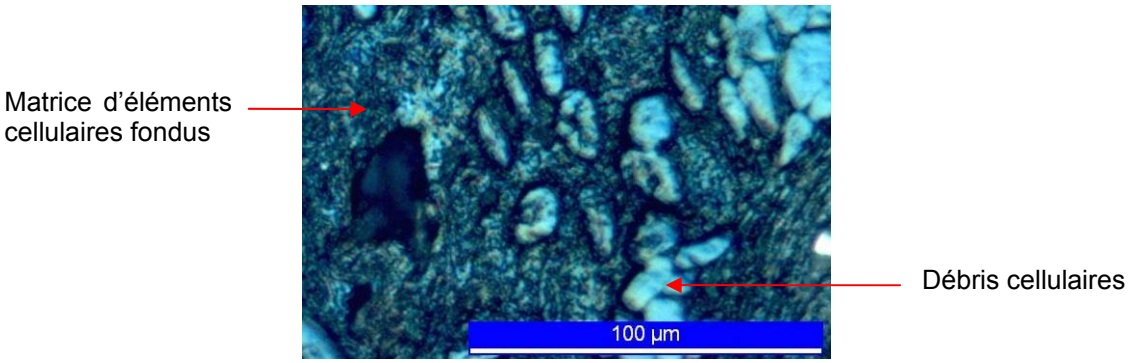


Figure 56: Caractéristiques anatomiques de la zone de bois soudé MZ.

Cas de la FDR :

Dans cette zone le lumen des cellules de bois est peu ou non visible. Les cellules des rayons ligneux y apparaissent fondues et les rayons ligneux ont une forme ondulée alors que dans le bois non soudé ils sont rectilignes. Dans cette zone les vaisseaux sont complètement écrasés et filiformes (Figure 57).

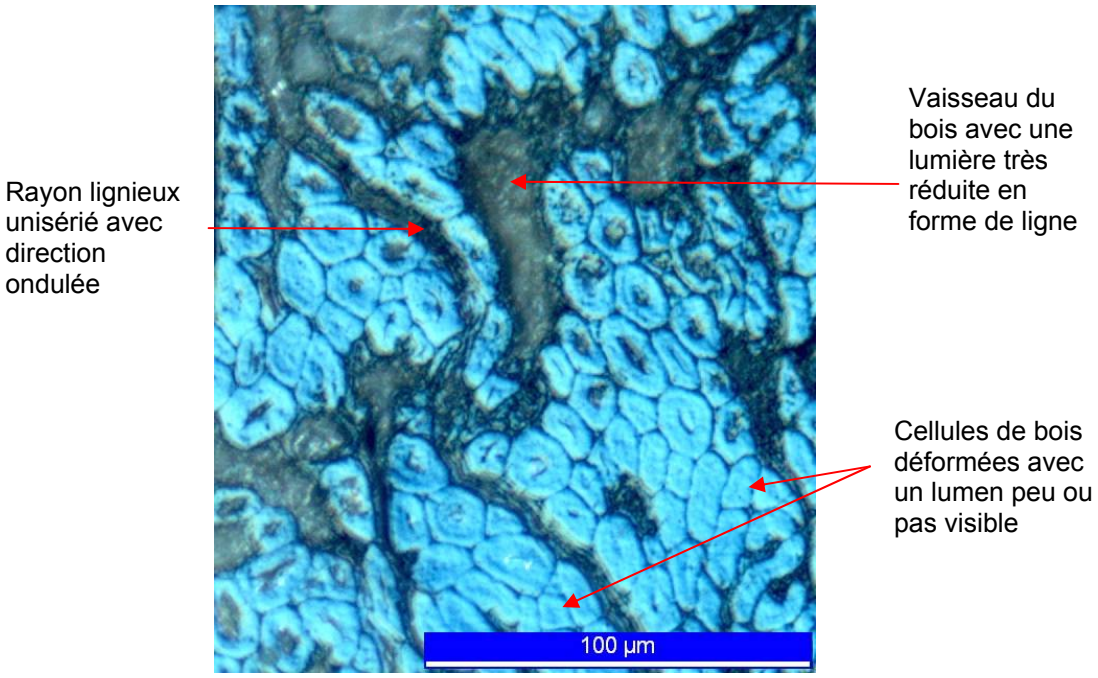


Figure 57: Caractéristiques anatomiques de la zone de bois soudé FDR.

Cas de la PDR :

Dans la PDR le lumen des cellules est visible et les rayons ligneux sont intacts mais la lumières des vaisseaux apparaît déformée et non ronde et lisse (Figure 58).

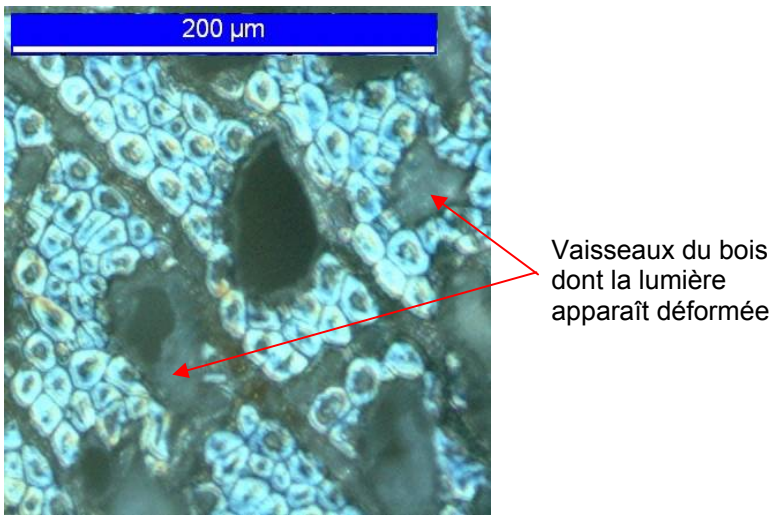


Figure 58: Caractéristiques anatomiques de la zone de bois soudé PDR.

Ces zones sont contenues dans la zone affectée par la chaleur nommée Heat Affecting Zone (HAZ). De cette façon on peut analyser la largeur des trois différentes zones définies précédemment sur chaque microscopie et ainsi définir l'influence de différents paramètres sur la profondeur atteinte par le soudage. La Figure 59 montre un exemple de détermination de l'épaisseur de ces trois zones sur une microscopie d'un échantillon soudé de *Fagus sylvatica* avec une orientation des cernes d'accroissement de 45° par rapport au plan de soudage.

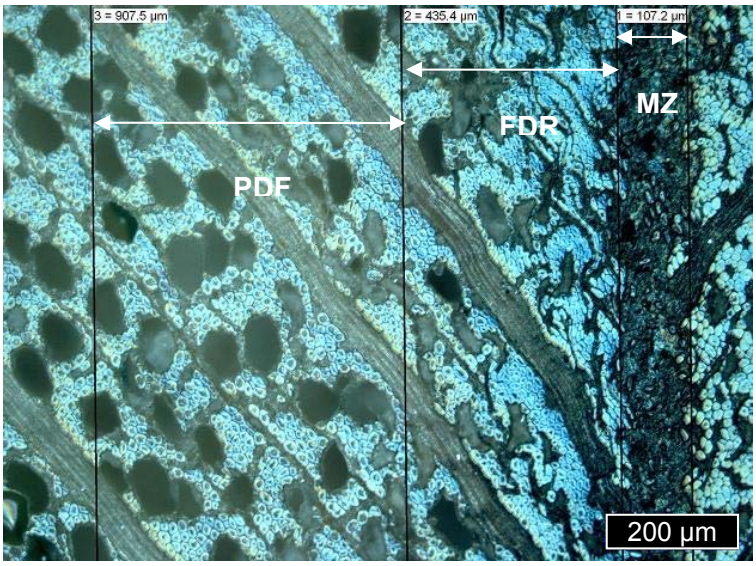


Figure 59: Exemple de traitement d'image microscopique (grossissement X10) pour la détermination de la largeur des zones atteintes par le soudage (ici échantillon soudé à t_s = 8 s).

On trouve dans le Tableau 10 les épaisseurs moyennes mesurées des différentes zones de soudage en fonction de l'orientation des cernes d'accroissement du bois par rapport au plan de soudage pour des éprouvettes d'*Acer campestre*.

Tableau 10: Largeur des différentes zones affectées par le processus selon l'orientation du fil du bois pour des éprouvettes soudées d'*Acer campestre*.

Orientation de fil	MZ (µm)	FDR (µm)	PDR (µm)
0°	50	70	160
45°	40	100	180
90°	100	200	1400

La largeur de la zone affectée est donc bien plus importante pour une direction de fil proche de 90°. Quand les rayons ne sont pas perpendiculaires à la zone de soudage il ne se crée pas une force de résistance dans le sens opposé à la pression perpendiculaire. Le bois est donc plus facilement compressé. La chaleur a un effet sur l'anatomie, d'autant plus si elle est combinée avec la pression. Il est difficile de définir la part de responsabilité que les différents phénomènes physiques prennent sur cette déformation. Sur la photographie de la Figure 60 obtenue par superpositions de plusieurs images prises à différentes hauteurs (le relief ne permet pas d'avoir une image nette de toute la surface pour une seule mise au point), on peut observer à très fort grossissement la ligne de soudage en coupe longitudinale. Sur la partie droite, la grande bande noire correspond à une rupture de la liaison. Elle a eu lieu après le soudage, en effet on reconnaît bien la structure fondue qui a rompu.

Figure 60: Observation à fort grossissement de la zone de soudage sur une coupe de type B (longitudinale) sur une pièce d'*Acer campestre* soudée.

Cependant il semblerait que la partie fragile du joint, là où a eu lieu la rupture, soit située entre la MZ et la FDR. Ceci peut s'expliquer par le fait que les propriétés mécaniques entre les deux zones sont probablement très différentes. On observe dans la masse brune centrale des amas de cellules disloquées et ouvertes, on peut reconnaître encore chez elles, la forme arrondie de leur paroi. On observe aussi des aspérités longues de 30 µm à 40 µm il semblerait qu'elle soit dues à des bulles de gaz qui auraient été emprisonnées dans la matière fusionnée pendant le processus.

5.2.2.3.Observation des extrémités des échantillons soudés

Sur la figure suivante (Figure 61) on peut observer une extrémité de la ligne de soudage en coupe transversale. Plus on va vers le haut de l'image et plus la zone FDR semble large. En effet, aux extrémités, le bois est en contact avec l'air ambiant. Il peut donc y avoir une réaction avec l'oxygène de l'air qui favoriserait une inflammation et expliquerait ainsi ce changement de couleur. Si l'on observe la MZ au bout de l'éprouvette on se rend compte qu'elle s'échappe de l'interface et que le matériau prend une forme arrondie en arrivant à la surface. Ceci montre bien que le matériau doit être particulièrement visqueux pour prendre cette forme. Ce « bourrelet » de matière fondue se forme aussi typiquement lors du soudage des matières plastiques (3.3.2).

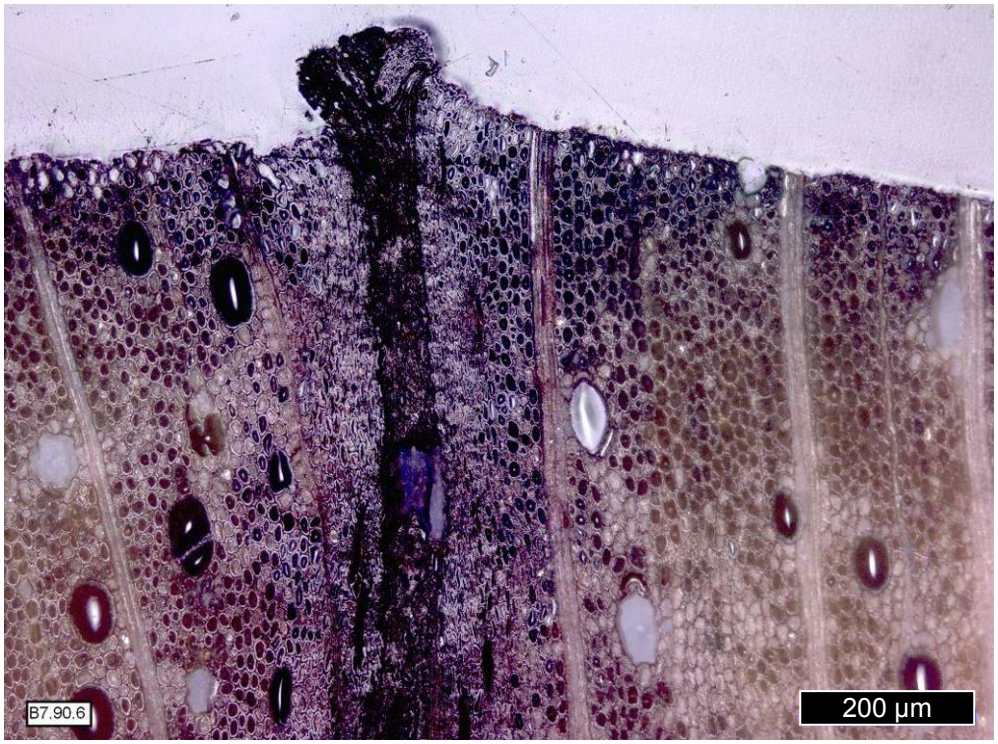


Figure 61: Observation au microscope à lumière réfléchie d'une extrémité latérale d'un joint soudé d'*Acer campestre* (coupe transversale, échantillon d'orientation 90°).

Les analyses microscopiques des liaisons soudées sont difficiles étant donnés l'aspect fragile de la ligne de soudage et sa couleur très sombre. En utilisant une méthode de préparation par sertissage dans la résine époxy, polissage et observation par lumière directe on a pu obtenir de très bon résultats. Les analyses en coupe transversale ont permis d'observer les modifications anatomiques du bois dues à l'effet de la température et de la pression. Trois zones distinctes ont pu être définies et mesurées pour différentes orientations anatomiques du soudage. La zone où les déformations du bois sont encore visibles a une épaisseur variable selon l'orientation anatomique du bois. La valeur de la profondeur atteinte par la température de 200°C calculée dans le paragraphe 5.1.2 (330 µm) entre dans l'orde de grandeur mesurée. Ces résultats seront mis en correlation avec des mesures de densité et permettront la construction d'un modèle numérique de simulation de la température (5.4).

5.2.3. Mesure du taux de restitution d'énergie du couple de pièces soudées par la méthode de la complaisance expérimentale

De même que pour les produits bois collés le comportement mécanique des joints soudés était jusqu'à maintenant mal compris, notamment en ce qui concerne le comportement à la rupture. Dans ce pagraphe, le comportement à la rupture de joints soudés de *Fagus sylvatica* a été examiné en fabricant des éprouvettes DCB (4.3.5.4). L'analyse a été faite par la mesure du taux de restitution d'énergie des joints.

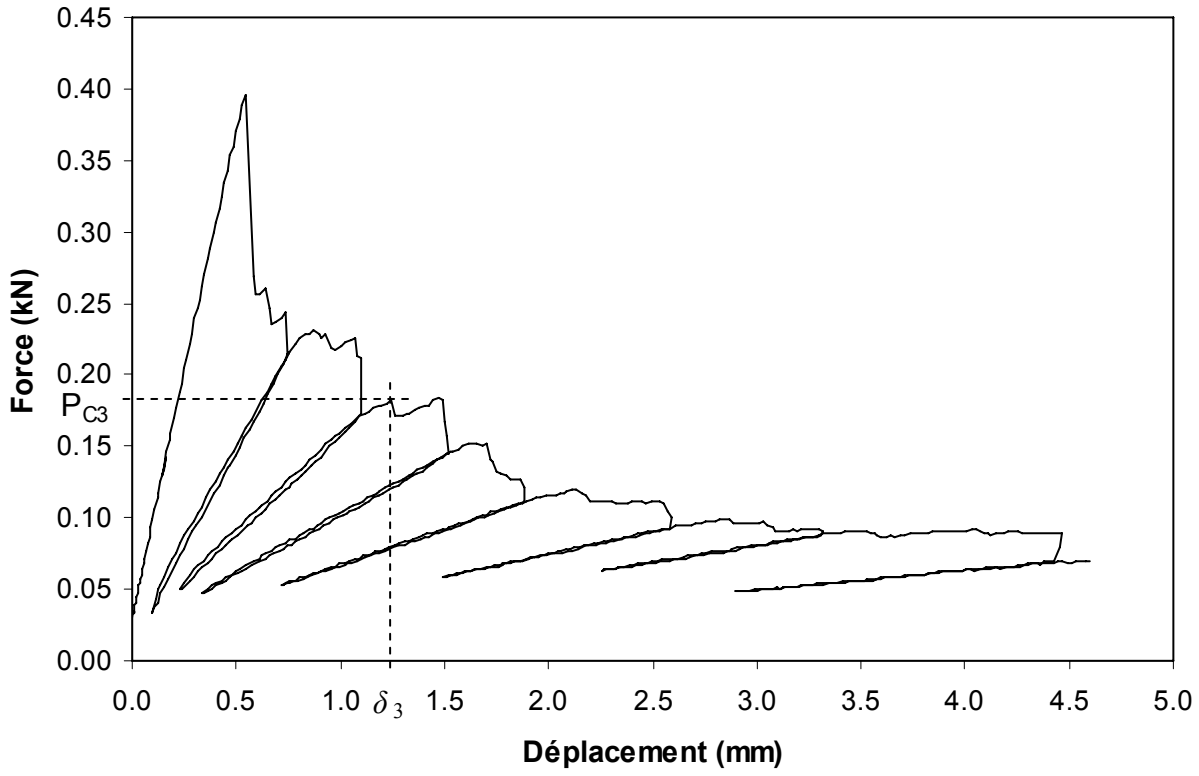


Figure 62: Graphique typique force/déplacement obtenu à partir d'une éprouvette DCB de bois soudé de *Fagus sylvatica*. Détermination des coordonnées (P_{C3} et δ_3) du point de non-linéarité du troisième cycle (x = 3) de chargement – déchargement nécessaire pour le calcul de la complaisance.

On distingue sur le graphique force-déplacement des éprouvettes (Figure 62) trois stades successifs pour chaque cycle :

- un domaine élastique linéaire
- une baisse non linéaire correspondant à la propagation de la fissure
- une rupture brutale

D'après Triboulot *et al.* (1984), le point de non linéarité apparaissant au début de la propagation de la fissure correspond à la charge critique. Ici (Figure 62), la charge critique (P_{cx}) correspond au maximum de la partie linéaire du cycle x.

Il s'agit généralement de la charge maximale. La fissure ne se propage pas symétriquement sur les deux faces de l'éprouvette, c'est pour cela que nous prenons la valeur moyenne des valeurs mesurées de part et d'autre de l'éprouvette afin d'obtenir la longueur de fissure (a). Sur cette figure on peut bien observer le comportement du joint et le comparer aux grandes familles de joints (voir paragraphe 3.2.2.2) décrites par River (1994). Le tracé du graphique force/déplacement permet de donner des informations sur la stabilité de la propagation de la rupture. Le joint peut, d'après ce classement, être considéré comme modéré à faible selon la valeur de sa pente. Sa tendance largement instable qui est due à l'aspect catastrophique de la fracture qui rappelle le comportement du verre. Ce comportement instable est de moins en moins prononcé selon la progression des cycles de chargement/déchargement.

Calcul du taux de restitution G_{Ici} pour chaque éprouvette i :

Lors du cycle x, le repérage de la charge critique (P_{Cix}) par la perte de linéarité ainsi que la valeur de l'ouverture des lèvres pour la charge critique (d_{ix}) nous permettent avec l'équation (5) de calculer la complaisance C_{ix}. Pour déterminer la valeur du terme $\frac{\partial C}{\partial a}$ Duchanois (1984) utilise une approche de la fonction de complaisance par un lissage (moindres carrés) de chacun des points expérimentaux C_{ix} en utilisant une fonction exponentielle du type :

$$C_i = A_i \, e^{(B_i a)} \qquad (14)$$

Cependant, dans notre cas, nous avons observé que la régression par une fonction exponentielle ne produit pas un lissage satisfaisant. Un lissage par une fonction polynomiale d'ordre 3 a donc été effectué indépendamment pour chacune des courbes avant le calcul aux moindres carrés. Ainsi la fonction utilisée est du type :

$$C_i = W_i a^3 + X_i a^2 + Y_i a + Z_i \qquad (15)$$

Où W, X, Y et Z sont des constantes calculées pour chaque éprouvette. Un exemple de lissage avec un coefficient de correlation r^2 supérieur à 0.99 est présenté sur la Figure 63. Ainsi on obtient :

$$G_{Ic} = \frac{P_C{}^2}{2b} \times \left(3W_i a^2 + 2X_i a + Y_i\right) \qquad (16)$$

Ce type de lissage a été récemment utilisé par Yoshihara et Kawamura (2006) dans le cadre d'une étude sur l'estimation de la tenacité en mode I du bois par test DCB.

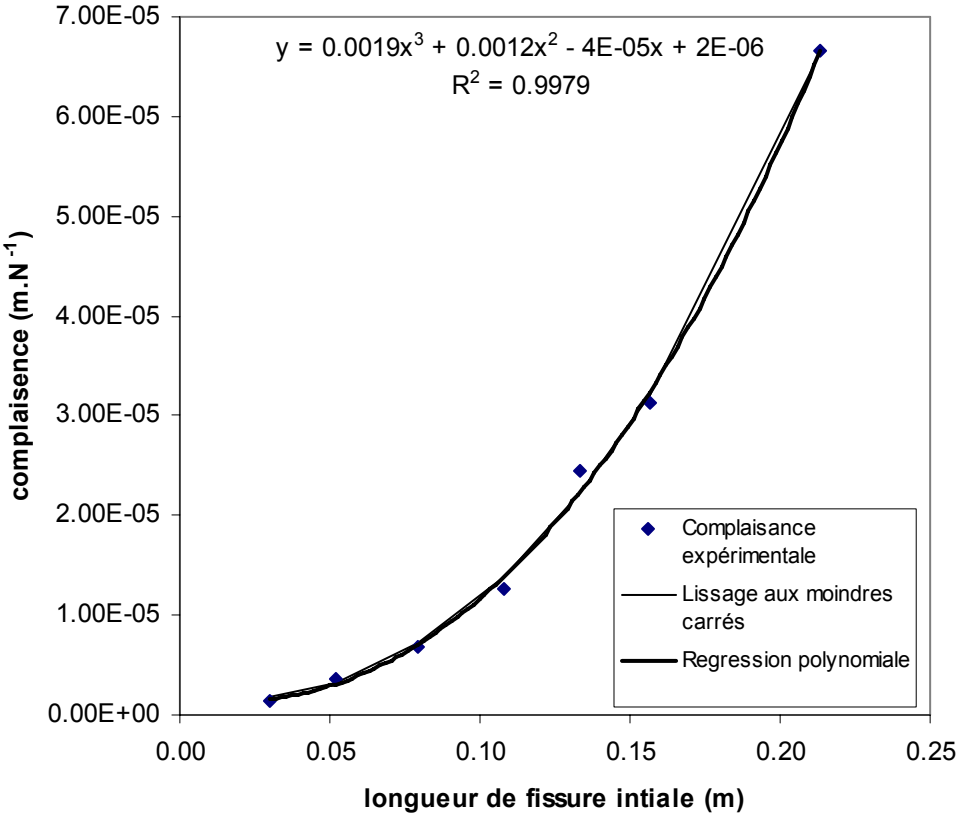


Figure 63: Graphique complaisance/longueur de fissure d'une éprouvette DCB soudée de *Fagus sylvatica*.

L'auteur précise que, grâce à sa simplicité, cette méthode est vouée à devenir une méthode de test standard. Cette méthode s'inspire de la méthode dite de « combinaison de complaisance » utilisée en mode II et III sur les éprouvettes 3-ENF proposée par Davidson (1996). Les résultats sont présentés dans le Tableau 11. Pour chaque éprouvette on a effectué entre 5 et 7 cycles de chargement-déchargement successifs. Ceci nous permet de donner une valeur moyenne intra-éprouvette et une valeur moyenne inter-éprouvette. Le taux de restitution d'énergie d'éprouvettes de bois collé avec des adhésifs thermofusibles classiques varie de 100 à 300 J/m^2 (River 1994). Les valeurs du taux de restitution d'énergie obtenues pour les de bois joints soudés, 106 J/m^2, correspondent à cet ordre de grandeur. On trouve dans la littérature très peu de références concernant le calcul de G_{Ic} pour des assemblages collés avec *Fagus sylvatica*. Takatani et ses collègues (Takatani et Sasaki 1980 ; Takatani *et al.* 1984) ont étudié les joints de *Fagus sylvatica* collés. Les résultats qu'ils ont obtenus sont présentés dans le Tableau 12 ainsi que des références pour le bois massif. La valeur du taux de restitution d'énergie G_{Ic} des liaisons soudées en *Fagus sylvatica* est plus faible que les assemblages collés classiques et très inférieure à la valeur obtenue pour le bois massif, ce qui indique que la fissure se propage dans le joint.

Tableau 11: Valeurs du taux de restitution d'énergie G_{Ic}, longueur de fissure a, moyenne et écart-type global pour des éprouvettes DCB de *Fagus sylvatica* soudées.

Numéro de l'échantillon (i)		Nr. du cycle de chargement / déchargement (x)							G_{Iic} moyen (J/m2)
		1	2	3	4	5	6	7	
1	a (m)	0.07	0.10	0.12	0.14	0.17	0.20		
	G_{Ic} (J/m^2)	85	89	97	105	99	111		98
2	a (m)	0.03	0.05	0.08	0.11	0.13	0.16	0.21	
	G_{Ic} (J/m^2)	90	89	164	108	143	157	94	121
3	a (m)	0.05	0.08	0.11	0.13	0.16			
	G_{Ic} (J/m^2)	101	59	83	113	91			90
4	a (m)	0.03	0.05	0.10	0.12	0.14	0.16	0.21	
	G_{Ic} (J/m^2)	118	96	62	65	57	72	96	81
5	a (m)	0.03	0.06	0.08	0.12	0.16	0.20	0.21	
	G_{Ic} (J/m^2)	117	97	106	131	66	84	116	103
6	a (m)	0.07	0.09	0.12	0.14	0.16	0.19		
	G_{Ic} (J/m^2)	77	97	95	105	126	147		108
7	a (m)	0.06	0.10	0.12	0.15	0.19			
	G_{Ic} (J/m^2)	123	73	72	127	178			115
8	a (m)	0.05	0.08	0.10	0.14	0.17	0.19		
	G_{Ic} (J/m^2)	76	90	102	106	94	91		93
9	a (m)	0.06	0.08	0.10	0.12	0.16	0.18		
	G_{Ic} (J/m^2)	176	170	165	131	120	121		147
Moyenne globale G_{Ic} (J/m^2)				**106**					
Ecart-type global G_{Ic} (J/m^2)				**30**					

Ceci est en accord avec les résultats qui ont été obtenus en mode de rupture II (Gfeller 2003). En effet les essais de cisaillement du joint de soudage donnent une valeur généralement inférieure à celle obtenue avec des adhésifs. Les mesures de ténacité des couples bois-colle ont montré que les résultats sont principalement liés à la résistance à la rupture de l'adhésif (River 1994).

Tableau 12: Taux de restitution d'énergie Glc d'éprouvette DCB en *Fagus sylvatica* pour différents types de joints.

Substrat			G_{Ic} (J/m^2)	Ref.
Fagus sylvatica	Adhesif	Amine-cured epoxy	200-340	Takatani et Sasaki (1980)
		Poly(vinylacetate)/phenol	390	Takatani *et al.* (1984)
		Phenol-formaldehyde	170	
		Resorcinol-formaldehyde/filler	390	
	Bois massif	-	475	Triboulot *et al.* (1984)

Lavisci *et al.* (2003) ont effectué des tests sur le bois massif puis des tests sur l'adhésif. Ils ont pour cela réalisé des blocs d'adhésif pur et en ont déterminé les caractéristiques mécaniques. Seulement, dans notre cas, il n'est pas possible d'isoler le matériau qui constitue la ligne de soudage afin d'en faire un bloc suffisamment grand pour le tester. D'autre part, contrairement à un adhésif, le joint soudé n'a pas une composition chimique homogène. Il est un complexe d'enchevêtrements de fibres de bois plus ou moins dénudées de leur matrice et d'un mélange de matériaux fondus et durcis à nouveau. Il s'agit de bois modifié sous l'effet de la température de fortes forces mécaniques de friction et de pression. On ne peut l'isoler sous la forme telle qu'elle existe dans le joint. Il n'a donc jusqu'à présent jamais été possible de déterminer les caractéristiques mécaniques du joint soudé pur.

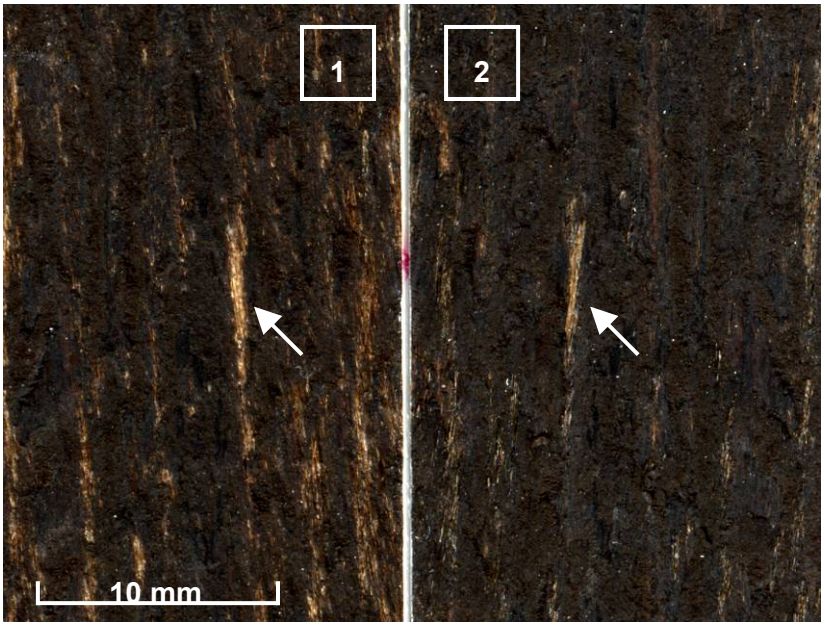


Figure 64: Eprouvette DCB après ouverture : la surface noircie présente de rares amas de fibres. Ici quelques fibres de l'éprouvette 1 on été arrachées et se retrouvent sur l'éprouvette 2 (flèches).

Dans le cas des joints bois-colles, l'hétérogénéité des résultats des essais DCB s'explique par le fait que la rupture a lieu de façon aléatoire dans l'adhésif ou dans le joint de colle (Duchanois 1984). Pour le soudage la rupture a lieu en majorité dans le joint. En effet lorsque l'on observe des éprouvettes ouvertes de DCB la surface est brune et présente quelques amas très fins de fibres de bois (Figure 64). La rupture dans le bois, l'équivalent d'une rupture cohésive dans le cas d'un adhésif, est donc très peu présente dans les DCB de bois soudés. Cela explique la bonne homogénéité des résultats obtenus. On pourrait ainsi faire l'hypothèse que la valeur de G_{Ic} obtenue est propre au joint pur. Il n'existe actuellement pas de moyen pour le vérifier. Si l'on observe l'allure de la courbe lors de la propagation de la fissure on peut la considérer comme relativement instable. Ce type de propagation de fissure est considéré comme assez dangereux pour les applications structurales (River 1994).

5.2.4. Stabilité à l'eau des joints soudés

Comme nous l'avons dit le soudage provoque une modification thermique locale forte à l'interface. Pour les domaines de température qu'elle concerne, cette modification est comparable avec les méthodes de traitements thermiques du bois connus (Rétification, Thermowood, VTT, Platowood, etc…). Il est connu que pour ces types de traitements le bois se trouve beaucoup plus stable. En effet la disparition des hémicelluloses diminue le taux de groupement ─OH du bois qui est responsable de sa grande affinité avec l'eau. L'hygroscopie des bois traités thermiquement est beaucoup plus faible que celle des bois naturels. À titre d'exemple, un bois traité n'atteint une humidité de 15% que lorsqu'il est soumis à une atmosphère humide à 90% alors qu'un bois non traité atteint 28% (Keith and Chang 1978). On peut penser que le traitement thermique du soudage aurait donc dans la zone soudée tendance à baisser l'hydrophobicité du matériau et ainsi lui donner une certaine stabilité vis-à-vis de la résistance à l'eau. Les tests menés selon les indications du paragraphe 4.3.5.5 ont permis de définir la résistance à l'eau des liaisons soudées. Le Tableau 13 montre l'évolution de la résistance mécanique en cisaillement de joints soudés de *Fagus sylvatica* sans traitement, avec un traitement de 1 h dans l'eau et enfin avec un traitement de 3 h dans l'eau. Ces tests ont aussi été réalisés avec des pièces collées avec un adhésif type PVAc (Polyvinylacétate). La perte de la résistance des liaisons soudée est de 80% après une heure de traitement dans l'eau et pratiquement de 100% après trois heures de traitement dans l'eau alors que celle des liaisons collées atteint 37% après 3 heures dans l'eau. On constate donc que le contact direct avec l'eau provoque une baisse catastrophique de la résistance mécanique de l'assemblage. Le traitement thermique provoqué par le soudage

n'a donc ici pas du tout le même effet de stabilisation à l'humidité que dans le cas des bois thermo-traités.

Tableau 13: Tests de résistance à l'eau des liaisons soudées et collées de *Fagus sylvatica*, valeurs des résistances mécaniques au cisaillement par la traction.

Type de Connection	Traitement eau (h)	Moyenne (N/mm^2)	écart-type (N/mm^2)	perte de résistance (%)
PVAc	0	14.88	1.7	0
PVAc	3	9.31	2.7	37
Soudage	0	6.39	1.3	0
Soudage	1	1.31	1.1	80
Soudage	3	0.10	0.2	98

Il existe pour cela plusieurs explications possibles :

1. Les joints soudés ont montré lors de l'analyse DCB que la MZ est constituée d'un matériau rigide et fragile dont le comportement est comparable à celui du verre. Une sollicitation mécanique provoque donc la rupture et la propagation de la fissure entière. Le matériau de la MZ n'est pas non plus un matériau homogène mais possède une certaine porosité et contient des débris cellulaires (5.2.2). Si il est composé en grande partie de lignine, celle-ci a tendance à se ramollir avec l'humidité ce qui peut provoquer de forte discontinuités dans la MZ et faciliter les phénomènes de rupture lors du retrait ou du gonflement. Le volume de la MZ est proportionnellement très faible vis-à-vis du volume de bois intact de part et d'autre de la ligne de soudage. Ce bois intact a une grande affinité avec l'eau. Cela signifie que dans le cas d'un contact direct avec l'eau, la forte augmentation de volume du bois, de part et d'autre de la ligne de soudage, va exercer directement des forces de cisaillement au niveau du joint et le solliciter fortement. De façon logique, plus le volume de bois intact sera important par rapport à celui de la MZ, plus la connection soudée sera sollicitée. Etant donnée sa résistance relativement faible elle sera rapidement rompue.

2. Lors de la mise en relation des résultats d'analyse microscopique avec la simulation numérique de la température nous avons pu constater que les zones FDR et PDR gardaient une structure cellulaire encore reconnaissable malgré la température élevée à laquelle elles étaient soumise. Ces températures correspondent à celles des traitements thermiques du bois connus et la MZ devrait donc avoir acquis, au cours du soudage, des propriétés hydrophobes par la perte des groupements hydroxyles. Cependant l'épaisseur globale de ces deux zones est très faible et sa stabilité et son de degré de traitement thermique suivent un gradient en direction de l'interface centrale. Cela signifie qu'elle n'est pas du tout homogène et ne peut donc pas avoir des propriétés hygroscopiques identiques. D'autre part

cette couche ne protège pas la MZ sur les surfaces ouvertes en contact avec l'air (ou l'eau) de l'échantillon. S'il y a donc une possible augmentation locale de l'hydrophobicité du bois de part et d'autre de la surface soudée, elle n'est pas suffisamment étendue et homogène afin de protéger le joint des délaminations dues à de fortes humidités.

Le comportement hygromécanique du bois n'est pas le même si l'on compare des tests de variations d'humidité avec des tests de contact direct avec l'eau. Le comportement mécanique des liaisons soudées devrait aussi être observé sous différentes humidités de l'air pour une meilleure compréhension de la faible résistance à l'eau des liaisons soudées. Toujours est-il que des solutions doivent être mises en œuvre afin de palier à cette mauvaise résistance à l'eau si l'on désire utiliser les liaisons soudées pour des produits soumis aux conditions atmosphériques extérieures. Des solutions sont présentées et discutées dans le paragraphe 5.6.

5.2.5.Perte de matière lors du soudage

Lors de la friction, le matériau à l'interface entre les deux pièces change de propriété et devient visqueux. Tel que nous l'avons constaté dans le paragraphe 5.2.1, il se produit alors une extrusion du matériau par les bords de l'éprouvette. D'autre part une forte quantité de fumées se dégage, il y a donc une perte de matière sous toutes ses formes et densification au niveau de l'interface. L'objectif de ce paragraphe a été d'observer la perte de matière afin de la quantifier.

5.2.5.1.Perte de matière et volume de gaz formé

Ces observations ont été menées sur les éprouvettes destinées à la réalisation des essais DCB dont la fabrication est décrite en 4.3.5.4. Leur épaisseur exacte a été relevée avant et après soudage ainsi que leur masse exacte. La masse de la matière expulsée a été pour chaque éprouvette récupérée et soigneusement pesée. D'après la loi de Lavoisier on peut schématiser conservation de la masse durant le soudage (Figure 65).

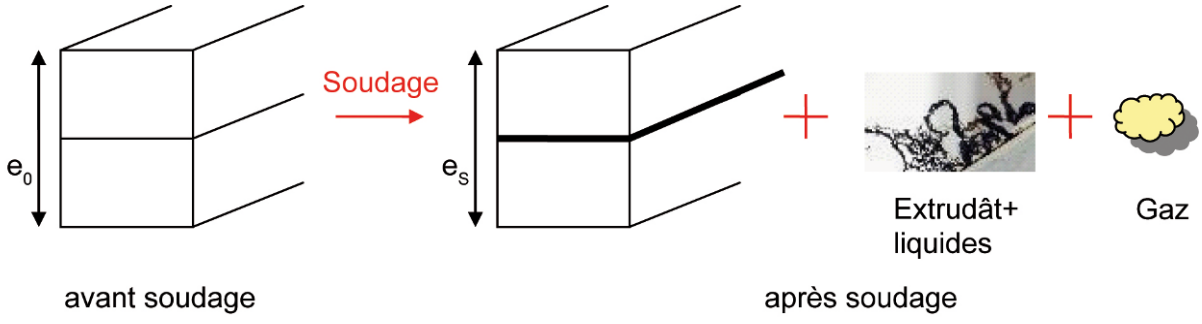


Figure 65: Schéma de conservation de la masse durant le soudage.

On a alors défini les notations suivantes : M_0 = Masse du couple de pièces de bois avant soudage, M_s = Masse du couple de pièces de bois après soudage, M_{EX} = Masse de l'extrudat, M_{Gaz} = Masse de gaz, e_0 = épaisseur de la pièce avant soudage, e_S = épaisseur de la pièce après soudage, e_d = épaisseur de la partie densifiée, ρ_{m0} = masse volumique du bois, ρ_{mS} = masse volumique de l'éprouvette après soudage, ρ_d = masse volumique de la partie densifiée. On considère que les liquides qui se forment durant le soudage soit s'évaporent, et donc font partie de la fraction des fumées, soit diffusent dans le bois et donc leur masse est comptée dans la masse de l'éprouvette. Les résultats des mesures obtenues sur 5 éprouvettes sont présentés dans le Tableau 14.

Tableau 14: Résultats de la perte de matière d'éprouvettes de *Fagus sylvatica* durant le soudage.

Eprouvette	M_0 (g)	M_S (g)	e_S (mm)	ρ_{m0}(kg/m^3)	M_{EX} (g)	ρ_s(kg/m^3)
1	163,31	161,54	39,05	631,04	0,54	640,18
2	174,37	172,93	39,07	673,78	0,42	685,35
3	173,52	172,07	39,07	670,48	0,37	681,93
4	186,10	184,57	39,07	719,11	0,55	731,45
5	170,16	168,70	38,97	657,52	0,48	668,59
Moyenne	**173,49**	**172,00**	**39,05**	**670,38**	**0,47**	**681,50**

On remarque que la masse de l'extrudat représente environ 1/3 de la masse totale perdue. Une grande partie du matériau s'est donc dissipée sous forme de gaz. D'après ces résultats on peut donner le volume approximatif de gaz dégagé pour le soudage d'une éprouvette (V_{Gaz}). D'après la loi de Lavoisier on peut écrire :

$$M_{Gaz} = M_0 - \left(M_{EX} + M_S\right) \qquad (17)$$

Ainsi on obtient une valeur de M_{Gaz} moyenne de 1 g pour chaque éprouvette. Afin de mesurer le volume de gaz dégagé on a fait l'hypothèse que les fumées se composaient essentiellement de vapeur d'eau, de dioxyde de carbone et probablement de monoxyde de carbone. Les valeurs de masse volumique des gaz pouvant être présents lors du soudage dans les conditions normales de température et de pression sont les suivantes : $\rho_{vapeur\ d'eau}$ (à 100°C) = 0,6 kg/m^3, ρ_{CO} = 1,25 kg/m^3, ρ_{CO2} = 2 kg/m^3. Si on suppose que la masse volumique des gaz dégagés est en moyenne de 1 kg/m^3 on aura alors dégagé environ 1 L de gaz pour le soudage d'une surface de 6400 mm^2 (une pièce dans notre cas), soit 156 L de gaz pour 1 m^2 de bois soudé. Ce volume calculé est donc considérable et insiste sur le fait qu'une meilleure connaissance des fumées dégagées lors du soudage est nécessaire. Avec

les informations collectées durant ces mesures il est possible aussi de calculer l'épaisseur de bois atteinte par la densification. Le volume de bois densifié (V_d) peut s'écrire ainsi :

$$V_d = \frac{M_d}{\rho_d} \qquad (18)$$

avec M_d la masse de bois densifié et ρ_d la masse volumique de la partie densifiée. De même

$$V_d = V_S - V_B \qquad (19)$$

avec V_S le volume de l'éprouvette soudée et V_B le volume de bois non densifié. Ainsi on a les 2 égalités :

$$\frac{M_S}{\rho_{ms}} = \frac{M_B}{\rho_{m0}} + \frac{M_d}{\rho_d} \qquad (20)$$

et

$$M_S = M_B + M_d \qquad (21)$$

On résout le système et on obtient :

$$M_B = M_S \times \frac{\rho_{m0}\left(\rho_d - \rho_S\right)}{\rho_S\left(\rho_d - \rho_{m0}\right)} \qquad (22)$$

Ainsi dans notre cas M_B = 163 g, M_d = 9 g et donc V_d = 9000 mm^3. L'épaisseur densifiée est donc de 1,41 mm, soit 700 µm de chaque côté de la ligne de soudage. Il s'agit d'un calcul qui correspond donc aux mesures effectuées par densitométrie lors des études précédentes (Leban *et al.* 2004). Cette épaisseur est deux fois plus faible que celle trouvée pour *Acer campestre* lors de l'étude anatomique (5.2.2). Ceci souligne déjà des différences fondamentales entre les différentes essences lors du soudage. Cet aspect sera traité dans le paragraphe 5.5.

5.2.5.2.Evolution de la perte de matière en fonction de t_s et de p_s

Ces observations ont été menées sur les éprouvettes destinées à la réalisation des essais d'analyse de l'évolution des propriétés physiques et chimiques de *Fagus sylvatica* en fonction du temps de soudage (5.3). Les éprouvettes sont de géométrie standard (4.1.2) et ont été soudées avec les paramètres de soudage du Tableau 15. Leur épaisseur exacte a été relevée avant et après soudage. La Figure 66 indique l'évolution de la perte dimensionnelle de ces éprouvettes en fonction du temps de soudage. Chaque point correspond à la moyenne de 10 mesures. La perte dimensionnelle, bien que la dispersion soit assez élevée, semble être linéaire par rapport au temps de soudage quelque soit la pression appliquée. De même, la pente de la droite de regression est environ de -0,015 pour les trois cas.

Tableau 15: Paramètres de soudage pour l'étude de l'évolution de la perte de matière en fonction de t_s et p_s.

Paramètre	Valeur
Machine	BRANSON 2700
p_s	0,66 N/mm^2 ; 1,33 N/mm^2 ; 2,00N/mm^2
p_m	identique à p_s
t_s	de 1s à 11s ; pas : 1s

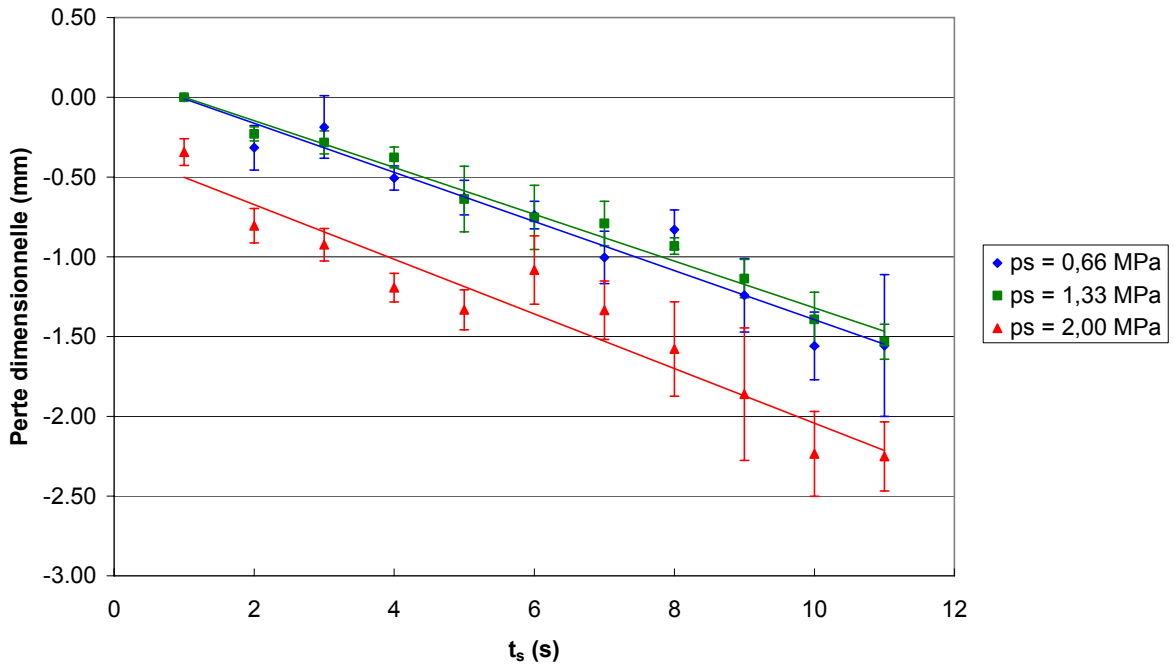


Figure 66: Evolution moyenne de la perte dimensionnelle en fonction du temps de soudage (t_s) et de la pression de soudage (p_s). Les indicateurs correspondent aux écart-types de chacune des moyennes.

La droite correspondant à la perte de matière pour les échantillons soudés à 2.00 N/mm^2 a une valeur de départ beaucoup plus basse. Ici il ne s'agit pas de la perte de matière mais de la perte de dimension due à la compression du matériau. Comme l'amplitude de la friction est restée identique durant tous les essais on considère que la quantité de matière expulsée est la même à chaque vibration une fois que la phase d'extrusion est atteinte. Ceci explique le comportement plus ou moins linéaire de la perte dimensionnelle en fonction du temps. Cependant en augmentant la valeur de la pression de soudage (p_s), on devrait s'attendre à obtenir une force de friction plus élevée et donc une pente de la courbe de perte dimensionnelle plus forte. Or ce n'a pas été le cas dans cette expérience. L'explication possible à ce phénomène est que la densification qui se produit au niveau de l'interface

détermine la quantité de matériau à expulser. Or cette densification n'a pas la même étendue mais a une valeur maximale qui reste constante en fonction du temps de soudage (voir paragraphe 5.3.1, Figure 76). Notons aussi l'importante dispersion des résultats qui ne permet pas de confirmer cette hypothèse. D'autre part la mesure des pièces a été effectuée 24h après le soudage. Ce qui signifie que les déformations élastiques du bois dues à la pression de soudage ont pu disparaître durant ce temps de pause. On ne retrouve pas ces informations dans cette mesure. La principale information que l'on peut tirer de cette expérience est que la perte dimensionnelle lors du soudage suit visiblement une courbe linéaire. Cette hypothèse demanderait à être vérifiée par une mesure de perte dimensionnelle directement durant le soudage, ce qui n'a pas pu être entrepris durant ces travaux.

5.2.6.Composition chimique des fumées

Le soudage de deux pièces de bois provoque une brutale augmentation de la température à l'interface entre les deux pièces. Selon la valeur de la température atteinte certains éléments du bois vont se dégrader et les plus petites substances vont se volatiliser ou être entraînées par la vapeur d'eau. Lors d'un soudage d'*Acer campestre* par exemple, on peut observer une fumée blanche tirant sur le beige se dégageant de l'interface (Figure 44). L'analyse de cette fumée capturée directement pendant le soudage permet de donner des premières informations sur les mécanismes de dégradation du bois. Les essais ont été effectués selon la méthode décrite au paragraphe 4.3.6.1. On obtient en résultat le spectre de la solution de fumées dissoutes dans le dichlorométhane. Le graphique de la Figure 67 représente le spectre global de la mesure (de 0 à 40 s). Le second graphique (Figure 68) représente le détail du spectre entre 0 et 15 s. Un logiciel d'analyse permet ensuite de donner les probabilités des molécules identifiées. Les pics avant 4 s ne pourront pas être analysés car il s'agit de molécules de faible poids moléculaire, soit inférieurs à 60 g/mol (Eau, CO, formaldéhyde, méthanol, CO_2, éthanal, acétone, etc.). Ceci nécessiterait une analyse plus fine grâce à une autre méthode. Cette mesure révèle une grande quantité de pics qui témoignent de la présence d'une grande variété de substances dont la plupart sont dérivées de la lignine :

- Le 4 (2-methyl propane) phenol[*] à (7,92 s) pour 9%
- La Vanilline (à 9,04 s) pour 90%

[*] Substance trouvée grâce la méthode de la banque de données (voir 4.3.6.1)

- L'Eugenol (à 8,49 s et à 9,67 s) pour 46% et 64%
- Le 2-Furanmethanol (ou alcool furfurylique) (à 8,79 s) pour 9%

L'isoeugenol* (à 13,04 s) pour 35%Les autres substances ont des pourcentages plus faibles, on y trouve notamment des cycles benzonique azotés (Amines), mais les bases de données des GC sont parfois erronées lorsqu'on doit analyser des substances complexes telles que celles-ci. Ces substances sont inexistantes dans le bois.

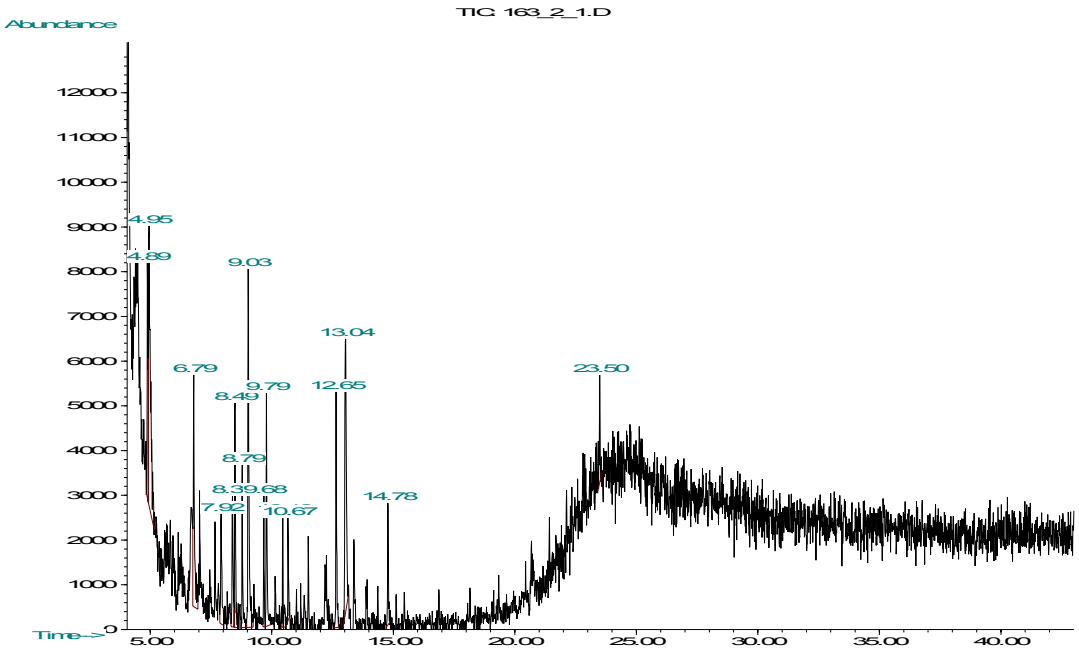


Figure 67: Mesure GC/MS des fumées sur 40 s.

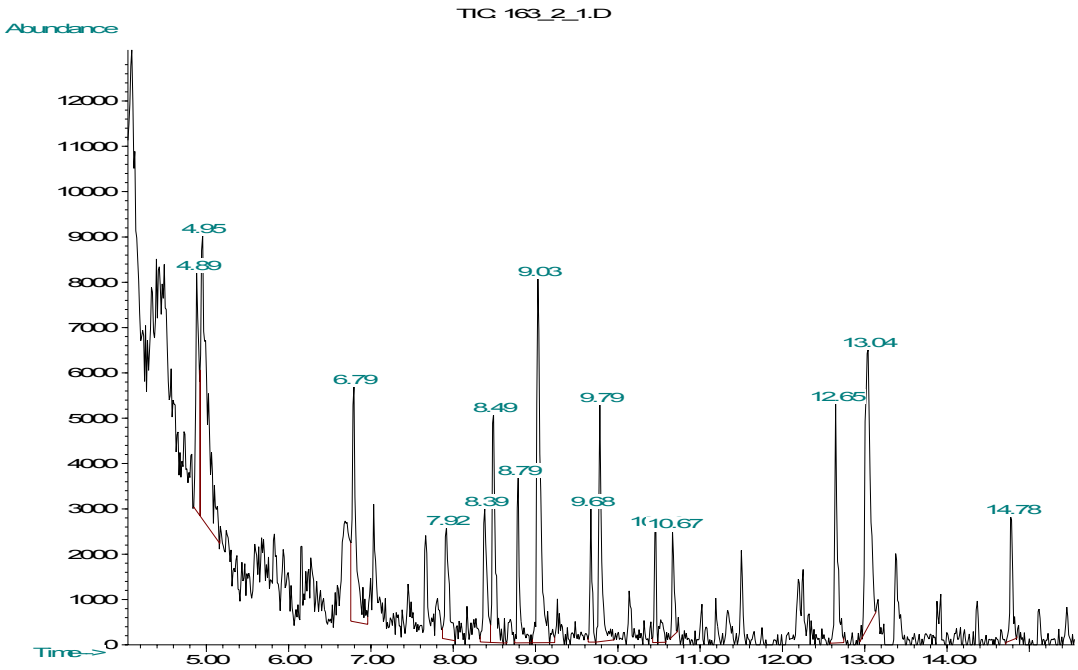


Figure 68: Détail de la mesure GC/MS des fumées entre 0 et 15 s.

On considère donc qu'il ne doit pas y avoir de formation d'amine. Le 4-(2-methylpropane) phénol à 7,92 s est un pic peu élevé. Si l'on observe sa structure on la retrouve dans celle de la lignine au niveau des groupes de lignols assemblés par des liaisons β ─ β. La rupture de cette liaison peut former une chaîne carbonée de type butane. Ce type de liaison n'est pas très fréquent dans la structure de la lignine (2 à 5%) (Fengel et Wegener 2003), ceci explique donc la petite taille du pic. La vanilline (Figure 69) est présente en très faible quantité dans certaines essences.

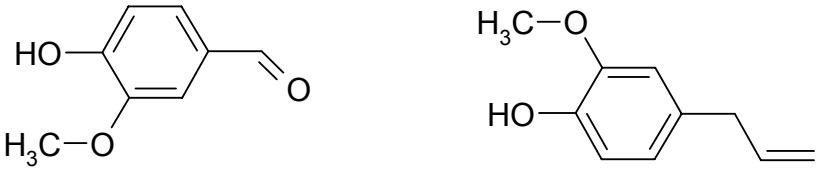


Figure 69: Formule de la vanilline (à gauche), formule de l'eugenol (à droite).

Cependant cette molécule se retrouve dans la structure de la lignine dans les groupes guaiacyl. Le soudage provoque donc la rupture des liaisons de type α ─ O ─ 4 des groupes de type coniferyliques. D'après Nimz (1974) cette liaison est l'une des plus fréquentes rencontrées entre les unités de lignine (α ─ O ─ 4 et β ─ O ─ 4) représentent 65% des liaisons). Elle est impliquée dans les couplages de type β ─ β et β ─ 5 des radicaux conyferiliques avec d'autres radicaux phénoliques pour former des dilignols (exemple : D,L-Pinoresinol Dehydroconyferyl-alcool). La vanilline a une température d'ébullition de 285°C, elle est aussi dès 100°C facilement entraînée par la vapeur d'eau. Sa présence dans les fumées est certainement due à ces deux phénomènes. Ceci confirme bien le champ de température mesuré par TIR. Cette substance est industriellement obtenue par oxydation de la lignine en milieu alcalin. L'eugénol (Figure 69) est présent en très faible quantité dans les feuillus. Il s'agit d'un phénol de faible poids moléculaire qui peut apparaître lors de la biosynthèse de la lignine. Il peut être extrait par distillation à la vapeur. Comme la vanilline il peut être entraîné par la vapeur à partir de 100°C car il est volatile. Son point d'ébullition est de 253°C. La vanilline et l'eugénol sont des substances nocives mais pas toxiques. Dans notre cas du soudage on retrouve la structure de l'eugénol dans les unités guaiacyl de la lignine, de même que pour la vanilline. Il doit donc y avoir rupture de la liaison β ─ O ─ 4. Le milieu réactionel que constitue l'interface entre les deux pièces de bois doit permettre à la double liaison C ═ C de se déplacer de α ─ β à β ─ γ.

Le 2-Furanmethanol (ou alcool furfurylique) (Figure 70) est le seul composant relevé qui est issu de la dégradation des polyoses et en particulier des hémicelluloses. On le retrouve généralement dans la littérature de la carbonisation du bois. Il apparaît à la suite de la rupture des liaisons glucosidiques des chaînes de pyranoses pour des températures allant de 220°C à 290°C selon les conditions de pression.

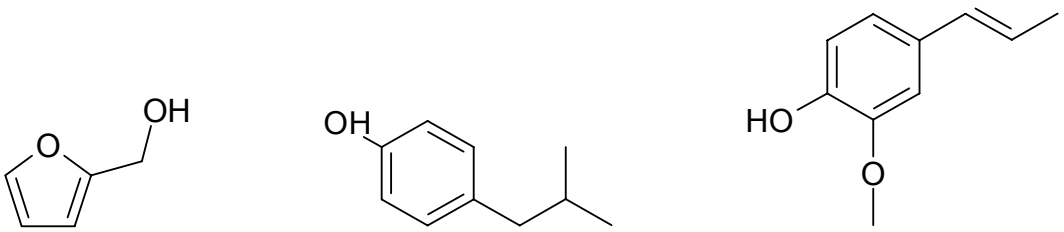


Figure 70: Formule de l'alcool furfurylique (à gauche), formule du 4-(2-methylpropane)phenol (au centre) et formule de l'isoeugenol (à droite).

Cette molécule est considérée comme toxique mais elle apparaît en très faible quantité sur le chromatogramme et dans la littérature en ce qui concerne la combustion du bois (0,2% du volume des produits de dégradation pour un traitement à 400°C du bois et à l'état de trace pour un traitement du bois à 340°C selon Fengel et Wegener 2003). Sa température d'ébullition est de 170°C ce qui explique son évaporation dans les fumées dès son apparition. L'isoeugénol est un produit classique de la carbonisation du bois. Il est aussi issu de la dégradation de la lignine. Comme l'eugénol il est issu de la rupture des liaisons entre β ─ O ─ 4 les groupes guaiacyl de la lignine. Cette molécule est nocive en cas d'ingestion. Bien que cette analyse ne nous a pas permis de détecter des substances de faibles poids moléculaires, qui vraissemblablement correspondent à la fraction la plus élevée des fumées, elle nous a donné des informations importantes concernant les phénomènes chimiques liés au soudage. On a pu constater notamment que les substances telles que la vanilline et l'eugénol se trouvent en quantité importante vis-à-vis des autres substances de poids moléculaire similaire. La présence de ces substances permet de mettre en évidence les transformations de la lignine lors du soudage ainsi que celle de la cellulose. Il est difficile à partir d'une telle mesure de définir la toxicité des fumées du soudage étant donné qu'il manque une grande fraction de substances. Les résultats peuvent être mis en relation avec les mesures de la ligne de soudage discutées en 5.3.

Au cours de ces premiers paragraphes de la discussion (5.1 et 5.2) on a pu mettre en place plusieurs méthodes d'analyse et de caractérisation principalement physiques afin d'étudier les liaisons bois soudés. Celles-ci complètent les méthodes jusqu'alors expérimentées dans l'étude du soudage par friction linéaire du bois (3.3).

- La nouvelle technique de mesure de température par TIR s'est révélée être une méthode fondamentale pour l'analyse *in situ* du joint de soudage durant sa formation. Celle-ci a demandé le développement d'outils et de méthodes d'analyses permettant de produire des résultats pertinents. Le spectre global de la température maximale de soudage obtenu pour les essences testées se situe entre 130°C et 310°C. La

température moyenne de la ligne de soudage se situe entre 140°C et 225°C. Grâce à une méthode de mesure de la température interne par TIR on a pu montrer que la valeur de la température moyenne mesurée correspond environ à la température interne de l'échantillon. Ce critère d'analyse fondamental sera donc utilisé pour la compréhension de la formation physico-chimique du joint durant le soudage.

- Les investigations de microscopie optique par lumière réfléchie ont montré l'existence de différents types de déformations anatomiques du bois de part et d'autre du joint soudé. On a pu ainsi définir trois types de zones correspondantes à différents critères de déformations anatomiques. Ces déformations peuvent être mises en relation avec la température agissant aux différentes profondeurs. La largeur de la zone fondue varie de 50 µm à 100 µm. On utilisera ces critères d'analyse par la suite afin de comprendre les modifications qui se produisent au cours du temps de soudage.
- La mesure du taux de restitution d'énergie du couple de pièces soudées par la méthode de la complaisance expérimentale en utilisant l'éprouvette DCB a permis de donner de nouvelles informations sur les caractéristiques mécaniques des joints soudés. Le taux de réstitution d'énergie G_{Ic} obtenu est de 106 ± 30 J/m^2. Le joint a donc une résistance modérée à faible et a une propagation de fissure assez instable voir catastrophique comparable au comportement du verre. Dans tous les cas il s'est produit une rupture de type adhésive. Des liaisons soudées immergées dans l'eau pendant plus de trois heures perdent la totalité de leur résistance mécanique en cisaillement.
- La perte de matière durant le soudage est un phénomène visiblement linéaire. Son analyse a permis l'évaluation du volume de fumées produites lors d'un soudage d'une surface de bois (humidité d'équilibre 12%) donnée: 156L/m^2. Cet important volume de fumées contient visiblement en grande partie de la vapeur d'eau et des substances de poids moléculaire faible. L'analyse des fumées pour une fraction où les poids moléculaires sont supérieurs à 60 g/mol a révélé la présence de composés dérivés de la lignine (vanilline et eugénol principalement) et d'acide furfurylique issus de la décomposition de la lignine du bois.

Le paragraphe suivant décrit les méthodes développées précédemment ainsi que les réflexions issues de l'analyse des résultats afin de proposer un scénario physico-chimique du développement de la microstructure interfaciale.

5.3. Compréhension de l'évolution des caractéristiques physiques, anatomiques et chimiques des assemblages soudés en fonction du temps de soudage

5.3.1. Evolution des caractéristiques physiques en parallèle à l'évolution de la température

La mesure de température durant le soudage est essentielle pour comprendre la formation de la structure physique et de la composition chimique du joint. L'évolution de la température moyenne de la ligne de soudage (voir paragraphe 4.3.1.1, étape 2) a été relevée pour des éprouvettes de *Fagus sylvatica* de géométrie standard (4.1.2).

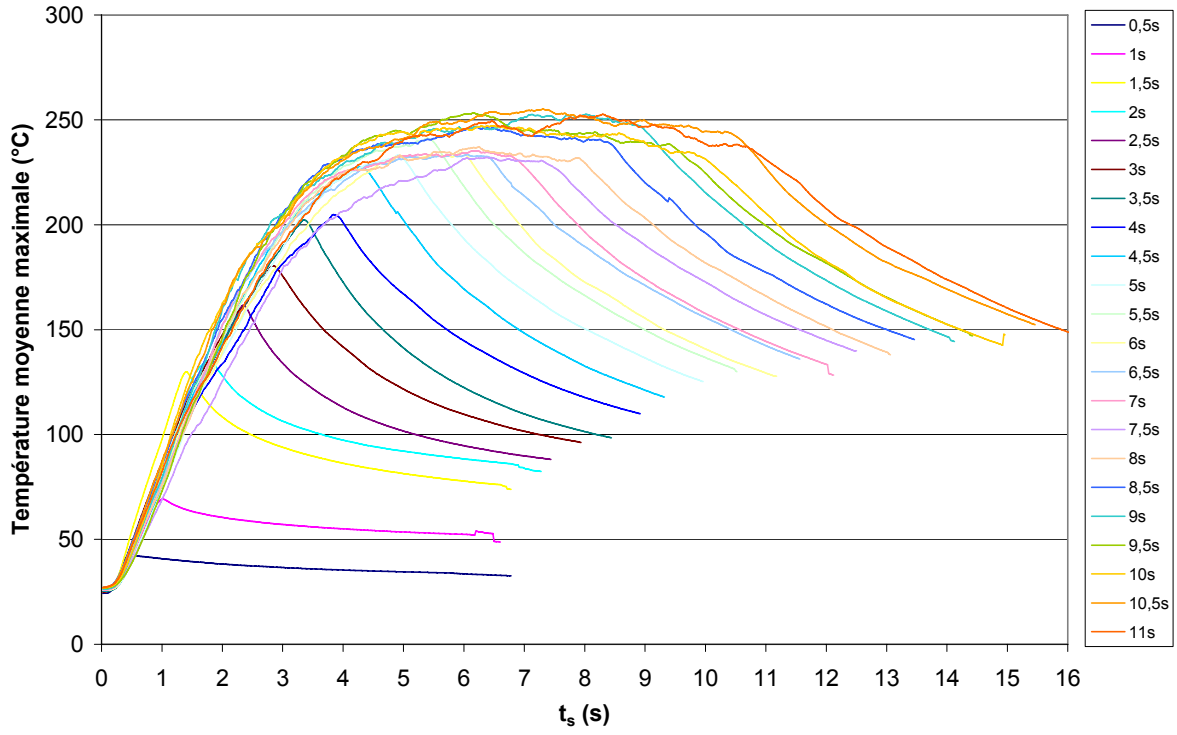


Figure 71: Evolution de la température moyenne de la ligne de soudage en fontion du temps pour t_s variant de 0,5 s à 11 s.

On a fixé l'ensemble des paramètres de soudage (a = 3 mm ; $p_s = p_m = 1.33$ N/mm^2) et on a fait varier uniquement le temps de soudage de 0,5 s à 11 s par pas de 1 s. La mesure a été effectuée trois fois pour chaque temps de soudage et on a reporté les valeurs de température moyenne de la ligne de soudage pour chaque pas sur la Figure 71. La Figure 72 représente l'évolution de la température au cours du temps lors d'un soudage avec vibration de 10,5 s. En effet cette courbe a été choisie car elle représente assez bien l'évolution de la température sur l'ensemble du processus. Pour mieux mettre en évidence les variations de pente de la courbe de température, la dérivée première de cette courbe est aussi représentée sur ce graphique.

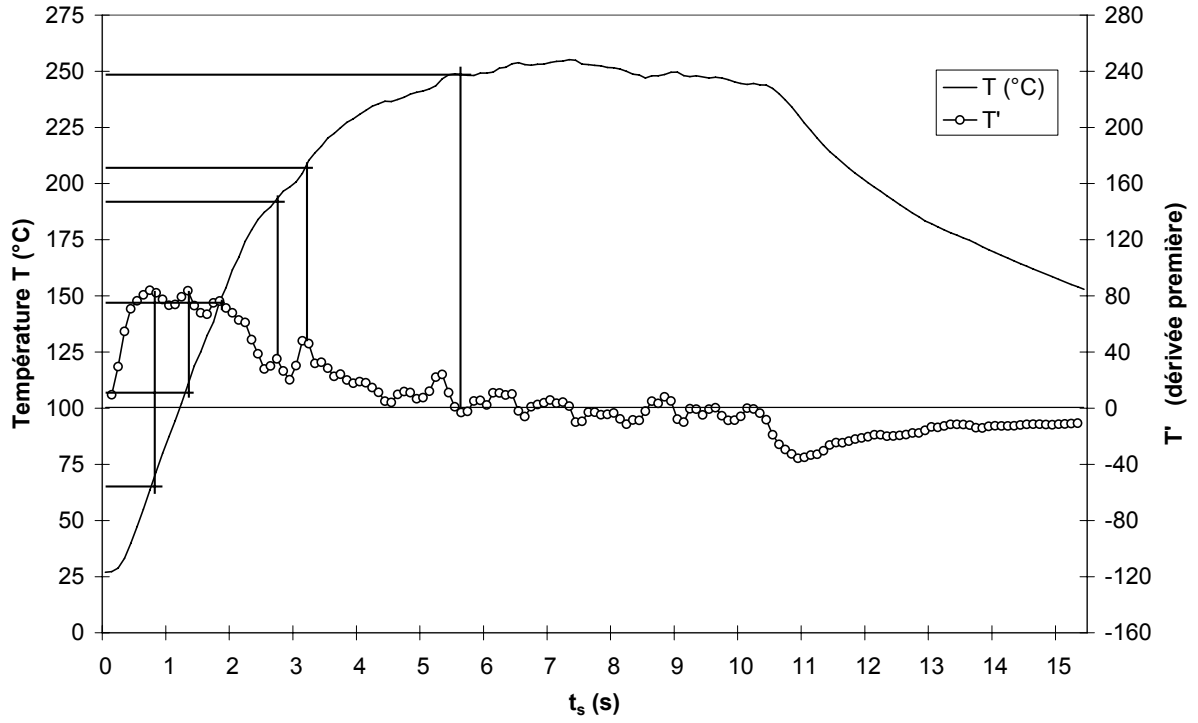


Figure 72: Profil de température au cours du soudage pour un soudage de 10,5 s.

Le changement de signe de la dérivée première indique les nombres critiques (ici le temps) qui correspondent aux extremums de la courbe. La courbe d'évolution de la température se divise en trois principales parties :

- de 0 à 5,5 s on observe une augmentation brutale de la température de surface de 25°C à 250°C environ avec des variations de pente. 5,5 s correspondent au temps du premier nombre critique de la dérivée première.
- de 5,5 à 10,5 s la température se stabilise aux alentours de 250°C et on observe de nombreux extremums et points d'inflexion.
- A partir de 10,5 s la vibration est stoppée et la température chute car il n'y a plus de friction. On n'observe alors plus d'extremum sur la dérivée première.

La première partie de la dérivée met en évidence un certain nombre de changements de concavité de la courbe d'évolution de la température. De 25°C à 60°C environ, au cours de la première seconde, l'augmentation de température est brutale. Ensuite, pour une température de 60°C environ, apparaît le premier point d'inflexion qui correspond à un pic sur la dérivée première. La deuxième inflexion se produit à une température de 110°C. On observe ainsi encore trois inflexions de la courbe de température à 150°C, 190°C et 210°C (Figure 72). Ces 5 inflexions apparaissent comme des pics sur la dérivée première. Sur la deuxième partie de la courbe, on observe une succession d'inflexions et d'extremums qui traduisent une variation de faible amplitude de la température. Ces activités thermiques

peuvent être expliquées par le comportement chimique du bois à haute température et sous certaines conditions de pression et d'humidité. Dans nos échantillons (12% d'humidité) l'eau, présente alors dans le bois, se trouve sous deux formes (Rowell 2005) :

- l'eau liée ou eau hygroscopique, qui se traduit par de liaisons des molécules d'eau par ponts hydrogène avec les groupements hydroxyles des molécules du bois.
- L'eau de constitution qui correspond aux molécules d'eau qui seront les produits des réactions que subiront les constituants du bois à des températures élevées.

Les molécules d'eau (eau liée) sont liées aux polysaccharides qui possèdent le plus faible encombrement stérique et le plus de sites hydroxyles disponibles. Il s'agit principalement des hémicelluloses et de la cellulose amorphe (Shafizadeh 1963). Dans la première partie de la courbe, lorsque la température commence à augmenter, l'énergie des molécules d'eau va avoir tendance à s'élever. Cela se traduit par un gonflement moléculaire des polysaccharides. Ces molécules à plus forte énergie sont, par conséquent, plus réactives et favorisent la protonation du milieu réactionnel. Ce phénomène d'augmentation de l'énergie des molécules d'eau se produit entre 20°C et 100°C environ. A 100°C l'eau a atteint son niveau d'énergie maximum et à tendance a s'évaporer. Dans notre cas ceci a lieu durant la première seconde. Dans ce premier espace de temps a également lieu l'évaporation des substances du bois très volatiles tels que les terpènes et autres composés aromatiques (Shafizadeh 1963).

La présence d'humidité dans le bois a pour conséquence de diminuer les températures de transition vitreuse des différents constituants et particulièrement celle de la lignine. Ainsi pour des températures assez basses, de 80°C à 100°C (Salmén 1982), il y a augmentation de l'énergie au niveau des chaînes de polymères de lignine ce qui provoque un affaiblissement des liaisons intermoléculaires (Van der Waals et ponts hydrogènes). Il y a alors diminution de l'encombrement stérique ce qui permet les rotations libres autour des liaisons simples. Ainsi la flexibilité de la molécule est plus élevée et la matière devient caoutchouteuse. Ceci correspond à des temps de vibration entre 1 s et 1,5 s.

A cet instant la température de l'eau au niveau de l'interface est suffisamment élevée pour provoquer une baisse du pH et favoriser une forte protonation du milieu. C'est alors que peuvent commencer les réactions d'hydrolyses des polysaccharides du bois. En effet celles-ci nécessitent des molécules d'eau et sont catalysées en milieu acide (Shafizadeh 1963 ; Timell 1964). Il s'agit de la séparation des chaînes de polyoses par protonation de la liaison glucosidique. Les polysaccharides qui sont hydrolysés en premier sont ceux dont les groupes hydroxyles sont les plus accessibles, c'est-à-dire les moins cristallins (hémicelluloses). Cette réaction d'hydrolyse est d'autant plus forte que la température et la pression sont élevées. En effet une rotation des substituants des cycles de sucres autour

des carbones C2 et C3, et C4 et C5 (changement de conformation) a pour conséquence de baisser le niveau d'énergie des cycles en rendant leur groupement hydroxyles plus accessibles aux protons (Shafizadeh 1963). Les produits obtenus sont des mono- et oligosaccharides. L'hydrolyse est une réaction exothermique. Ce phénomène pourrait donc expliquer l'inflexion de la courbe de température aux alentours de 110°C. L'inflexion suivante (140-150°C) pourrait correspondre à l'hydrolyse des constituants un peu moins accessibles que les hémicelluloses soit la cellulose amorphe. Actuellement on considère que les déshydrations (pertes d'eau liée) commencent à partir de 140°C (Hill 2006).

Si le milieu reste suffisamment acide les composants issus de l'hydrolyse sont stables. Mais la quantité importante d'eau chauffée à l'interface, ainsi que l'action mécanique de la vibration linéaire, favorisent fortement la mobilité des petites molécules issues des réactions d'hydrolyse. Elles ont ainsi de grandes possibilités d'être mises à proximité des protons et de réagir à nouveau. Des réactions de déshydrations et de condensationd des monomères de sucres issus de l'hydrolyse vont se produire pour reformer des liaisons entre eux ou avec d'autre types de composés. Par exemple le glucose, par condensation, formera de l'hydroxylmethylfural et le xylose du furfural (3.1.4). La présence de furfural a déjà été mise en évidence lors d'études précédentes sur le soudage (Gfeller *et al.* 2004). Des travaux sur la pyrolyse de l'holocellulose ont montré que les réactions de déshydrations accompagnées de décarboxylation débutaient pour des températures de 150°C à 160°C (Fang et McGinnis 1976). Ces réactions nécessitent une énergie d'activation mais, une fois qu'elles ont démarré, elles s'enchaînent et libèrent de l'énergie ce qui se traduit par une augmentation de température. Les deux inflexions de la courbe à 190°C et 210°C (vers 3 s) semblent traduire les départs de ces types de réactions.

La lignine peut subir aussi une hydrolyse à température élevée, vers 200°C (3 s dans notre cas) en particulier au niveau les liaisons ether (3.1.4). Cette réaction peut avoir lieu au niveau de l'interface puisqu'elle est aussi catalysée en milieu acide. Les molécules alors obtenues peuvent condenser avec les éléments en solution ou condenser entre elles en unités de diphénylméthane. Ces réactions de condensations sont présentent pour des températures allant de 120°C à 220°C (Funaoka *et al.* 1970). Au-delà elles diminuent fortement et on n'observe donc plus de formation de nouvelles liaisons chimiques entre les constituants.

Ces réactions de condensation des produits d'hydrolyse provoquent la formation de molécules d'eau qui forment alors l'eau constitutionnelle. Cette eau peut être réengagée dans des processus d'hydrolyses des polysaccharides et de la lignine qui sont nouvellement apportés, au niveau de la ligne de soudage, par la friction et la pression. Se succèdent alors

à tous les niveaux de l'interface un jeu parallèle d'hydrolyses et de condensations. L'énergie dégagée correspond à une augmentation de température qui atteint son maximum à 5,5 s.

Commence alors la deuxième partie de la courbe de température, c'est-à-dire la stabilisation de la température. À 225°C la cellulose des microfibrilles, qui n'a pas été atteinte par hydrolyses précédentes à cause de sa grande cristallinité, commence alors à se dépolymériser (Toussaint 1990). Ceci est permis par la protonation élevée du milieu ainsi que par la présence d'acides comme par exemple l'acide acétique. Ce dernier est issu de l'hydrolyse à température élevée des groupes acétyle des composants tels que les xylanes et les galactoglucomananes des hémicelluloses (3.1.4). Ceci a pour conséquence un fort ralentissement des réactions de condensation. On remarque alors une baisse de l'énergie dissipée qui se traduit par un plateau à 250°C sur la courbe entre 5,5 s et 10,5 s. Soulignons que, d'après les travaux de Fang et McGinnis (1976), 250°C correspond à la température où les réactions de déshydratation et de décarboxylation augmentent considérablement lors de la pyrolyse de l'holocellulose.

Pour des températures proches de 300°C les hydrates carbonés sont détruits et des radicaux libres carbonyles, des groupes hydroperoxydes, du monoxyde de carbone, du dioxyde de carbone et du charbon de bois se forment (3.1.4). C'est pour cette température que débute réellement la perte de masse de l'holocellulose lors de sa pyrolyse (Shafizadeh et DeGroot 1976). Dans notre cas, la forte pression qui maintien les deux pièces l'une contre l'autre permet une diminution de la quantité d'oxygène au niveau de l'interface. On se trouve donc ainsi dans des conditions proches de celles de la pyrolyse, ce qui favorise ainsi de préférence la production de charbon de bois. Celui-ci ne permet plus ni de réaction de condensation ni la création de nouvelles liaisons chimiques. La pyrolyse est une réaction exothermique, elle peut donc expliquer la légère augmentation de température qui se poursuit continuellement pour des températures moyennes de soudage supérieures à 225°C. Cependant la continuelle production d'eau au niveau de la ligne de soudage, due à la présence d'eau liée et d'eau issue des condensations, provoque d'une part un refroidissement et d'autre part une baisse du coefficient de friction (lubrification) ce qui explique la stabilisation de la température en fin de processus pour des soudages longs (après 6s).

A la fin de la vibration, à 10,5 s, l'interface subit le refroidissement final. Pendant cette phase, jusqu'à ce que la température atteigne un certain seuil, des réactions peuvent encore se produire. Il est donc important de maintenir les deux pièces sous pression un certain temps pour favoriser le contact entre les deux pièces lors du durcissement de l'interface. Une série de mesures de la température interne de l'interface par ouverture des éprouvettes (5.1.2) a permis de définir la vitesse de refroidissement de l'interface. Pour atteindre la température

de 100°C le temps de refroidissement après friction est d'environ 35 s. Cela signifie que pendant la demi-minute suivant le processus de vibration il peut encore se produire des réticulations et évaporations qui peuvent avoir une influence sur la qualité de la liaison. De nombreux phénomènes chimiques connus qui se produisent lors de la décomposition thermique du bois peuvent être retrouvés lors du soudage grâce à la mesure par infrarouge de la température.

Résistance mécanique en fonction du temps de soudage

La valeur maximale atteinte en cisaillement par la traction est de 8.5 N/mm2 pour un temps de soudage de 4,5 s (Figure 73).

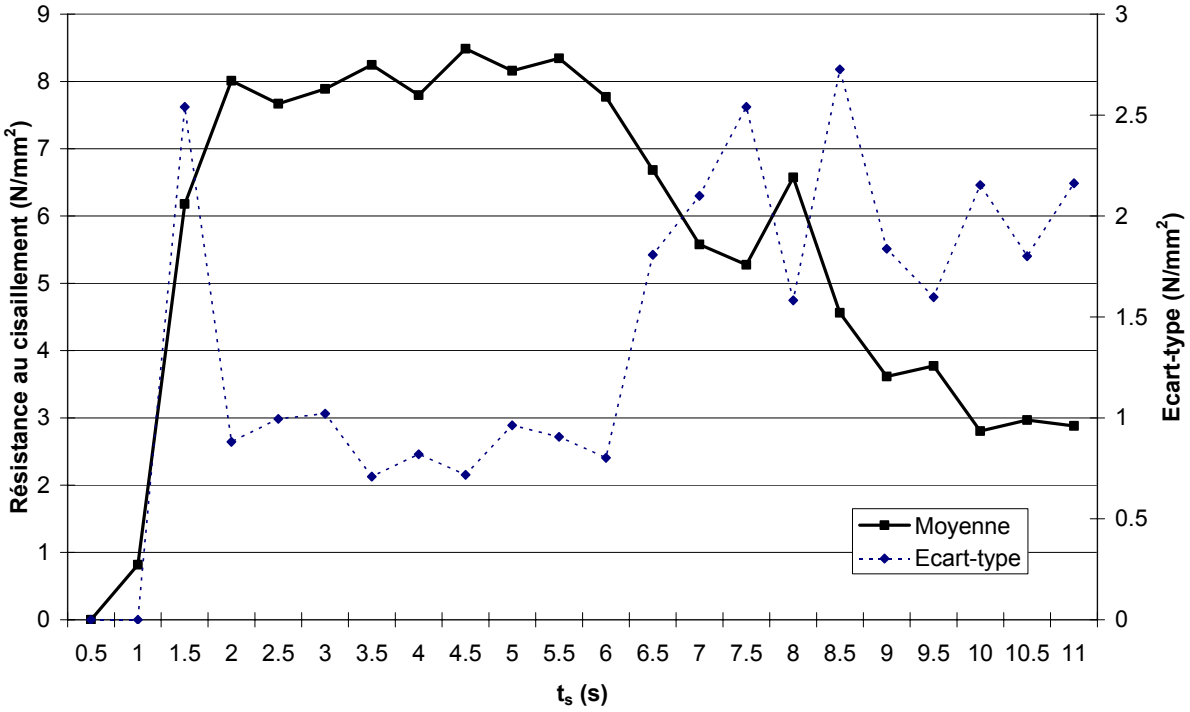


Figure 73: Résistance mécanique des joints soudés en cisaillement par la traction et écart-types.

Pour des temps de soudage entre 2 s et 6,5 s on obtient une valeur moyenne de résistance en cisaillement supérieure à 7 N/mm^2. A partir de 6,5 s une diminution progressive de la résistance mécanique en cisaillement apparaît de façon nette. La Figure 73 montre aussi que l'écart-type augmente de façon significative lorsque la résistance du joint diminue. Si l'on superpose la courbe de température sur celle des résistances mécaniques (Figure 74) il est possible d'identifier la température, et par conséquent la réaction chimique qui est responsable de l'adhésion entre les deux pièces de bois. La Figure 74 montre que la valeur la plus élevée de la résistance mécanique est située entre 2 s et 6 s de vibration.

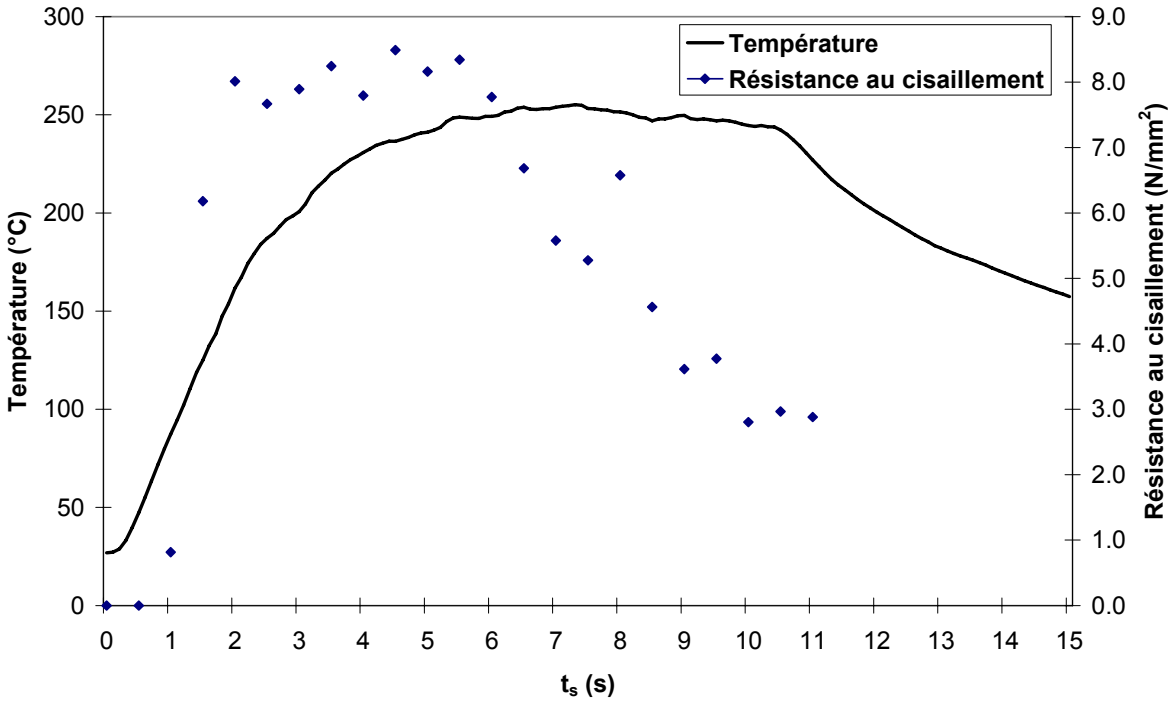


Figure 74: Température et résistance en cisaillement des échantillons en fonction du temps de soudage.

Cet espace de temps correspond à la zone où la température évolue de 150°C environ à 250°C, avant le plateau de stabilisation de la température. 150°C est la température qui correspond, d'après les hypothèses émises précédemment, à la température de départ des réactions de déshydratations et de condensations issues de l'hydrolyse des hémicelluloses. A partir de 200°C ce même type de réactions se réalise avec les composants issus de l'hydrolyse de la lignine. Ces réactions s'arrêtent aux alentours de 220°C, ce qui correspond à un temps de soudage de 4,5 s. On pourra remarquer que c'est pour ce temps de soudage que la résistance mécanique est la meilleure. A 225°C commence la dépolymérisation des fibrilles de cellulose, les parois cellulaires se trouvent donc entièrement détruites. L'apparition du charbon de bois à partir de 6 s de vibration coïncide avec la baisse de résistance mécanique des éprouvettes pour des temps de vibration supérieurs à 6 s. Cela signifie qu'une fois que cette température a été dépassée, l'enchevêtrement des fibres de bois observé par Gfeller *et al.* (2004) est fortement compromis et il n'y a à l'interface plus que la matrice de polymères fondus et re-condensés. Ceci explique la baisse de résistance mécanique après 6 s.

Modifications anatomiques en fonction du temps de soudage.

Les zones déformées anatomiquement telles qu'elles ont été définies en 5.2.2 ont aussi été mesurées en fonction du temps. Les résultats sont présentés sur la Figure 75.

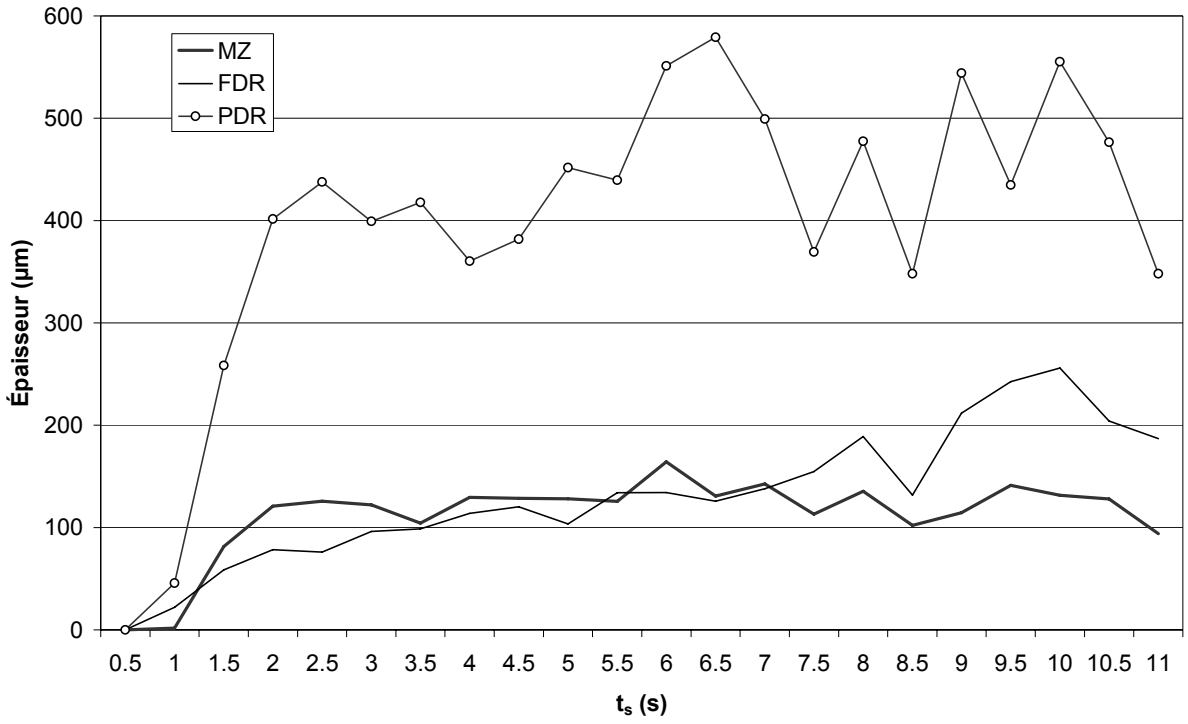


Figure 75: Epaisseurs moyennes des différentes régions anatomiques modifiées par le soudage en fonction du temps de soudage.

A partir de 2 s la zone fondue (MZ) mesure environ 110 µm et reste plus ou moins constante pendant le reste du temps de soudage. Dans la zone MZ le matériau est tellement ramolli qu'il ne résiste plus à la friction et est éjecté. La pression apporte du nouveau bois sans cesse à la zone de vibration. Celui-ci est donc renouvelé continuellement. Le phénomène nécessite au moins 2 s pour s'amorcer. Cependant après 6 s les autres zones deviennent plus larges (FDR et PDR). Cela se traduit par une influence de la température et de la pression plus accentuée. Ces deux influences rendent la zone de bois sur un peu moins de 2 mm de large beaucoup plus fragile. En effet c'est à partir de 6 s que la résistance mécanique au cisaillement commence à régresser.

Analyse microdensitométrique des échantillons en fonction du temps de soudage.

Cette analyse concerne le phénomène de densification locale du bois au niveau de la ligne de soudage ainsi que son étendue de part et d'autre de la ligne. Après radiographie de chacun des échantillons, une carte de densité a été réalisée. Celle-ci permet d'obtenir le profil densitométrique moyen de l'échantillon. Ensuite on effectue un calcul des valeurs relatives de densité (DR) ce qui correspond à la valeur de densité mesurée pour chaque point divisée par la densité moyenne de l'échantillon. Chaque ligne verticale de la cartographie (Figure 76) représente le ratio moyen de densification pour chaque éprouvette.

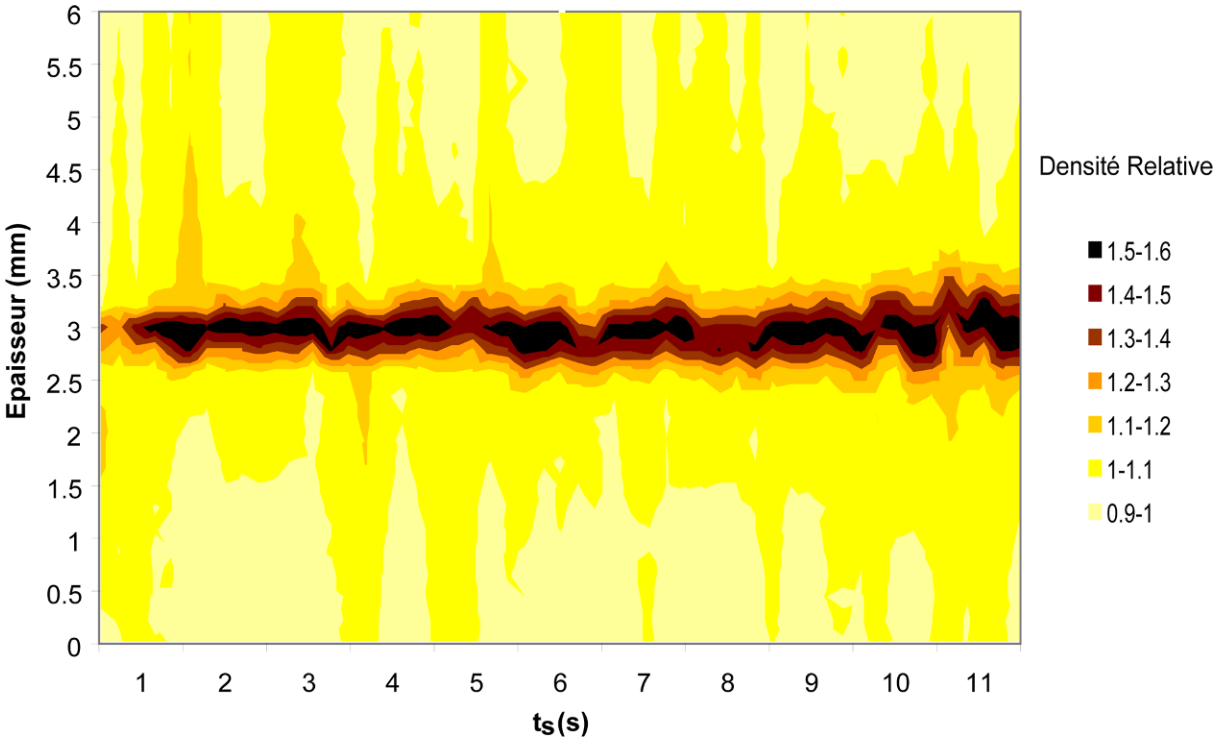


Figure 76: Cartographie globale de la densification d'échantillons de bois soudés pour des temps de soudage de 0 s à 11 s.

On a donc, en fonction du temps, la densité relative des échantillons. On peut observer que la largeur de la ligne est constante entre 2 s et 5 s.Au-delà elle augmente légèrement en fonction du temps. Cette augmentation correspond aux observations effectuées au microscope à lumière réfléchie. Les zones atteintes par la densification sont légèrement plus profonde après 6 s. Ceci est dû au ramollissement du bois. Celui-ci devient alors plastique et donc plus facilement compressible et densifiable.

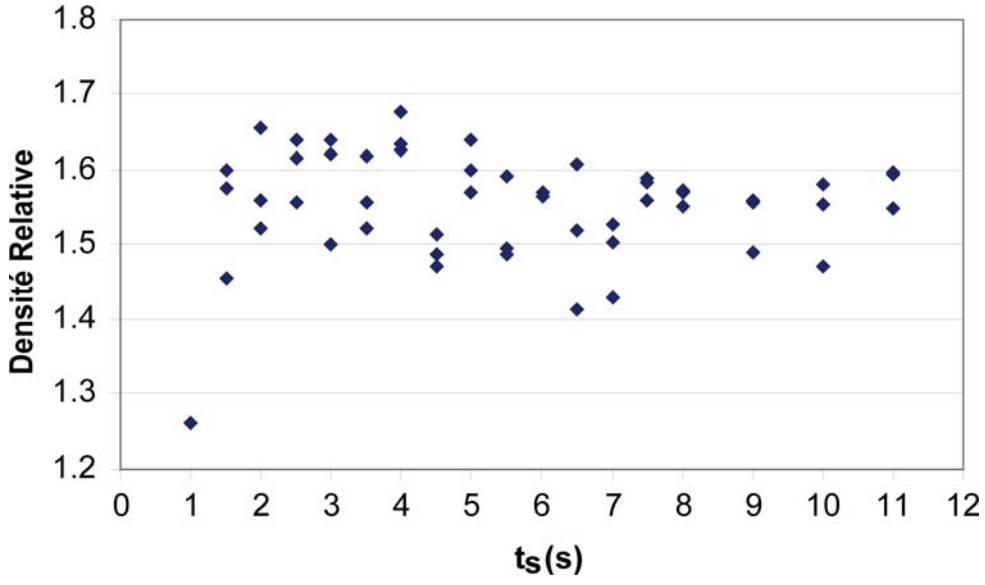


Figure 77: Densité maximale relative des échantillons de bois soudés pour des temps de soudage de 0 s à 11 s.

La Figure 77 représente les valeurs maximales de densité relative des éprouvettes en fonction du temps. La valeur maximale est toujours située au niveau de la ligne de soudage. A partir de 1,5 s on observe que la densité relative a atteint la valeur moyenne de 1,55. Elle oscille ensuite entre 1,45 et 1,70. On observe à partir de 5 s une baisse légère et progressive des valeurs du ratio. Comme il s'agit d'un rapport d'une valeur maximale sur la valeur moyenne de l'éprouvette, plus la densité moyenne de l'éprouvette augmente et plus la valeur du ratio diminue. En effet, la surface densifiée augmente à partir de 5 s environ sur la cartographie (Figure 76). Cela signifie que dès 1,5 s la ligne de soudage a atteint une densité maximale qui ne varie plus en fonction du temps. Cette densité correspond à la densité du matériau fondu lors du soudage et durcit lors du refroidissement. Ce matériau se situe à l'interface des deux pièces comme l'ont montré les analyses microscopiques (5.2.2).

Il apparaît nettement qu'une certaine quantité d'énergie doit être apportée à la ligne de soudage pour obtenir une résistance mécanique suffisante. De même, il existe une quantité maximale d'énergie à ne pas dépasser sous peine de perdre en résistance mécanique. Cette étude révèle que la densification et que les caractéristiques anatomiques du bois sont stables dans cette fenêtre d'énergie. La Figure 78 présente de façon schématique l'ensemble des phénomènes physiques qui sont en cause durant le soudage. Une analyse plus détaillée par microscopie électronique à balayage des déformations anatomiques pour de longs temps de soudage pourrait confirmer l'hypothèse que la structure spécifique de fibres enchevêtrées disparaît. La comparaison avec les résultats d'analyse obtenus par les chercheurs sur les bois ayant subit un traitement thermique classique reste compliquée. En effet les conditions du soudage sont particulièrement extrêmes (un procédé ne durant quelques secondes sous pression et subsissant l'action de forces de friction), et bien différentes des conditions d'analyses thermiques qui ont été réalisées jusqu'à maintenant. Des analyses chimiques à différentes phases et différents endroits de la ligne de soudage doivent être réalisées pour confirmer ces hypothèses.

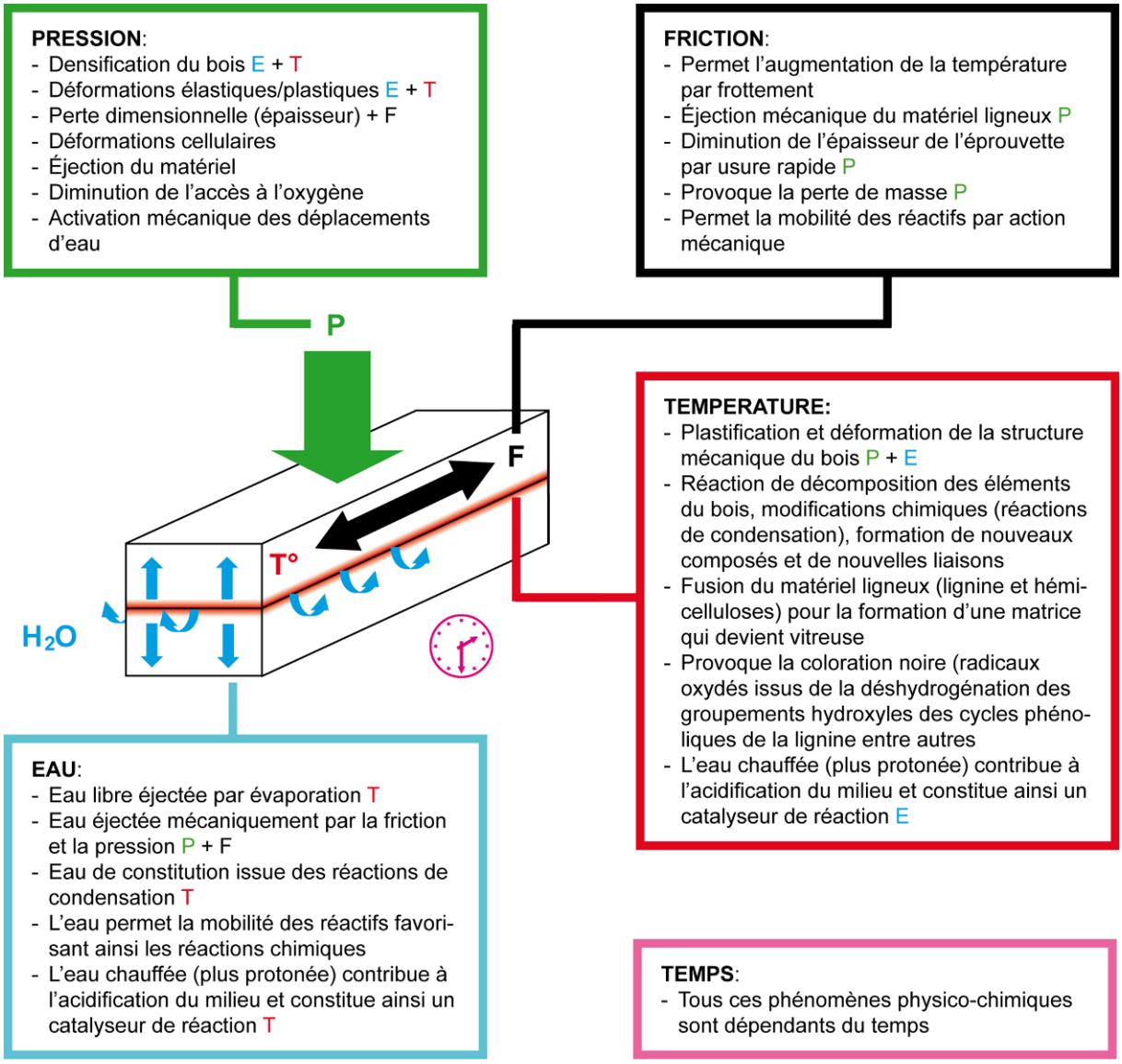


Figure 78: Bilan des différents facteurs physiques et chimiques agissants lors du soudage du bois.

5.3.2.Evolution des caractéristiques chimiques en fonction du temps de soudage

Comme nous l'avons vu dans le paragraphe précédent (5.3.1), dans le cas du soudage de *Fagus sylvatica*, il existe un plateau de 4 s à 6 s dans lequel les carctéristiques mécaniques et la température de soudage sont stables. Ensuite la quantité d'énergie apportée à la ligne de soudage commence à diminuer. Cette baisse d'énergie semble due à un ensemble d'action de phénomènes endothermiques et mécaniques telle que la baisse du coefficient de friction due au ramollissement du matériau. La phase de 4 s à 6 s semble donc être l'instant où les processus chimiques et physiques nécessaires à un bon soudage se déroulent.

La quantité de vapeur s'échappant de la ligne de soudage est considérable étant donnée l'humidité d'équilibre du bois (12%). Tel que nous l'avons dit précédemment cette eau se

trouve sous forme libre et sous forme liée à de nombreux groupements chimiques. Suite à la disparition de l'eau, de nombreux nouveaux groupements sont capables de se former (alcools, ethers et carbonyles). L'eau doit donc induire une serie d'effets physico-chimiques nécessaires aux réactions et réarrangements chimiques tels que :

- un effet mécanique par la pression de vapeur et le ramollissement du matériau ligneux.
- un effet de diffusion des petites molécules (extractibles et produits de dégradation) transportées par la vapeur telles que la vanilline et l'eugénol (5.2.6)
- un effet themodynamique : l'enthalpie élevée de vaporisation de l'eau couplée à l'énergie nécessaire à la rupture des nombreuses liaisons hydrogène du bois nécessite une énergie de départ d'environ 50 kJ/mol. Ceci nous permet d'expliquer pourquoi la température de la zone de soudage ne dépasse pas 250°C en moyenne.
- Un effet chimique : de loin l'effet qui semble être le plus complexe notamment par rapport à la quantité de groupements chimiques qui peuvent participer à l'hydrolyse.

La diversité des réactions se produisant dans la période de 4 s à 6 s conduit automatiquement à une perte de la sensibilité des spectroscopies quelque soit la technique utilisée. La seule façon d'éviter ce problème est d'utiliser la spectroscopie comme méthode de comparaison. C'est pour cette raison que des échantillons prélevés à 2 s, 4,5 s, 6 s et 11 s on été observés de façon comparative avec CP-MAS ^{13}C RMN et la FT-IR. C'est principalement dans la zone de 4 s à 6 s que les changements dans les spectres FT-IR et RMN des constituants du bois se produisent.

5.3.2.1.Résultats de la spectroscopie FT-IR

Vibrations des groupments hydroxyles

Sur la Figure 79 la bande large à 3400 cm^{-1} des groupements ─ OH glisse vers une longueur d'onde plus basse à 3350 cm^{-1}. Ce déplacement est rapide dans la période 0-2 s et ralentit ensuite, s'arrêtant entre 6 s et 11 s. Pour analyser précisément les déplacements de la bande des ─ OH, les intensités des bandes à 3200 cm^{-1} et à 3600 cm^{-1} ont été observées (Tableau 16). Les liaisons ─ OH intramoléculaires se situent dans le domaine 3400-3600 cm^{-1} tandis que les liaisons ─ OH intermoléculaires se situent dans le domaine 3200-3400 cm^{-1} (Hofstetter *et al.* 2006, Focher *et al.* 2001, Olsson et Salmén 2004). Dans le Tableau 16, la bande à 3600 cm^{-1} diminue de façon régulière dans le domaine 0-6 s puis reste stable pour des temps de soudage plus longs. La bande à 3200 cm^{-1} augmente nettement entre 0 s et 4,5 s et ensuite reste constante (Tableau 16).

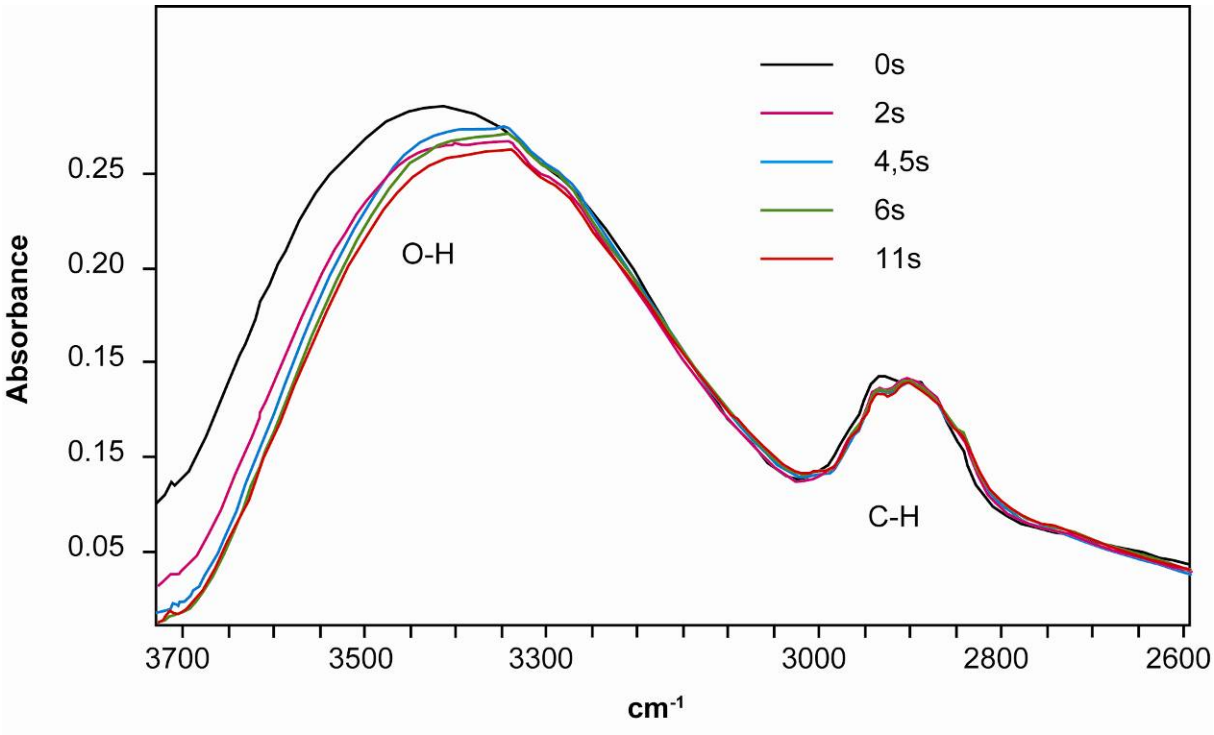


Figure 79: Variations des bandes FT-IR de l'interface soudée dans le domaine 2600-3700 cm^{-1} en fonction du temps de soudage (0s, 2s, 4.5s, 6s et 11s).

Tableau 16: Variations des bandes IR et RMN et leur proportions en fonction du temps de soudage.

t_s (s)	3600 cm^{-1} (%)	3200 cm^{-1} (%)	1740 cm^{-1} (%)	1740 cm^{-1} /1505 cm^{-1} (%)	175 ppm/cycles aromatiques	153 ppm /148 ppm
0	32	40	41	5,3	24	1,85
2	28	46	38	3,85	12,5	1,3
4,5	25	52	36	3,65	9	1,2
6	22	52	32	3,2	6	0,8
11	23	52	32	3,0	7	0,75

Il est connu que le déplacement vers des longueurs d'onde plus basses (effet bathochromique) est dû à une augmentation de l'énergie des liaisons hydrogènes des molécules d'eau (Brunner *et al.* 1992). La perte d'eau lors du soudage est mise en évidence par les bandes à 2100 cm^{-1} et 1640 cm^{-1}. Des travaux sur la pyrolyse du bois ont permis de corréler la baisse de l'intensité de ces bandes avec les réactions de déshydratation du matériau (Olsson et Salmén 2004, Yildiz et Gümüşkaya 2007). Une bande de faible intensité à 3350 cm^{-1} indiquée sur la Figure 79 correspond aux liaisons OH-phenol de la lignine (Papp *et al.* 2004).

Les noyaux aromatiques de ces groupes phénoliques sont aussi observables par la présence de bandes à 1370-1375 cm^{-1} dans le domaine 0-2 s. La Figure 80 montre les différentes variations des pics IR dans le domaine de soudage 0-2 s, qui correspond au domaine où les variations sont les plus fréquentes. En général les variations sont nettes dans le domaine 0-2 s, modérées à faibles dans le domaine 2-6 s et inexistantes dans le domaine 6-11 s. Les bandes à 1424 cm^{-1} et à 1466 cm^{-1} restent invariantes durant toute la période globale. Ces bandes correspondent aux groupements CH_2 des celluloses amorphes et cristallines et aux groupements aliphatiques CH de la lignine (Colom *et al.* 2003, Hakkou *et al.* 2005).

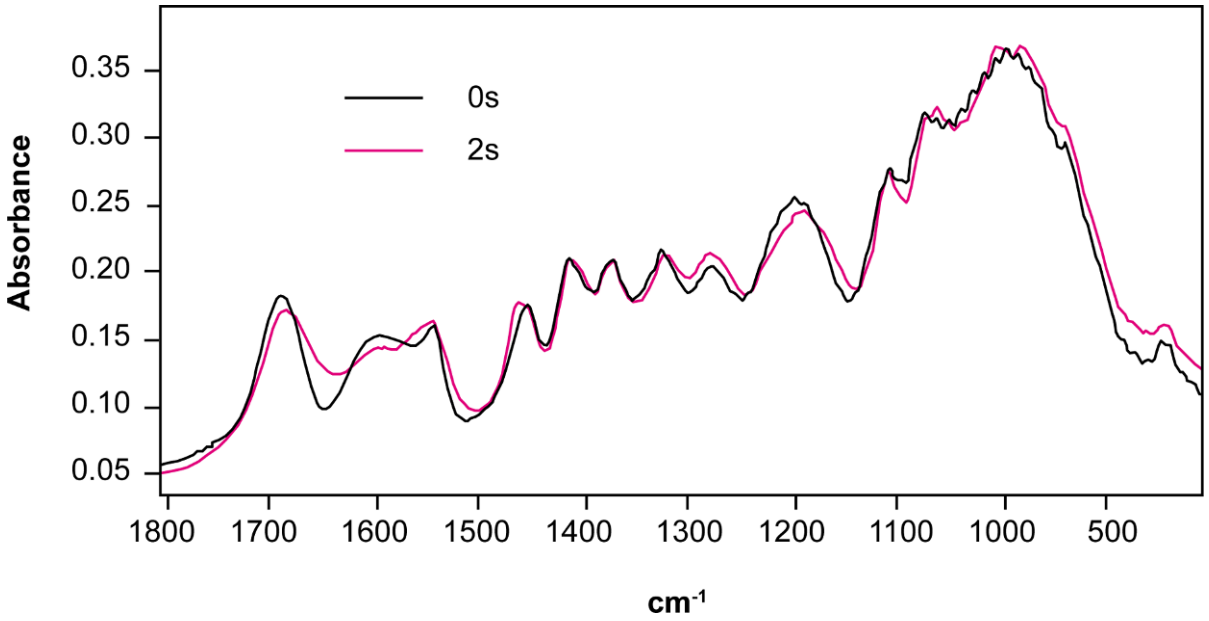


Figure 80: Variations des bandes FT-IR de l'interface soudée dans le domaine 2600-850 cm^{-1} en fonction du temps de soudage (0 s et 2 s).

Vibrations des C = O

Le domaine 1800-1450 cm^{-1} est particulièrement important dans l'étude des procédés appliqués au bois. Afin de mieux quantifier les variations de la largeur de la bande, on a effectué une déconvolution sur les bandes supperposées (Figure 81). La bande 1740 cm^{-1} correspond aux liaisons C = O des groupements acétyles et d'autres groupements carbonyles des acides carboxyliques présents dans les hémicelluloses. Le Tableau 16 montre la variation de la surface de ce signal en fonction du temps de soudage. La surface diminue pour des temps de soudage jusqu'à 6 s, puis se stabilise entre 6 s et 11 s. Les hémicelluloses sont les constituants du bois qui se dégradent en premier lors de tout type de traitement thermique du bois.

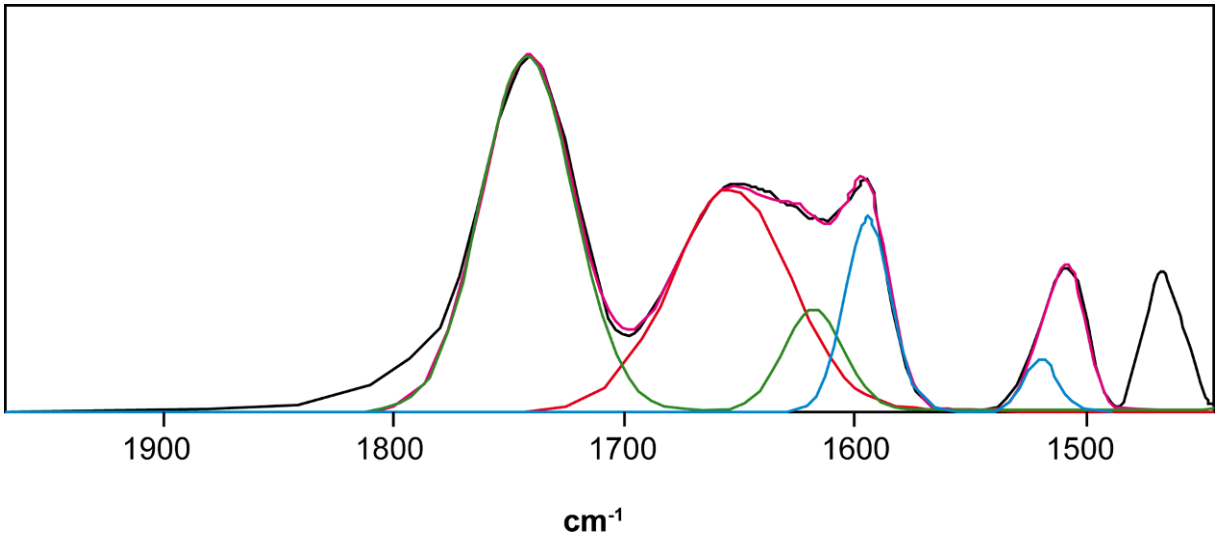


Figure 81: Déconvolution des bandes du spectre FT-IR dans le domaine 1450-1800 cm^{-1}.

La bande à 1740 cm^{-1} est donc un bon indicateur de l'état des hemicelluloses du bois. Au fur et à mesure que le soudage progresse, les groupements carboxyliques sont de plus en plus impliqués dans les liaisons hydrogène. A partir de 4,5 s il se produit un élargissement progressif couplé à un déplacement de la bande 1740 cm^{-1} vers une longueur d'onde plus basse (Figure 80). Pour déterminer la proportion relative des polysaccharides par rapport à la lignine on peut utiliser le rapport de la bande 1740 cm^{-1} sur la bande 1505 cm^{-1} (due à l'extension des C ═ C dans le noyau aromatique de la lignine) (Pandey et Pitman 2003). Ce rapport dimimue jusqu'à 6 s puis se stabilise (Tableau 16) mettant en évidence les importants phénomènes de ramollissement, dégradation, réaction et réarrangement des hémicelluloses déjà observés par Gfeller *et al.* (2003).

Vibrations des C ═ C

La partie aromatique de la lignine se caractérise par les bandes à 1595 cm^{-1}, 1505 cm^{-1}, 1426 cm^{-1}, 1315 cm^{-1} et 1244 cm^{-1}, alors que la partie aliphatique de la lignine se caractériste par la bande à 1466 cm^{-1}. Bien que la bande à 1466 cm^{-1} reste constante, les bandes à 1595 cm^{-1}, 1505 cm^{-1}, et 1244 cm^{-1} augmentent de façon significative entre 0 s et 2 s (Figure 80). La forme et le déplacement des bandes à 1595 cm^{-1} et 1505 cm^{-1} changent aussi. Certains auteurs ont montré que lors de la pyrolyse du bois la bande à 1466 cm^{-1} diminue nettement contrairement aux bandes à 1595 cm^{-1} et 1505 cm^{-1} qui augmentent (Erçin et Yürüm 2003) et que la condensation thermique de la lignine par substitution électrophile de son noyau aromatique est rendue visible par la diminution de la bande des C ─ H aromatiques à 1465 cm^{-1}. Cette interprétation a été appuyée par l'apparition d'un pic RMN à 128 ppm (Yildiz et Gümüşkaya 2007). Dans notre cas un pic de RMN à 128 ppm est apparu mais aucun changement de la bande IR 1466 cm^{-1} n'a été observé.

Vibrations des C ─ O ─ C

L'extension des liaisons C ─ O ─ C des cycles pyranoses de la cellulose absorbe à 1163 cm^{-1} pour sa forme cristalline et à 1156 cm^{-1} pour sa forme amorphe (Colom *et al.* 2003). La Figure 80 montre une diminution significative de la bande à 1152 cm^{-1} vis-à-vis de la bande à 1163. Après 2 s de friction l'effet dimimue et après 4,5 s la bande ne se modifie plus. L'IR met en évidence de nouvelles liaisons avec la bande d'extension asymétrique à 1247 cm^{-1} des liaisons C ─ O ─ C (Figure 80) non-spécifiques de la lignine (Erçin et Yürüm 2003).

5.3.2.2.Résultats de la spectroscopie CP-MAS ^{13}C RMN

L'attribution des bandes lors de la spectroscopie à haute résolution CP-MAS ^{13}C RMN pour le bois est une méthode fréquemment relatée dans la littérature (Maunu 2002, Atalla et VanderHart 1999, Holtman *et al.* 2006).

Hémicelluloses

La Figure 82 présente des spectres RMN supperposés de la ligne de soudage à 0 s, 2 s, 6 s et 11 s de temps de vibration. Pour un temps de contact de 1 ms les spectres sont suffisamment fiables pour comparer quantitativement les différentes espèces chimiques présentes. On peut remarquer la forte baisse de l'épaulement à 102 ppm (sur le pic à 105 ppm) de 0 s à 2 s. Cette dimimution s'arrête à partir de 2 s. Les groupements methyl des fonctions acétyles des hémicelluloses visibles à 21 ppm diminuent légèrement jusqu'à 2 s puis se stabilisent. Cette conclusion est confirmée par le déphasage dipolaire (DD) du spectre des protons visible sur la Figure 83. La technique CP-MAS-DD agit comme un filtre : les espèces non protonées commes les carboxylates sont amplifiées de façon sélective. Le bon rapport du signal à 174 ppm vis-à-vis des bruits de fond permet une meilleure comparaison des bandes entre elles. Ainsi on peut observer que cette bande non seulement disparaît à partir de 11 s mais aussi qu'elle est constante à partir de 2 s, ce qui confirme la forte dégradation des hémicelluloses pendant le soudage. Ainsi l'eau et les substances acides ne dégradent les hémicelluloses de bas poids moléculaire que pendant les 2 premières secondes.

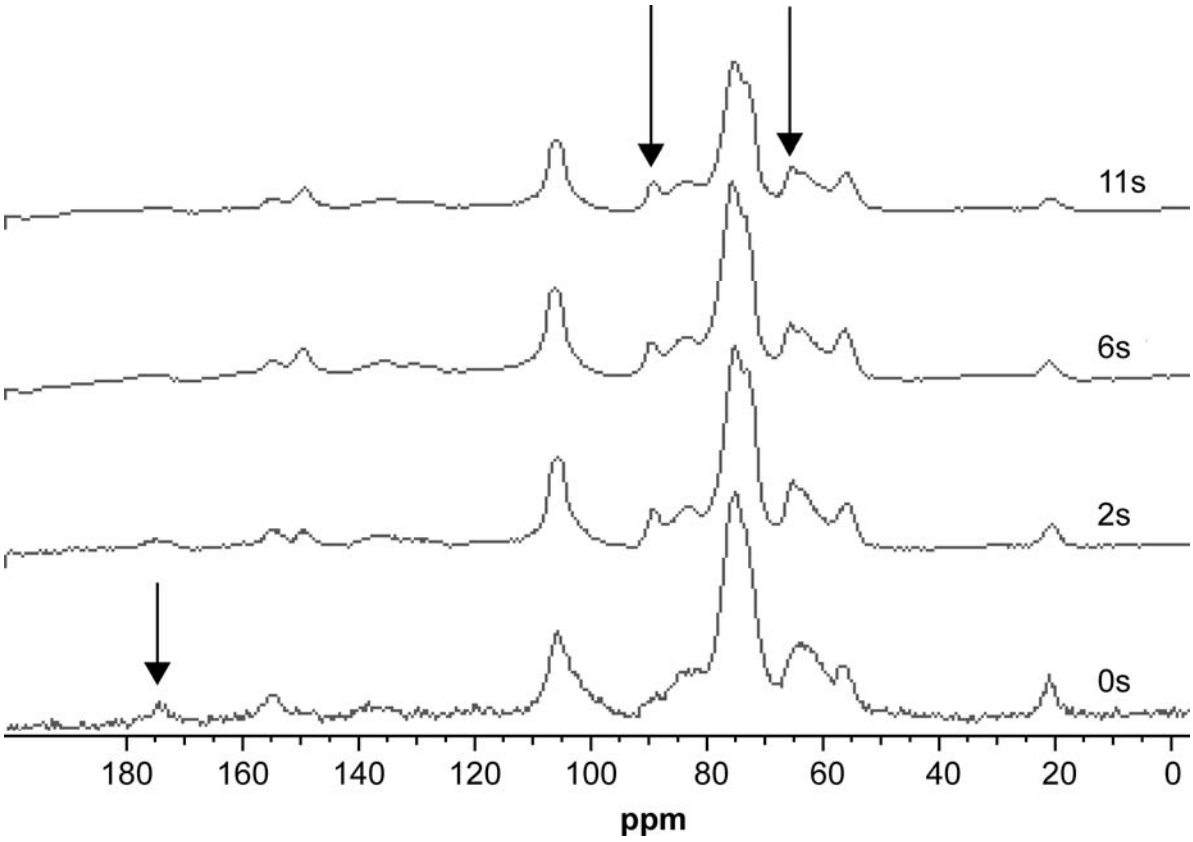


Figure 82: Spectres CP-MAS ^{13}C RMN de l'interface soudée en fonction de t_s (0 s, 2 s, 6 s et 11 s).

Cellulose

L'augmentation et l'amincissement de la bande à 89 ppm des C4 de la cellulose cristalline dans le domaine 0-2 s est aussi observable pour d'autres types de traitement thermique du bois (Yildiz et Gümüşkaya 2007, Hakkou *et al.* 2005). Selon ces études un tel effet n'est observable seulement lorsque la température atteinte est supérieure à 200°C et maintenue au moins pendant 6 h. Nous avons vu dans le chapitre paragraphe 5.3.1 que la température atteint 150-160°C en 2 s dans le cas du soudage par friction linéaire de *Fagus sylvatica*. L'explication possible est soit un réarrangement de la chaîne de polymères en cellulose cristalline grâce à l'élimination de l'eau, soit la disparition des signaux des hémicelluloses masquant ceux de la cellulose du matériau de départ. La résolution de la bande à 89 ppm s'améliore avec le temps de soudage, mettant en évidence une diminution de la dispersion de conformation des chaînes de cellulose. Ceci se confirme aussi par l'amélioration de la résolution observée pour la bande des C6 de la cellulose cristalline à 65 ppm.

Lignine

L'intégration de la bande des groupes méthoxy (– OCH_3) de la lignine à 56 ppm montre une augmentation dans le domaine 0-2 s puis plus aucun changement après 2 s. En deux

secondes la température de transition vitreuse de la lignine est atteinte ce qui explique probablement pourquoi cette réaction s'arrêtre après 2 s. La Figure 82 nous permet donc d'affirmer qu'après 2 s de friction soit les spectres changent complètement soit ils restent entièrement stables.

En couplant la CP-MAS ^{13}C RMN avec le déphasage dipolaire des protons (DD) on peut détecter de façon sélective les carbones quaternaires (cycles aromatiques et carbonyles) ainsi que les groupements ─ CH_3. Cette technique est utilisée en particulier pour l'étude du noyau aromatique de la lignine. La Figure 83 montre une supperposition des spectres CP-MAS-DD ^{13}C RMN pour les temps de friction 0 s, 2 s, 6 s et 11 s. Le Tableau 16 montre la variation de la bande des carbonyles des hémicelluloses à 173 ppm. En maintenant la surface intégrée des différentes espèces de lignines constante, une baisse progressive de la bande à 173 ppm se produit entre 0 s et 6 s, puis se stabilise après 6 s.

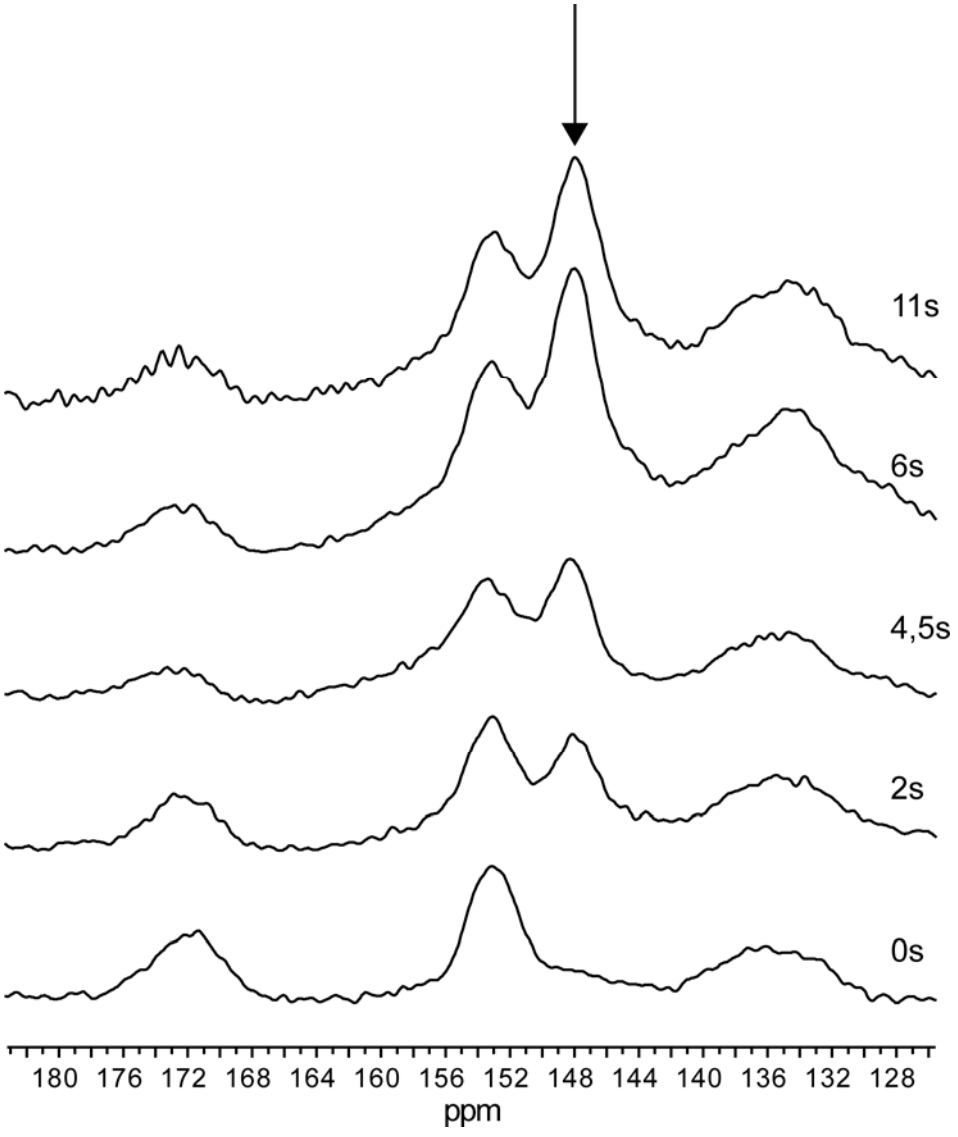


Figure 83: Détail de la fenêtre 128-180 ppm du spectre CP-MAS ^{13}C RMN de l'interface soudée en fonction de t_s (0 s, 2 s, 6 s et 11 s).

Le Tableau 16 montre la variation de la bande à 153 ppm par rapport à la bande à 148 ppm. Ceci correspond à la variation relative due aux réarrangements des liaisons éther des groupes méthoxy des noyaux aromatiques de la lignine avec les groupes hydroxyles phénoliques des C3 et C5 de la lignine (Maunu 2002, Wikberg 2004).

L'intensité de la bande à 148 ppm est due en réalité aussi à un deuxième phénomène. La réaction bien connue de production de furfural à partir des hémicelluloses sous conditions acides (déjà décrite dans le paragraphe 5.3.1) contribue à augmenter fortement l'intensité de la bande à 148 ppm. Les conditions acides sont dues à la libération d'acide acétique issu des groupes acétyles des hémicelluloses. La contribution du furfural à l'augmentation de la bande à 148 ppm est confirmée par l'apparence progressive d'un épaulement à 152 ppm (sur la bande à 153 ppm). Cet épaulement augmente entre 2 s et 6 s puis se stabilise. Le Tableau 16 et la Figure 84 montrent les variations dues à l'hydrolyse des fonctions ether de la lignine. Cette réaction s'arrête au bout de 6 s de soudage. La Figure 84 confirme que l'hydrolyse se produit uniquement sur les C3 et C5 de la lignine et non pas sur les C1 et C4 du cycle aromatique. La symetrie de la bande à 135 ppm permet de confirmer cette hypothèse.

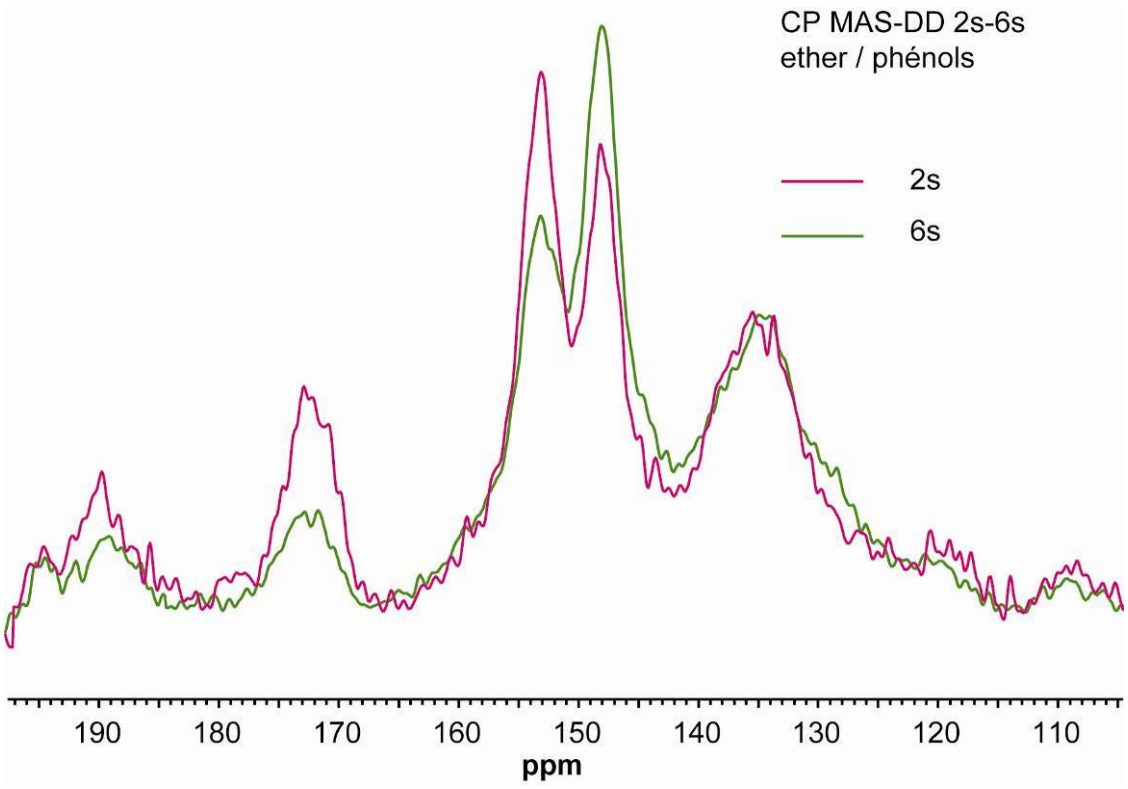


Figure 84: Détails des différences se produisant entre 2 s et 6 s de soudage dans le domaine 105-195 ppm des spectres CP-MAS-DD ^{13}C RMN de l'interface soudée.

Les groupements phénoliques de la lignine peuvent s'oxyder facilement et progressivement formant des groupements quinones et provocant une coloration intense (noire). La présence

de quinone est confirmée par le pic à 185 ppm de la Figure 84 et de la Figure 85. De même, le furfural et/ou methylfurfural, obtenu à partir des hemicelluloses, polymérise en une résine noire en présence d'air (Mealares *et al.* 1996). La condensation de la partie phénolique provoque une réticulation du noyau aromatique de la lignine comme le montre l'apparition d'un net épaulement sur la bande à 128 ppm (Figure 85). D'après la littérature les réactions de réticulation sont difficiles à observer pour les feuillus mais facile à observer pour les résineux (Wikberg 2004).

Sur la Figure 85 les spectres à 0 s et 11 s sont comparés. L'épaulement à 128 ppm commence à apparaître à 2 s puis augmente et continue son augmentation tout au long du procédé de soudage. La réaction de réticulation est la même que celle impliquée dans la perte d'élasticité des bois traités thermiquement (Tjeerdsma *et al.* 1998, Nuopponen *et al.* 2004, Weiland et Guyonnet 2003).

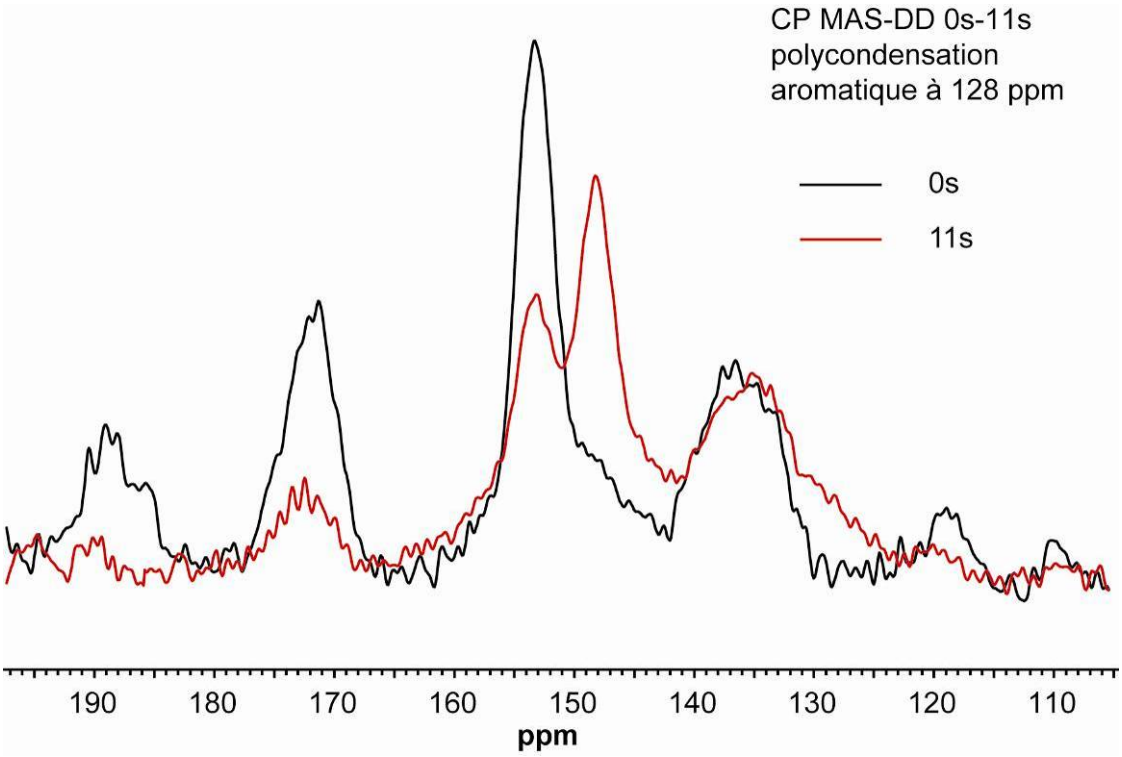


Figure 85: Détail des différences se produisant entre 0 s et 11 s de soudage dans le domaine 105-195 ppm du spectre CP-MAS-DD ^{13}C RMN de l'interface soudée.

5.3.2.3.Discussion

La bande d'absorption de la vibration de l'eau libre apparaît à 3600 cm^{-1}. Les résultats des variations des surfaces des bandes du Tableau 16 et la Figure 79 montrent qu'approximativement 10% d'eau est perdue durant le soudage. Les bandes entre 3400 cm^{-1} et 3600 cm^{-1} des groupements — OH résiduels correspondent aux liaisons hydroxyl intramoléculaires. Ces espèces chimiques s'échangent facilement avec l'eau extérieure à

cause de leur accessibilité élevée (Hofstetter *et al.* 2006, Focher *et al.* 2001). Le Tableau 16 montre une augmentation d'eau liée aux liaisons hydroxyles intramoléculaires de la cellulose. Ceci est mis en évidence par les pics à 3200-3400 cm^{-1}. Ce changement dans la distribution d'énergie des liaisons hydrogène pourrait être à l'origine de nouvelles forces d'adhésion du soudage du bois.

Les mécanismes de déshydratation débutent dans les 2 s de friction de départ, avant que la température atteigne la valeur de la température de transition vitreuse de la lignine (et de celle des hemicelluloses) et que l'interface devienne hydrophobe. De même, on observe dans les spectres RMN une augmentation de l'intensité des bandes à 89 ppm et 65 ppm (Figure 82) ainsi qu'un petit déplacement bathochromique de la bande IR à 1385 cm^{-1}. Ceci indique une augmentation du niveau de cristallinité de la cellulose. Cela a déjà été décrit pour des traitements à des températures similaires mais pour des temps d'exposition de plusieurs heures (Haukkou *et al.* 2005). Cette augmentation peut provenir soit d'une modification de conformation de la cellulose cristalline (Hakkou *et al.* 2005), soit d'une augmentation dans le domaine critallin de la cellulose résultant de la perte de l'eau du domaine amorphe de la cellulose (Fengel, 2003). Dans les deux cas l'élimination de l'eau joue un très grand rôle.

Les deux analyses (FT-IR et CP-MAS ^{13}C RMN) montrent clairement que l'essentiel des modifications chimiques intervenant lors du soudage du bois se produisent dans les 5 premières secondes de friction. La décarboxylation est le réarrangement chimique le plus facile à observer en RMN et en FT-IR. La même diminution est observée jusqu'à 5 s que ce soit la déconvolution de la bande IR à 1740 cm^{-1} (Figure 81, Tableau 16) ou l'intégration de la bande RMN à 174 ppm des groupements carboxyles (Figure 84 et Figure 85). Après 5 s de friction cette diminution stoppe. Malgré cela, une forte proportion de groupements carboxyles (78%) est toujours présente à l'interface. La lignine fondue pourrait inhiber cette réaction due à ses propriétés hydrophobes. Cela pourrait donc ainsi réduire l'accès des molécules d'eau aux fibres de cellulose. L'eau favorise la décarboxylation sous conditions acides. La dégradation des hémicelluloses est difficile à montrer en IR sinon en observant la diminution des groupements carboxyles. Ceci se confirme par la diminution de l'épaulement à 102 ppm en RMN correspondant aux C1 des hémicelluloses.

La dégradation de la cellulose amorphe est plus difficile à démontrer que celle des hémicelluloses. En spectroscopie IR on observe généralement les rapports des bandes des celluloses cristallines et amorphes tels que : 1163/1156 cm^{-1}, 1430/1426 cm^{-1}, 1316/1335 cm^{-1} et 1372/2900 cm^{-1}. Tous ces rapports montrent de légers changements entre 0 s et 2 s et sont ensuite constants. Comme pour l'IR, les spectres RMN ne montrent que de faibles changements des bandes 62 ppm et 84 ppm dans le domaine 0-2 s. Ces bandes

correspondent aux C2 et C4 de la cellulose amorphe (Figure 82). Ceci confirme que la dégradation de la cellulose est faible. Les spectres à 2 s et 11 s sont parfaitement supperposés dans cette région du spectre. L'effet protecteur de la lignine pourrait expliquer cette faible dégradation de la cellulose amorphe.

Les deux types d'analyses montrent aussi nettement une augmentation de la proportion de lignine dans l'interface soudée. Ceci est logique car la température atteinte est supérieure à 250°C et la température de transition vitreuse de la lignine dans des conditions sèches est de 180-200°C. Malgré cela on observe un léger changement des bandes à 1595 cm^{-1} et à 1505 cm^{-1} en IR. Cependant en CP-MAS-DD ^{13}C RMN on peut assez bien observer les modifications chimiques impliquant les cycles aromatiques de la lignine (Tableau 16 et Figure 84) (Fengel et Wegener 2003) ainsi que l'apparition des dérivés du furfural issus de la dégradation des hémicelluloses. Ainsi la démethylation vers les groupements hydroxyles phénoliques sur les sites C3 et C5 du noyau aromatique de la lignine peut-être bien suivie. On a montré que cette réaction s'arrêtait après 6 s de friction. Il est aussi intéressant de noter que les sites C1 et C4 ne semblent pas affectés. L'apparition et l'augmentation des bandes IR à 3350 cm^{-1} (Figure 79) et 1370 cm^{-1} (Figure 80) montrent que les groupements hydroxyles phénoliques apparaissent au fur et à mesure de la progression du procédé de soudage.

Les polycondensations des noyaux aromatiques de la lignine avec la formation de ponts Ar ─ Ar et Ar ─ CH_2 ─ Ar telles qu'elles sont connues pour le bois (Fengel et Wegener 2003) sont bien visibles sur la Figure 85. Ces réactions induites par le traitement thermique du bois ainsi que le réarrangement de la lignine provoquent des réticulations dans le réseau de la lignine. De même, la formation des ponts C ─ O ─ C, qui correspond à l'amorce de la carbonisation du bois et qui nécessite une énergie d'activation élevée (Erçin et Yürüm 2003), pourrait expliquer l'augmentation de la résistance mécanique de l'interface soudée. Les réactions de réticulation s'arrêtent au bout de 6 s de friction contrairement aux réticulations par les ponts Ar ─ Ar et Ar ─ CH_2 ─ Ar, ce qui est probablement dû à leur haut besoin en énergie.

L'apparition à l'interface soudée de ponts C ─ O ─ C et d'eau liée avec des liaisons hydrogène fortes peut provoquer des réticulations entre les fragments de lignine et de cellulose. Les ponts Ar ─ Ar et Ar ─ CH_2 ─ Ar peuvent expliquer la réticulation supplémentaire de la lignine. Un tel mécanisme de réticulation provoque un rétrécissement de la matrice de la lignine avec l'apparition de fissures dans l'interface soudée lorsque le temps de soudage est supérieur à 6 s. Ceci va provoquer des tensions entre la formation des ponts C ─ O ─ C, qui s'arrête après 6 s, et la réticulation de la lignine qui continue. La combinaison de ces deux effets contribue au fait que les valeurs optimales de résistances mécaniques sont obtenues aux alentours de 4,5 s.

Cependant si le processus de réticulation de la lignine s'ajoute au réenforcement du composite lignine/microfibriles (Gfeller *et al.* 2003, Pizzi *et al*. 2006), le matériau devient plus fragile et des microfissures et espaces vides commencent à apparaître dans l'interface composite (Wieland *et al*. 2005). L'eau peut alors pénétrer dans l'interface soudée et affecter les liaisons hydrogènes formées. Ceci peut expliquer la forte baisse de résistance à l'eau des liaisons soudées déjà observée (5.2.4).

5.3.3.Résumé sur le développement de la microstructure interfaciale

L'ensemble des méthodes qui ont été développées pour l'étude des liaisons soudées a été utilisé afin d'établir un scénario du développement de la microstructure interfaciale lors du soudage linéaire de *Fagus sylvatica.* Les paramètres de soudages ont tous été fixés, on a seulement fait varier le temps de vibration (t_s) afin d'observer l'évolution des caractérisitiques physiques et chimiques du bois. La mesure de température par TIR a été fondamentale afin de mettre en relation les différents phénomères se déroulant à l'interface. Suite aux différentes observations on a pu mettre en évidence l'existence d'un domaine temporel optimal pour obtenir de bonnes performances des liaisons soudées. Les éprouvettes doivent au moins atteindre le stade d'extrusion du matériau et la température doit être de 220°C environ. Si celle-ci dépasse la moyenne de 250°C, les éprouvettes commencent à perdre leurs qualités mécaniques préalablement acquises. Cette fenêtre de température correspond aux temps de soudage variants de 2 s à 6 s. L'optimum est atteint pour un temps de soudage de 4,5 s. Les hypothèses chimiques formulées expliquant l'existence d'une telle fenêtre ont pu être vérifées à l'aide d'analyses FT-IR et CP-MAS ^{13}C RMN de l'interface soudée des temps de soudage 0 s, 2 s, 4,5 s, 6 s et 11 s. Ces analyses ont confirmé l'apparition de phénomènes de réticulations de la lignine grâce aux nouvelles espèces chimique formées principalement à partir de la décompostion des hémicelluloses. Les modifications chimiques majeures du soudage se déroulent dans les cinq premières secondes de vibration. La part de la contribution de ces réticulations à l'adhésion des deux pièces de bois n'est pas définie. Il semblerait qu'elles ne soient responsables que d'une petite part de l'adhésion. La plus grande partie serait principalement due à l'effet mécanique que joue la lignine fondue en comblant les lacunes de l'interface et en durcissant. L'enchevêtrement des fibres dû au ramolissement de la lignine et à l'action mécanique de la friction semble aussi être responsable d'une grande partie des phénomènes d'adhésion.

5.4.Simulation du comportement thermique du bois pendant le soudage

La vérification de la discussion précédente incite à se demander comment ces résultats peuvent être mis en pratique. L'ensemble des résultats précédents et leur interprétation poussent à la question suivante : est-il possible de modéliser les phénomènes thermiques au niveau de l'interface de soudage ? Une modélisation peut permettre la simulation du procédé de soudage dans différents cas de figure et donc d'éviter des essais longs et coûteux. Elle peut permettre aussi de simuler le procédé dans des cas extrêmes qu'il est difficile de traiter dans la réalité. Tel qu'il a été démontré précédemment le procédé de soudage est complexe et fait intervernir des forces mécaniques, des réactions chimiques et des effets thermiques dans des conditions de temps extrêmement courtes. On a choisi ici de s'appuyer sur la méthode des éléments finis afin de construire un modèle. Il s'agira d'un modèle uniquement thermique, les connaissances sur les phénomènes mécaniques et chimiques étant trop réduites.

5.4.1.Modèle pour la simulation dans le code aux éléments finis CAST3M

On a choisi ici, à partir des mesures de surface par TIR, de simuler l'évolution de la température à l'intérieur de la pièce de bois pendant le soudage linéaire (vibration et refroidissement). Ce travail consiste en l'élaboration d'un maillage puis d'un modèle de calcul définissant les caractéristiques du matériau. Il existe déjà des modèles de ce type pour la friction linéaire du titane (Vairis et Frost 2000) et la friction rotative de l'acier 36CrNiMo4 (Fu *et al.* 2003). Le modèle devrait permettre de donner l'évolution de la température de chaque point de la pièce à n'importe quel moment du soudage.

Calcul aux éléments finis

Le logiciel CAST3M a été utilisé. Il s'agit d'un code de calcul basé sur la méthode des éléments finis (EF) conçu pour pour l'analyse des structures et développé par le Commissariat français à l'énergie atomique (CEA).

Géométrie

La géométrie choisie est celle des échantillons standards de soudage (4.1.2), soit deux pièces de section of 20 x 15 mm. Un maillage en deux dimensions a été choisi. Etant donnée la symétrie linéaire existante dans le soudage par vibration linéaire, une seule pièce a été représentée et seulement la moitié de la surface de la section a été utilisée. La surface de calcul a donc été réduite à 10 x 15 mm.

Maillage

La surface sur laquelle le calcul a été appliqué est divisée en quatre différentes sous-surfaces dont les dimensions sont définies dans le Tableau 17 et qui sont issues des mesures de microscopie (5.2.2). Les EF choisis pour le calcul sont des éléments plans quadratiques bi-dimensionels à 8 noeuds, 1 degré de liberté pour chaque noeud et à interpolation quadratique (QUA8). Le maillage a été densifié sur la partie droite afin d'avoir une définition de calcul plus élevée des extrémités d'échantillons (Figure 86).

Tableau 17: Epaisseur des différentes zones de bois pour la construction du maillage.

Nom	Designation	Epaisseur (µm)
Melting Zone	MZ	~ 100
Fully Deformed Region	FDR	~ 100
Partially Deformed Region	PDR	~ 600
Bois non modifié	Wood	-

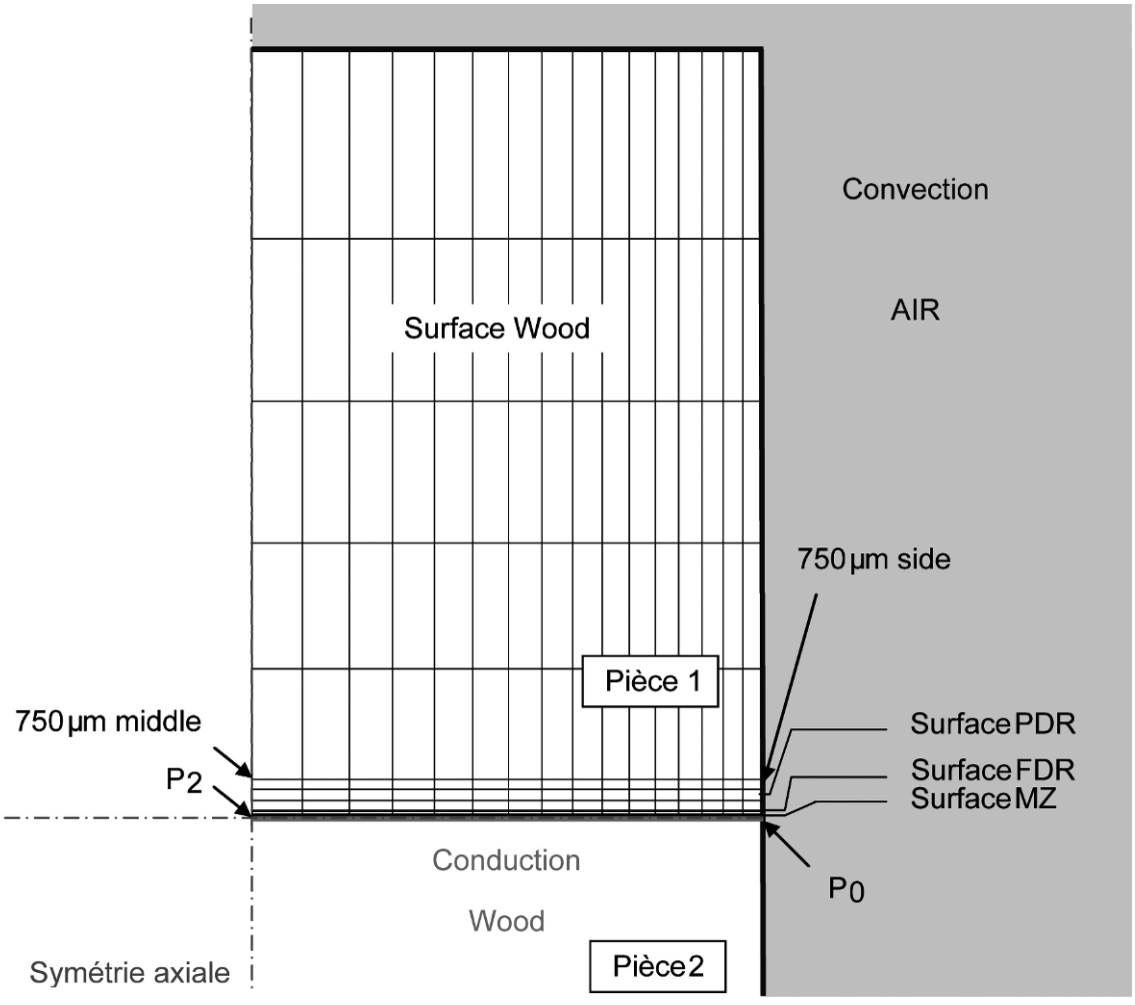


Figure 86: Géométrie et maillage pour la zone de calcul aux EF correspondante à une coupe transversale d'un échantillon de soudage.

Propriétés des matériaux

La densité (ρ) des différentes zones a été définie à partir des résultats de mesures de densitométrie (5.3):

$\rho_{Wood} = \rho_{PDR} = 720$ kg.$(m^3)^{-1}$; $\rho_{FDR} = 900$ kg.$(m^3)^{-1}$, $\rho_{MZ} = 1500$ kg.$(m^3)^{-1}$

La progression de la capacité calorifique (Cp) en fontion de la température est définie dans le Tableau 18.

Tableau 18: Evolution de la capacité calorifique du bois en fonction de la température (Eurocodes 5, 2002).

T (°C)	20	100	120	200	250	300	350	400	600	800	1200
Cp (J.kg^{-1}.°C^{-1})	1530	1770	2120	2000	1620	710	850	1000	1400	1650	1650

L'évolution de la conductivité thermique k du matériau en fonction de la température est définie dans le Tableau 19.

Tableau 19: Progression de la conductivité thermique du bois en fonction de la température (Eurocodes 5, 2002).

T (°C)	20	200	350
k_T (W.m^{-1}.°C^{-1})	1530	2000	850

Pour une humidité du bois de 12%, la conductivité thermique du bois augmente de façon linéaire lorsque la densité du bois augmente. En utilisant une banque de données d'essences de bois (Forest product laboratory 1999) l'équation suivante a été déterminée pour du bois à 12% d'humidité :

$$k = k_T \left(0{,}2427 \times 10^{-3} \times \rho + 0{,}0188\right) \qquad (23)$$

Sélection du matériau et du comportement du modèle EF

Un modèle isotrope a été appliqué sur toute la surface. La convection agit sur toutes les surfaces qui sont en contact avec l'air environnant (Figure 86).

Conditions aux limites

La température initiale a été fixée à T = 20°C dans le bois et dans l'air. Le flux de convection a été maintenu constant en fonction du temps (h = 8 W/m^2/°C, coefficient d'échange convectif). Le flux forcé était situé dans la ligne de soudage (Figure 1) et était variable en fonction du temps.

Boucle de calcul

Le calul a été réalisé avec la procédure PASAPAS de calcul thermique. Il s'agit d'un calcul à deux pas non linéaire et transitoire. Cette procédure permet des calculs linéaires et non linéaires avec des itérations successives, incluant la conduction, la convection et l'émissivité. Pour le modèle, le calcul a été réalisé avec un pas de 0.1s. La procédure thermique utilisée dans PASAPAS était la procédure DUPONT (9.2).

5.4.2.Résultats

5.4.2.1.Programme de simulation

Bien que la programmation en langage Gibiane soit plutôt difficile ce code est adaptable à différents problèmes physiques. Une banque de données d'opérateurs et de procédures pour tous les domaines de la physique est intégrée au logiciel (Le Fichoux, 1998). Pour l'élaboration du maillage, la géométrie a été simplifiée. On a travaillé en deux dimensions uniquement et en utilisant des axes de symétrie. Le maillage est densifié sur la partie droite (limite de contact avec l'air) (Figure 86). Ceci permet de mettre en évidence les éventuels effets de bords dus au refroidissement de la surface en contact avec l'air. Le maillage est densifié dans la zone de friction afin de permettre un calcul plus précis. Le maillage est entièrement paramètrable ce qui permet l'observation du comportement thermique de différents matériaux. Dans la partie précédente nous avons vu que les caractéristiques physiques du bois évoluaient en fonction du temps (5.3). On a pu observer que dès 1,5 s de soudage les trois zones MZ, FDR et PDR peuvent être distinguées à l'interface. Ces trois zones ont différentes densités ce qui devrait avoir une influence sur le comportement thermique durant le soudage du bois. L'épaisseur de chaque zone a été atribuée sur le maillage d'après les données des observations microscopiques (5.2.2). Sur le maillage, pour chacune des quatre surfaces définies (MZ, FDR, PDR and Wood) un nombre de divisions (Nd) a été attribué. Il définit le nombre d'éléments horizontaux choisis pour le calcul. Les trois principales caractéristiques influençant les transferts thermiques qui ont été incluses dans la procédure PASAPAS sont: la densité ρ, la capacité calorifique Cp et la conductivité thermique k. Pour l'air, le coefficient d'échange thermique h est pris en compte. Ces considérations permettent à la simulation d'être la plus proche possible des conditions matérielles réelles durant le soudage par friction linéaire du bois.

5.4.2.2. Evaluation du modèle développé

Pour évaluer la fiabilité du modèle, l'évolution de la température du point P_0 a été enregistrée pour un temps de soudage de 4,5 s (Figure 87) et comparée aux mesures de températures expérimentales. Les éventuelles erreurs dues à la mesure infrarouge doivent être introduites

dans le calcul. En effet la mesure s'effectue sur une ligne d'épaisseur d'un pixel. Dans notre cas un pixel correspond en réalité à un disque de diamètre de 0,5 mm. Par le fait que le maillage soit symétrique la température donnée par le modèle correspond à la température moyenne entre les points P_0 et P_1 qui sont distants de 0,25 mm (Figure 88). Dans le calcul cette distance est assimilée à la somme des épaisseurs des deux zones MZ et FDR.

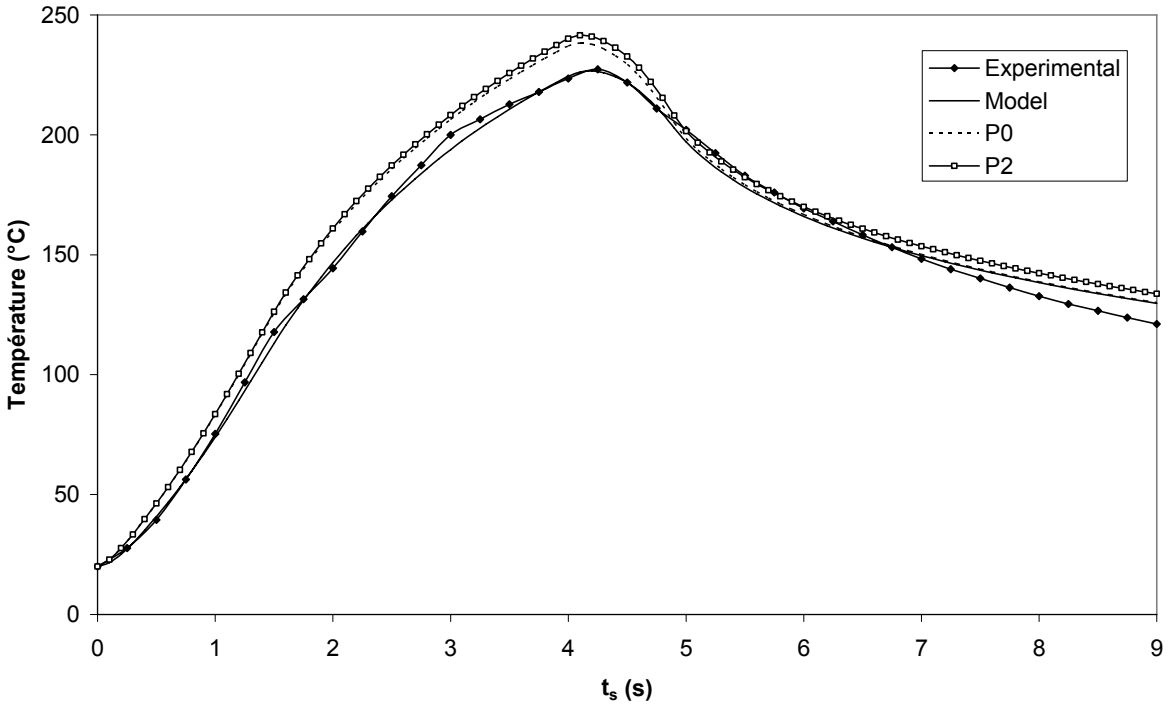


Figure 87: Evolution de la température en fonction du temps de soudage pour un cycle de friction de 4,5 s.

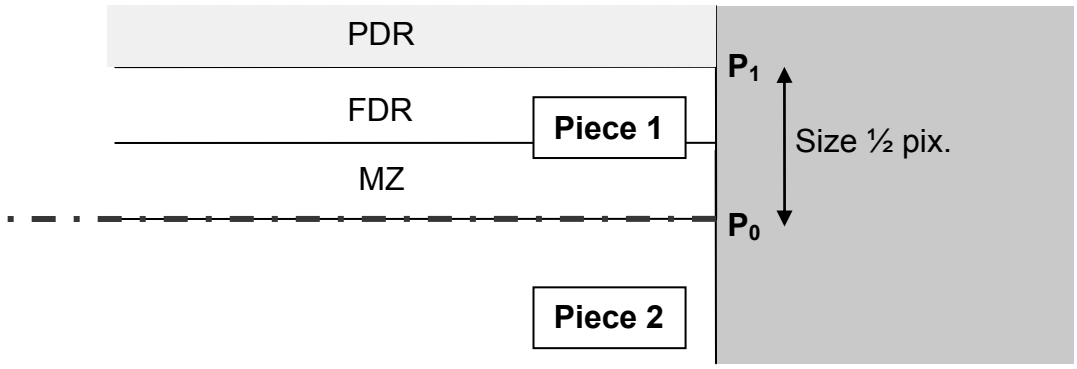


Figure 88: Détail du bas du maillage: épaisseur des différentes zones et position des points P_1 et P_0.

Le calcul de cette moyenne est introduit dans le modèle. Le flux de chaleur apporté au système est défini dans le Tableau 20. φ correspond au facteur multiplicatif à appliquer au

flux Q = 20'000 W/m^2. La mesure expérimentale, la moyenne calculée entre les points P_0 et P_1 et la progression des points P_0 et P_2 sont reportés sur la Figure 89.

Tableau 20: Quantité de flux de chaleur évaluée grâce aux mesures expérimentales.

Time (s)	**0.0**	**0.1**	**0.35**	**1.0**	**1.25**	**1.5**	**2.0**	**3.0**	**3.5**	**4.0**	**4.5**	**4.9**	**6.0**	**9.0**
φ	0.0	0.5	1.2	2.5	3.0	3.5	3.6	3.4	3.2	3.0	1.5	0.0	0.0	0.0

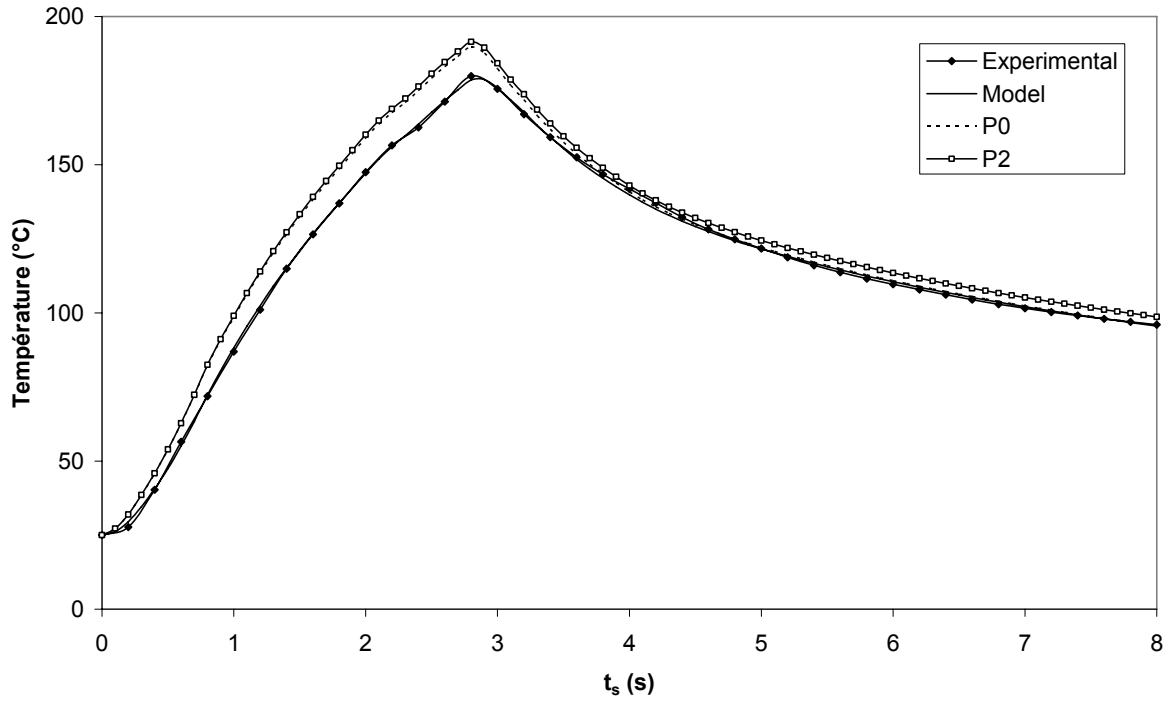


Figure 89: Résultats pour une simulation de soudage avec 3 s de friction.

L'évaluation de la qualité du modèle est basée sur l'observation des températures de refroidissement (ici après 4,5 s) en comparant les courbes des valeurs mesurées et des valeurs calculées. La Figure 87 montre que les deux courbes se supperposent bien au début du refroidissement. Mais à 9 s, la température mesurée est environ 10°C plus basse que la valeur calculée. Cette différence relativement faible montre qu'il existe des phénomènes qui, au stade actuel, ne peuvent pas être exactement identifiés et donc difficiles à introduire dans le modèle. La conductivité thermique du matériau à l'interface étant inconnue durant le procédé de soudage, elle a été considérée comme étant la même que celle du bois dans ce modèle. Cependant il est possible que la conductivité thermique de la ligne de soudage soit plus élevée, ce qui pourrait expliquer le fait que la ligne de soudage refroidit en réalité plus vite. D'autre part une quantité considérable de gaz est produite durant le procédé de soudage. Il s'agit en particulier de vapeur d'eau (5.2.5.1). L'évaporation de l'eau est une réaction qui nécessite beaucoup d'énergie, accélérant ainsi le refroidissement de la ligne de

soudage. L'évaporation des autres substances sous forme de gaz peuvent aussi être responsables des différences observées entre le modèle et les résultats expérimentaux (5.2.6).

5.4.2.3.Influence de la convection

Au moment où la température est maximale, la température moyenne entre P_0 et P_1 est de 227°C, la temperature de P_0 est de 238°C et la temperature de P_2 est de 242 °C. Si l'on compare les valeurs de P_0 et P_2, il est possible d'évaluer l'impact des phénomènes de convection et d'observer s'il existe des effets de bords. Lors de l'étude de la température de surface, on avait constaté, sur la longueur des échantillons, de faibles effets de bords (5.1.1.1, Figure 46). Ici on s'interesse non pas aux éventuels effets de bords dans la longueur de l'éprouvette mais à ceux existant dans la largeur de l'éprouvette. La différence est de 4°C entre P_0 et P_2, ce qui est négligeable pour la dimension d'éprouvette utilisée lors de cette étude. Si la valeur du coefficient de convection est augmentée, la température diminue mais la forme de la courbe reste identique. Un léger effet de bord commencera à apparaître pour des valeurs de h supérieures à 20 $W/m^2.°C$. Ces conditions ne peuvent être uniquement atteintes que si une convection forcée est appliquée au système, ce qui n'était pas le cas dans le cadre de cette étude.

5.4.2.4.Erreur de la mesure infrarouge

Ce modèle permet de mettre en évidence l'erreur de la mesure thermographique. La valeur moyenne de la température sur la surface du pixel à la fin de la friction est de 227°C alors que la valeur calculée est de 238°C, ce qui correspond à une différence de 11°C. Cependant aux alentours de 230°C une différence de température de ± 5°C n'a pas d'influence majeure sur les modifications physiques et chimiques du bois (5.3).

5.4.2.5.Simulation avec différents temps de soudage

Le modèle a été utilisé pour réaliser la simulation de deux autres cycles de temps de friction: 3 s et 10,5 s (Figure 89 et Figure 90). Sur ces deux figures on peut observer que pour des temps de vibration longs, la courbe de refroidissement (modèle) diffère de la mesure experimentale (experimental). À 15 s, la différence est d'environ 15°C. Ceci affirme que le modèle n'est pour le moment pas parfaitement adapté aux propriétés du nouveau matériau formé. Pour une friction de 3 s, le modèle se supperpose parfaitement sur les mesures expérimentales. Mais un temps de friction supérieur à 10 s semble avoir une influence forte sur les propriétés thermiques du matériau. Lors des trois tests on a pu observer que la différence de température entre les point P_0 et P_2 commence à apparaître après 2,5 s de friction (Figure 87, Figure 89 et Figure 90). Pour un temps de soudage de 10,5 s (Figure 90)

la différence entre le centre et le bord de l'éprouvette est de 10°C, ce qui est négligeable. Cela signifie que les phénomènes de convection existent pour de petites largeurs d'éprouvette, bien qu'ils soient très faibles.

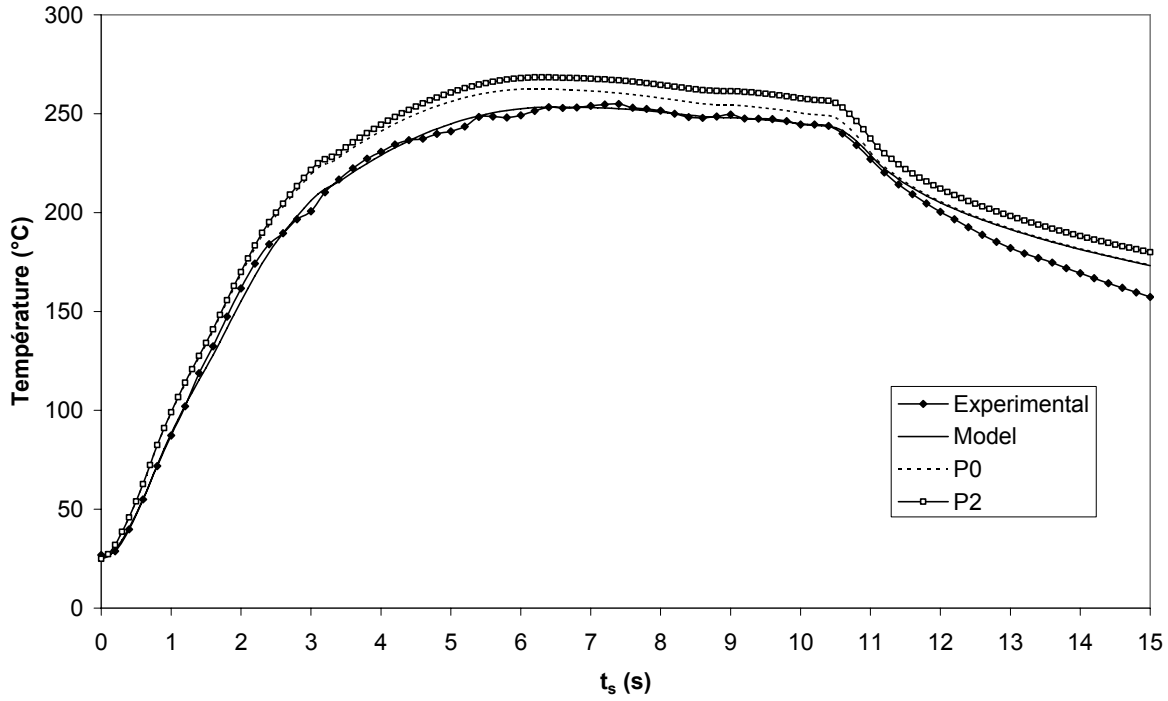


Figure 90: Résultat pour une simulation de soudage avec 10,5 s de friction.

5.4.2.6.Analyse du flux de chaleur calculé

Pour chacun des trois cas décrits précédemment, un flux de chaleur a été imposé de façon à ce que la température résultante du calcul corresponde à la mesure de TIR. Sur la Figure 91 les valeurs de flux des trois cas ont été reportées en fonction du temps de soudage. Dans les trois cas le flux augmente jusqu'à atteindre des valeurs comprisent entre 60 et 80 kW/m^2. Le flux maximal est atteint aux alentours de 2 s après le départ de la vibration. Ensuite le flux diminue progressivement bien que la vibration soit maintenue constante. L'énergie qui doit être apportée au système diminue donc après avoir atteint une valeur maximale. Nous avons vu que le temps de soudage de 4,5 s correspond à la résistance en cisaillement la plus élevée du joint (5.3). En observant la courbe dans le cas d'un soudage de 10,5 s, on peut remarquer que l'apport de chaleur diminue de façon continue après un maximum atteint à 2 s. Cela signifie que la friction mécanique diminue et ainsi que moins d'énergie est apportée au système après 4 s – 4,5 s de soudage. A cet instant le système semble atteindre un état stationnaire. A cette température des réactions exothermiques se produisent. D'autre part l'évaporation de l'eau et l'extrusion du matériau peuvent provoquer un refroidissement du système (5.3).

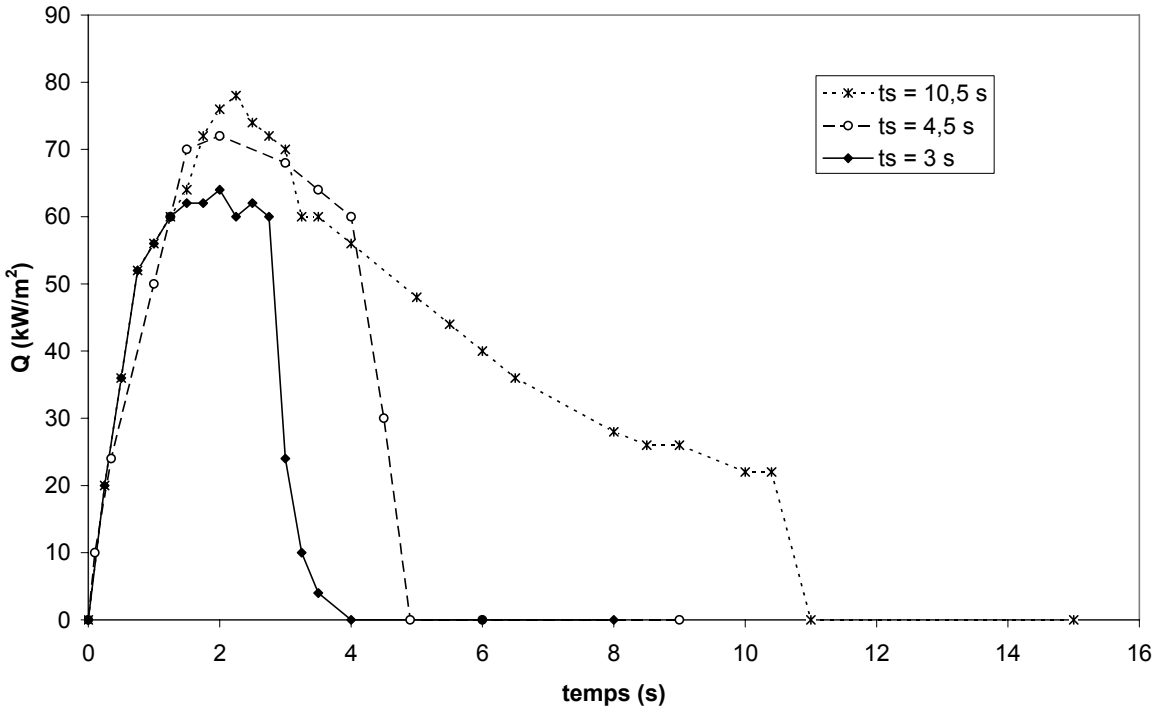


Figure 91: Apport de flux d'énergie au système durant le soudage calculé pour trois temps de soudage différents.

5.4.2.7.Simulation du soudage sur des pièces larges

Pour simuler le comportement thermique de pièces plus larges pendant le soudage, le même modèle a été utilisé mais la longueur de la surface a été fixée à 20 cm. Le temps de vibration utilisé pour le calcul était de 4,5 s (Figure 92). D'autre part l'échelle de temps a été étendue à 20 s. Deux points de contrôle de la température ont été rajoutés à une profondeur de 750 µm au-dessus de l'interface. L'un de ces points (750 µm middle) est positionné sur l'axe de symétrie au milieu de l'échantillon (Figure 86). Le second point (750 µm side) est situé sur la limite entre l'échantillon et l'air (Figure 86). A la fin du calcul (20 s) le modèle prédit une température d'environ 100°C pour tous les points de contrôle. La température des points (750 µm middle) et (750 µm side) est d'environ 130°C à la fin de la friction (4,5 s). A cette profondeur les effets de bord sont aussi négligeables. En effet la différence entre les deux courbes n'est pas plus élevée que 5°C à la fin de la phase de vibration. Cette différence n'est donc pas assez élevée pour considérer que des pièces de 20 cm de long pourraient avoir des effets de bord qui pourraient provoquer des défauts sur les parties latérales du joint de soudage. Pour une telle largeur une grande quantité de gaz est probablement générée et ces gaz ont des difficultés à s'évacuer de la ligne de soudage. Dans ce cas on peut penser que des défauts peuvent se produirent dans la ligne de soudage. Ils seraient dus à la contre-pression générée par l'évacuation de ces gaz. Ce modèle n'est pas élaboré afin de pouvoir introduire de tels phénomènes physiques.

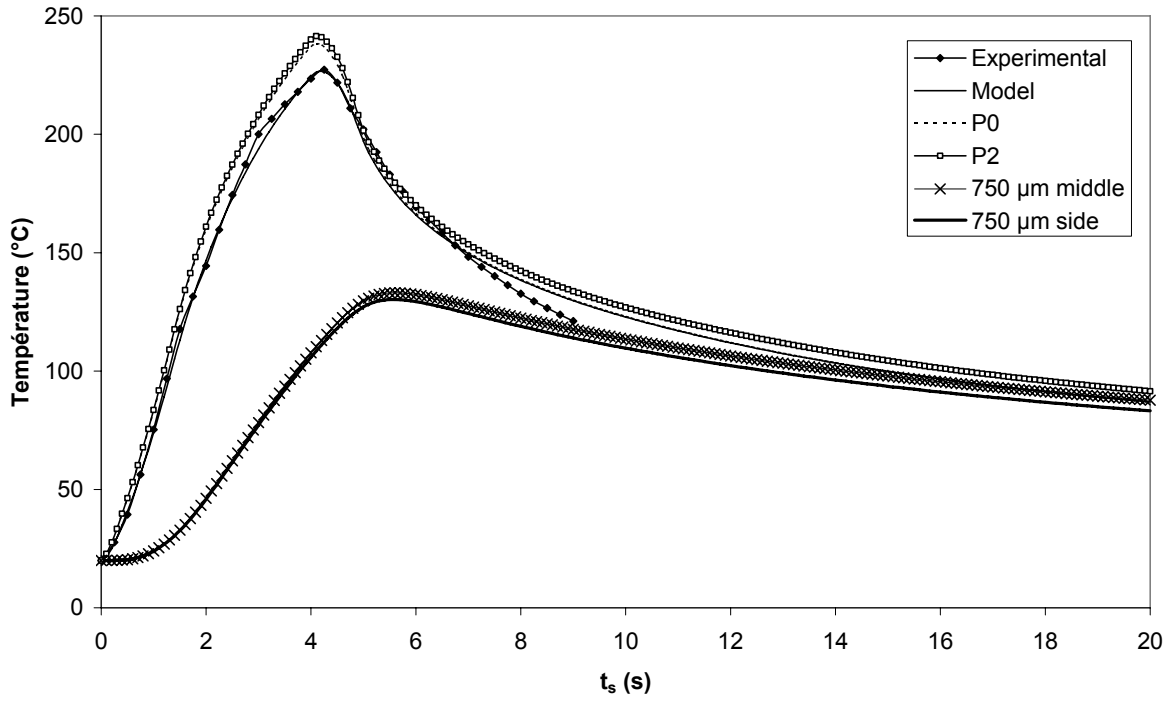


Figure 92: Résultat d'une simulation pour un temps de soudage de 4.5s sur une pièce de 20cm de large.

5.4.3.Conclusion sur la simulation numérique

On a pu développer un modèle pour la simulation numérique afin d'analyser le comportement thermique lors du soudage d'échantillons de *Fagus sylvatica*. Le procédé de soudage par friction linéaire du bois montre dans un très court temps de fortes variations thermiques du bois et des phénomènes de conduction. Le modèle inclut la densité des différentes couches de bois, les propriétés thermiques du bois et de la ligne de soudage et les conditions extérieures. Les valeurs et la distribution du flux de chaleur ont été analysées numériquement. Le suivit du comportement du matériau pendant la période de refroidissement (lorsque l'apport d'énergie supplémentaire est considéré comme nul) permet de tester la validité du modèle en comparant les résultats du calcul avec les valeurs expérimentales. Le modèle ne peut pas être utilisé pour prédire exactement la température durant le refroidissement. Il apparaît évident qu'il existe des imprécisions dans la caractéristation des propriétés de conductibilité thermique des différents matériaux car la convection présente n'influence pas la vitesse de refroidissement de l'éprouvette. On peut penser que des réactions chimiques (hydrolyse, pyrolyse et émanation de gaz) sont responsables des différences de température entre les valeurs calculées et les valeurs mesurées. Cependant ces réactions ne peuvent pas être prises en compte dans un modèle exclusivement thermique. Le modèle est suffisamment fiable pour simuler la diffusion de la température dans le bois pour différentes essences de bois avec différentes propriétés

physiques. L'étape suivante de la progression du modèle serait d'introduire les pressions exercées, les forces de cisaillement et le flux de matière dû à l'extrusion au niveau de l'interface.

5.5.Influence des caractéristiques du substrat bois à souder

Gfeller *et al.* (2003) avaient déjà constaté, dans les premiers travaux sur le soudage linéaire du bois, qu'il existait des différences notables dans les résultats des différentes essences testées que ce soit au niveau des combinaisons de paramètres à employer ou des résistances mécaniques obtenues. Les études de Leban *et al.* (2004) sur la densification locale du bois lors du soudage linéaire ainsi que les études de Properzi *et al.* (2004) sur le soudage du bois de fils parallèles ou de fils croisés aboutissent aussi à une importante variabilité. L'objectif de cette partie a été d'étudier les influences des caractéristiques du substrat sur le soudage afin de pouvoir faciliter la détermination des paramètres optimaux pour chaque type de substrat. Le principal critère de comparaison a été la résistance au cisaillement ou à la traction perpendiculaire des assemblages soudés.

5.5.1.Influence de l'orientation anatomique du bois

5.5.1.1.Bois de fil

Une étude menée sur *Acer campestre* nous a permis d'observer l'influence de l'orientation anatomique du bois. Des éprouvettes ont été préparées afin de pouvoir effectuer des soudages d'angles formés avec les cernes d'accroissement de 0°, 45° et 90° (4.1.2). Les éprouvettes ont été ensuite soudées selon les paramètres du Tableau 21 . Pour chaque type d'orientation de fil on a effectué 10 soudages.

Tableau 21: Paramètres de soudage pour l'étude de l'influence de l'orientation des cernes d'accroissement.

Paramètre	Valeur
Machine	BRANSON 2700 en mode automatique
a	3 mm
p_s	1,33 N/mm^2
t_s	4 s

Les éprouvettes après soudage ont été testées en cisaillement par la traction selon les indications du paragraphe 4.3.5.1. Les résultats des tests sont présentés sur la Figure 93.

L'orientation tangentielle du soudage (0°) est la plus défavorable. Les orientations radiales à 45° et 90° donnent des résistances beaucoup plus satisfaisantes et l'orientation à 45° semble la plus favorable au soudage. Ces éprouvettes ont été préparées selon la méthode décrite dans le paragraphe 4.3.2 puis observées. Les images obtenues sont reportées sur les Figure 52, Figure 53 et Figure 54 du paragraphe 5.2.2. Comme nous l'avons supposé dans le paragraphe 5.2.2, il semblerait que la direction des rayons ligneux, qui a une forte influence sur la capacité du bois à être comprimé, influe aussi sur la zone de soudage. Quand les rayons ne sont pas perpendiculaires à la zone de soudage il ne se crée pas de force qui va contre la pression perpendiculaire. Le bois est donc plus facilement compressé. Il se peut alors que ceci favorise un apport de matière plus important et plus dense qui permette d'avoir une zone densifiée et modifiée plus large et donc plus solide. La différence de densité évolue graduellement dans ces échantillons ce qui évite certainement de créer des zones fragiles accroissant ainsi la résistance à la rupture des échantillons lors des essais de cisaillement par la traction. L'orientation des cernes d'accroissement naturel par rapport au plan de soudage est donc une caractéristique importante à prendre en considération lors du soudage. L'orientation doit être de préférence de 45° afin de garantir un bon soudage.

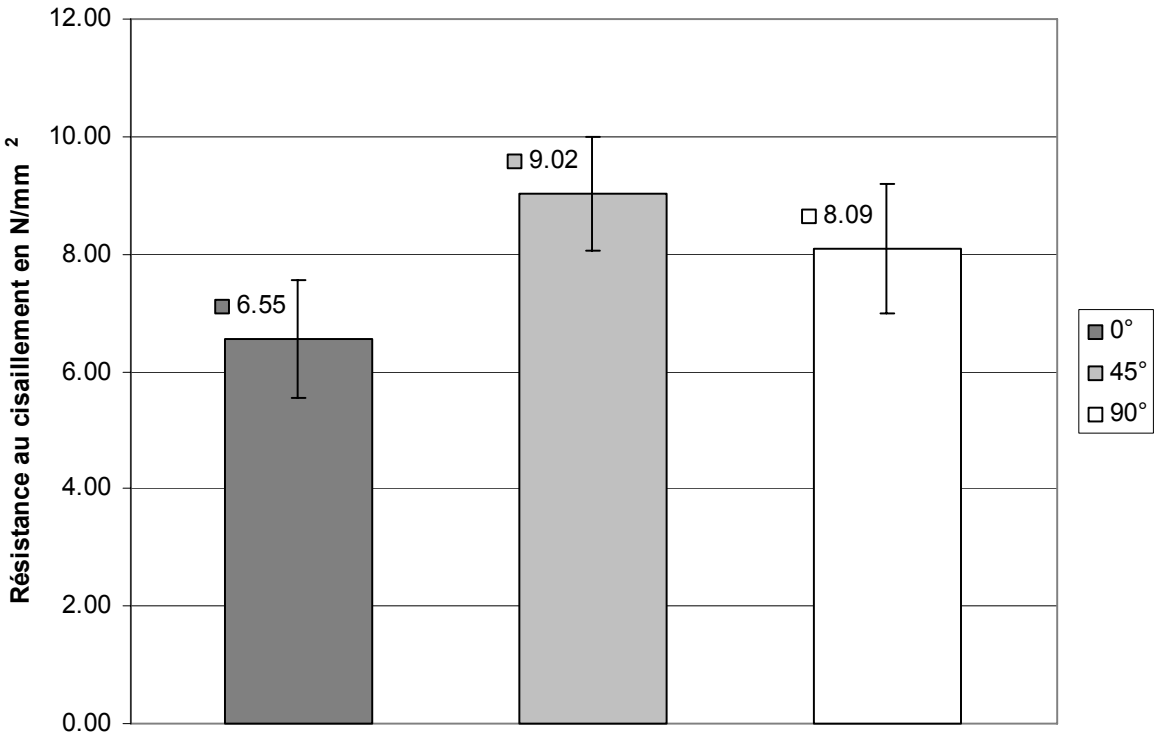


Figure 93: Influence de l'orientation du fil du bois sur la résistance en cisaillement du soudage avec *Acer campestre*.

5.5.1.2.Bois de bout

L'orientation en bois de bout (plan d'assemblage perpendiculaire au sens des fibres) est connue pour être difficile dans le cas du collage du bois. La solution la plus souvent utilisée est le système d'entures multiples qui permet d'agrandir la surface de contact entre deux pièces de bois et qui garantit des résistances d'assemblage plus élevées. Afin d'observer si le soudage en bois de bout est possible et si c'est le cas, quelles en sont ses performances, une série d'essais a été effectuée avec *Fagus sylvatica*. Les éprouvettes ont été préparées de façon à ce que le plan de soudage soit perpendiculaire à la direction du fil du bois, leur dimension était la dimension standard utilisée pour les essais (4.1.2). Différentes combinaisons de paramètres ont été testées. Les éprouvettes ont ensuite été testées en traction perpendiculaire selon la méthode décrite en 4.3.5.2. Les résultats obtenus sont présentés dans le Tableau 22. Les combinaisons ont été choisies de façon à ce que les temps de soudages soient contenus dans la fenêtre de temps qui a été déterminée pour *Fagus sylvatica* dans le paragraphe 5.3.1. On a choisi aussi de tester des combinaisons avec des pressions de soudages plus élevées (combinaisons 4 et 5, Tableau 22) en supposant que l'écrasement des fibres serait moins important étant donnée la résistance élevée à la compression (environ 62 N/mm^2) du bois de *Fagus sylvatica* dans la direction longitudinale (Forest product laboratory 1999).

Tableau 22: Combinaisons de paramètres choisis pour le soudage en bois de bout de *Fagus sylvatica* et résistance des assemblages à la traction perpendiculaire.

Numéro	a (mm)	t_s (s)	t_m (s)	p_s (N/mm^2)	p_m (N/mm^2)	Résistance à la traction (N/mm^2)	Écart-type
1	3	5	5	1,33	1,33	3,62	1,14
2	3	6	5	1,33	1,33	2,72	0,92
3	3	4	5	1,33	1,33	2,70	0,72
4	3	5	5	2	2	2,09	0,79
5	3	5	5	2,66	2,66	2,06	0,77

Il s'est avéré, d'après les résultats, que cette compensation par une forte pression n'apporte pas d'amélioration de performance de la ligne de soudage. Tous les tests mécaniques ont montré des ruptures adhésives, ce qui est classique du soudage du bois (5.2.3). Cependant la combinaison de paramètres n°1, la plus performante montre des valeurs de résistance en traction d'environ 3,6 N/mm^2 soit environ 3 % de la résistance en traction longitudinale du bois de *Fagus sylvatica* (environ 135 N/mm^2, Forest product laboratory 1999). Selon Selbo (1975), les performances que l'on peut obtenir avec un adhésif en traction longitudinale dans

le cas d'un assemblage en bois de bout plan, correspondent environ à 10% de la résistance du matériau dans la direction longitudinale. Ces valeurs sont donc plutôt basses mais le soudage en bois de bout est possible et, chez *Fagus sylvatica*, il peut être réalisé avec les mêmes paramètres que pour un plan de soudage parallèle aux fibres. La performance d'un assemblage en bois de bout collé peut être améliorée par exemple par l'usinage d'un profil en entures multiples (Selbo 1975), ceci sera présenté pour le soudage dans la partie 5.6.

5.5.2.Influence de la qualité de la surface

Dans l'industrie du bois et notamment dans le collage du bois massif, la notion de qualité de surface est importante. Pour le soudage du bois il est clairement nécessaire d'avoir des surfaces planes parfaitement parallèles sous peine de provoquer une friction inhomogène et donc une mauvaise qualité de soudage. Cependant jusqu'à maintenant l'influence de la qualité d'usinage de la surface à souder n'avait jamais été étudiée. On a testé l'influence du degré de ponçage des surfaces à souder sur le processus de soudage et la qualité du joint. Les caractéristiques de température et de résistance mécaniques de différents échantillons rabotés et poncés avec différents grains ont été comparées. Des éprouvettes d'*Acer campestre* de dimensions standards (4.1.2) ont été préparées selon les indications du Tableau 23.

Tableau 23: Types de qualité d'usinage des surfaces testées pour le soudage d'*Acer campestre.*

Dénomination	Qualité de surface
R	Brut de rabotage
A	Ponçage avec grain 80
B	Ponçage avec grain 150
C	Ponçage avec grain 320

Dix éprouvettes de chaque type de qualité de surface ont ensuites été soudées selon les paramètres décrits dans le Tableau 24. Des analyses par TIR suivant les indications du paragraphe 4.3.1.1 et des tests mécaniques de cisaillement (4.3.5.1) ont été réalisés sur ces éprouvettes. La qualité de surface qui présente les meilleurs résultats au niveau des tests mécaniques est la qualité R (Figure 94) atteignant parfois des valeurs supérieures à 10 N/mm^2.

Tableau 24: Paramètres de soudage d'*Acer campestre* pour la détermination de l'influence de la qualité d'usinage de la surface.

Paramètre	Valeur
Machine	BRANSON 2700 en mode manuel
a	3 mm
p_s	1,33 N/mm^2
t_s	4 s

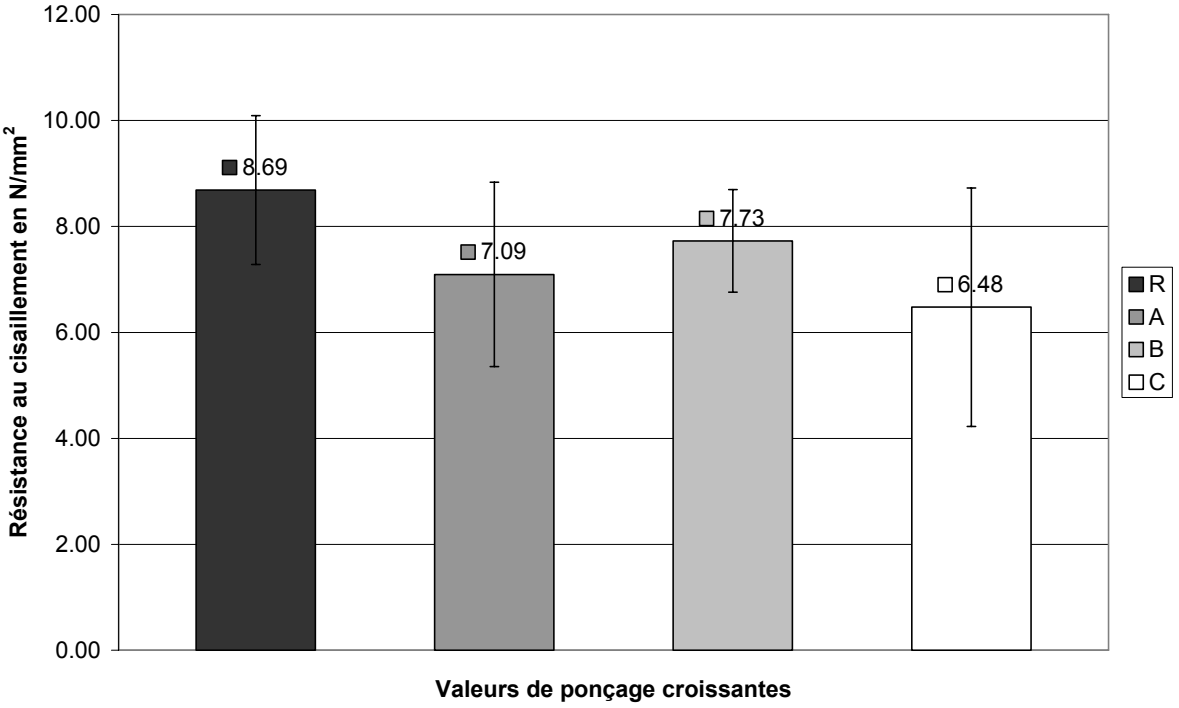


Figure 94 : Résultats des résistances mécaniques des joints pour des qualités de ponçage différentes.

Cela peut s'expliquer par le fait que le rabotage ne provoque ni compression ni échauffement de la structure anatomique du bois et qu'elle reste suffisamment rugueuse pour permettre un bon frottement. Si l'on observe l'état de surface très lisse, presque poli des éprouvettes poncées avec un papier à 320 on se rend compte que le frottement s'amorce beaucoup moins facilement. En effet le coefficient de friction semble être fortement diminué. D'autre part cette dernière série (C) comporte une forte hétérogénéité des résultats ce qui est un inconvénient pour le processus. La qualité de surface du bois doit donc être de préférence brut de rabotage. Pour analyser et comprendre ce phénomène nous avons fait des mesures de température par caméra infrarouge.

Analyse de l'influence de la qualité de ponçage sur la température.

La température maximale (4.3.1.1, étape 1) des quatre types d'états de surface a été relevée sur plusieurs échantillons. Les résultats sont présentés sur la Figure 95.

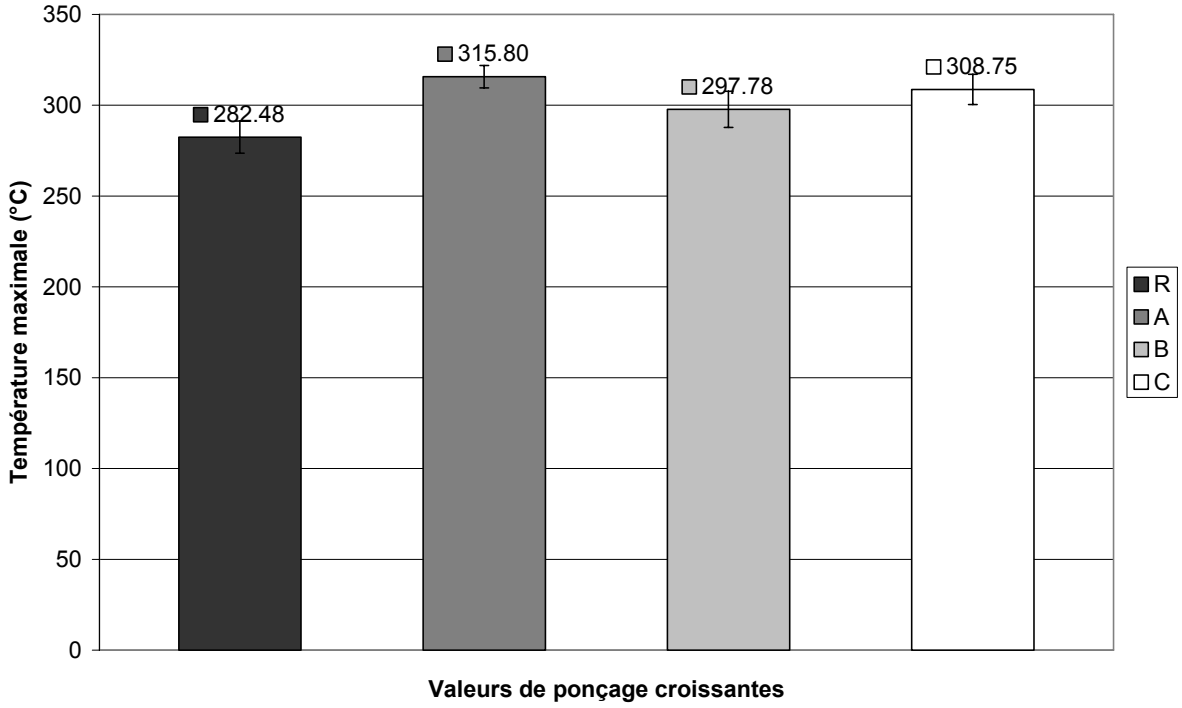


Figure 95: Résultats des températures pour différentes qualités de ponçage.

La température maximale, contrairement à la résistance mécanique est plus élevée pour les pièces poncées que pour les pièces rabotées. D'après ces mesures une température maximale de 280°C serait à ne pas dépasser pour assurer une bonne qualité du joint (5.3.1). Par contre une élévation du coefficient de friction (baisse de degré de ponçage) ne semble pas provoquer une élévation de température. Afin d'observer si cet état de surface a une influence sur la pente de montée en température ou sur l'allure de la sigmoïde de température, on a relevé la température moyenne maximale de la ligne de soudage pendant le processus (4.3.1.1, étape 2) pour 4 éprouvettes représentatives des 4 états de surface (Figure 96). Il n'existe pas de différence notable au niveau de la forme de la courbe sigmoïde de ces quatre types d'état de surface. Le relevé du type B a une pente de départ plus rapide que les autres types d'état de surface. Il n'y a pas vraiment d'explication rationnelle à ce phénomène. La température de 150°C est atteinte plus rapidement (2,2 s) pour les états de surface R et A. Pour l'état de surface C la température de 150°C est atteinte à 2,5 s. L'amorçage est donc un peu plus lent pour cet état de surface. Lorsque des pièces de bois sont poncées il apparaît à la surface une rugosité en dents de scie due aux grains du papier de ponçage (Riegel 1997). Le ponçage s'effectue dans le sens des fibres comme le

soudage. Ainsi on peut s'imaginer que les pièces s'emboîtent les unes dans les autres grâce à ce profil et que l'anatomie est l'unique rugosité qui provoque alors la friction (Figure 97).

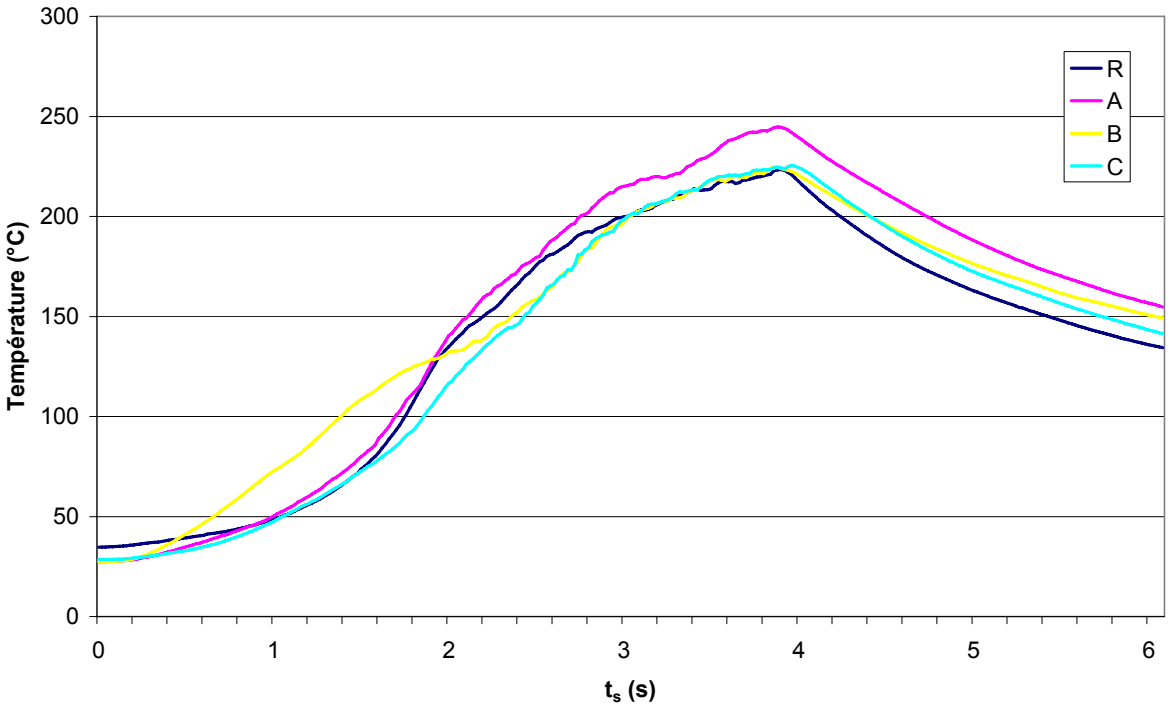


Figure 96: Évolution de la température moyenne maximale de la ligne de soudage pendant le processus.

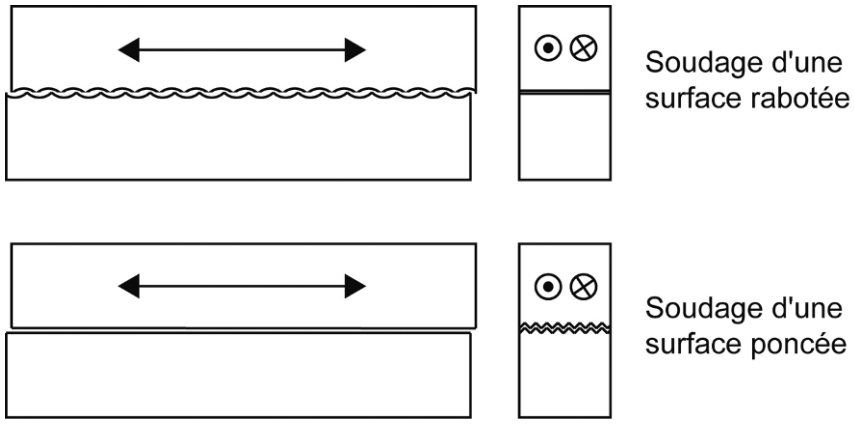


Figure 97: Schématisation du soudage de pièces de bois avec un état de surface raboté (en haut) et poncé (en bas). Les flèches indiquent le sens de la vibration.

Dans le cas du rabotage, la surface présente des vagues perpendiculaires aux fibres engendrées par la rotation de l'outil tranchant (Fuss 1995). Ces vagues provoquent une rugosité à l'encontre du sens de la friction. Si l'on superpose deux pièces rabotée l'une contre l'autre il existera un petit espace d'air, ce qui n'est pas le cas pour des pièces poncées. Cette propriété de surface des pièces rabotées peut provoquer un retard dans la

montée en température du bois et expliquer les différences de température entre pièces rabotées (± 280°C) et pièces poncées (± 300°C) visibles sur la Figure 95. Il est aussi connu que le rabotage permet d'obtenir une meilleure planeité sur toute la surface d'une pièce de bois que le ponçage. En effet lors du ponçage l'abrasif présente souvent des irrégularités au niveau de la répartition des grains et de leur taux d'usure (Riegel 1997). D'autre part si l'entraînement de la pièce lors du ponçage est effectué par une méthode manuelle ou semi-manuelle (ce qui est le cas ici) il peut provoquer la perte de planiéité de la pièce car la pression exercée ne sera pas homogène. Comme nous l'avons déjà expliqué dans le paragraphe 3.3.2 si les deux pièces à souder ne sont pas parfaitement planes, le soudage n'est plus homogène, ce qui provoque une baisse de qualité de l'assemblage. Ceci explique la baisse de la résistance en cisaillement du soudage des pièces poncées (Figure 94). L'état de surface le plus favorable à la soudure est donc le bois brut de rabotage.

5.5.3.Etude sur différentes essences de bois

Le potentiel d'application technologique du soudage linéaire par friction pour le bois requiert l'expérimentation sur de multiples essences de bois. Dans la partie fondamentale précédente (5.3) on s'est concentré sur une essence : *Fagus sylvatica* et ceci afin de limiter les effets dus à la variabilité du matériau. Déjà même au sein d'une seule essence, et en limitant la variation des paramètres de soudage au seul paramètre t_s, on a pu observer une variabilité non négligeable des résultats se traduisant par exemple par des écart-types élevés dans les résistances au cisaillement des échantillons. Cette variabilité est la conséquence directe de la variabilité qu'il existe à l'intérieur d'une même essence et même de celle qu'il existe à l'intérieur d'un même arbre. Le plan ligneux des différentes essences de bois forestières présente une variabilité considérable qui se répercute sur les propriétés physiques du bois et ainsi ses propriétés technologiques et ses aptitudes à différents emplois (Nepveu 1994). En étudiant différentes essences de bois et en sachant que l'adhésion provoquée par le soudage est issue de la transformation chimique et physique du bois et d'aucun autre matériau d'apport, on peut s'attendre à ce que la variabilité du matériau se répercute directement sur celle du soudage. Le Tableau 2 donne la liste de l'ensemble des essences et matériaux bois qui ont fait l'objet d'expérimentations de soudage. Dans les 17 essences listées seulement quelques unes ont fait l'objet d'études approfondies. Cependant on a pu collecter des informations concernant leur soudabilité, leur température de soudage et la résistance mécanique du joint soudé. Dans le Tableau 25 on retrouve des informations concernant plusieurs essences. Les valeurs de résistances notées sont celles qui correspondent à la meilleure combinaison de paramètres de soudage trouvée (l'ensemble des combinaisons est présenté dans l'annexe 9.3). La valeur de la température moyenne

maximale a été déterminée suivant l'étape 2 de la méthode décrite en 4.3.1.1. Pour beaucoup de ces essences aucune optimisation de la résistance mécanique de l'assemblage n'a été effectuée, cependant elles ont toutes pu être soudées et ont montré une adhésion des deux pièces de bois.

Tableau 25: Résistances mécaniques de joints soudés et température moyenne maximale lors du soudage pour différentes essences de bois. L'écart-type est indiqué après chaque valeur ainsi que le nombre de répétitions entre crochets.

Essence	Résistance cisaillement (N/mm^2)	Résistance traction (N/mm^2)	Tmoy max(°C)
Abies alba M.	-	-	178±18 [9]
Picea abies L.	5.3±1.4 [10]	-	153±27 [9]
Picea mariana Mill.	4.3±0.1 [2]	-	-
Picea sitchensis	-	0.5±0.2 [9]	-
Pinus strobus L.	3.1±2.4 [2]	-	-
Pinus sylvestris L.	-	-	135±19 [8]
Acer campestre L.	9.0±1.0 [9]	-	223±6 [5]
Acer saccharum Marsch.	8.3±0.6 [2]	-	-
Betula alleghaniensis Britt.	2.4±2.3 [2]	-	-
Carpinus betulus L.	-	-	263 [1]
Fagus sylvatica L.	8.5±0.7 [10]	-	228±6 [4]
Hevea brasiliensis	6.7±1.1 [10]	-	-
Paulownia tomentosa	3.5±0.7 [10]	-	-
Populus nigra L.	5.3±0.8 [5]	-	-
Quercus robur L.	-	2.5±0.5 [15]	176±41 [9]
Robinia pseudoacacia L.	-	-	140±29 [9]

De manière générale les essences de feuillus testées ont donné de meilleurs résultats que les essences de résineux, beaucoup plus difficiles à souder. *Betula alleghaniensis* Britt. est une essence canadienne. Ses résultats de résistance sont bas et très dispersés. Cela s'explique par le fait qu'une seule combinaison de paramètres a été testée sur cette essence et sur très peu d'échantillons. *Paulownia tomentosa* et *Populus nigra* L., qui sont des essences de feuillus de faible densité, sont les essences optimisées les moins performantes. *Populus nigra* L. présente les mêmes difficultés que les essences de résineux

lors du soudage : un fort écrasement du matériau au niveau de l'interface et un retour élastique après le soudage qui peut provoquer directement une ouverture du joint. Pour palier à ces problèmes, des soudages « doux » ont dû être expérimentés et le temps de maintien a dû être fortement prolongé afin de stabiliser la liaison soudé. La friction des essences de densité plus élevée, notamment les essences de feuillus, donne des valeurs de température moyenne maximale de soudage plus élevées. Ces résultats nous montrent que les tendances observées lors des études sur *Fagus sylvatica* semblent se retrouver aussi sur les autres essences. Pour garantir un soudage satisfaisant il semble que la température maximale moyenne à atteindre soit située entre 180°C et 250°C environ. Il est plus difficile d'obtenir une bonne performance de soudage pour des essences de faible densité que pour des essences de densité plus élevée telles que *Fagus sylvatica* ou *Acer campestre*. Le principal résultat de ces observations montre qu'il existe une variabilité considérable des résultats de résistance mécanique entre les différentes essences, confirmant la forte influence du matériau bois sur le soudage, lui-même très variable.

5.5.4.Etude sur les bois modifiés

5.5.4.1.Bois traités thermiquement

Le traitement thermique du bois est une technologie assez récente permettant d'augmenter la stabilité dimensionelle du bois ainsi que sa durabilité de façon assez efficace (Seborg *et al.* 1953, Kollmann et Fengel 1965, Stamm 1964, Kollmann et Schneider 1963, Noack 1969, Burmester 1973). Différents procédés ont été développés. Il s'agit de traitements ayant lieu dans un domaine de température de 150°C à 280°C. L'un de ces traitements, le Plato® Wood, commercialisé aux Pays Bas, est basé sur deux pas à températures douce (Ruyter 1995, van Zuylen 1995). L'augmentation de la stabilité dimensionnelle est due en partie à la modification et l'augmentation de la réticulation de la lignine (Tjeerdsma *et al.* 1998, Nuopponen *et al.* 2004, Repellin et Guyonnet 2005, Weiland et Guyonnet 2003) et, au niveau anatomique, la dégradation partielle contrôlée de la paroi cellulaire ayant pour conséquence une relaxation des contraintes de la paroi cellulaire (Kandem *et al.* 1999, 2000 et 2002). De nombreuses modifications et réactions chimiques définies par l'ensemble de ces auteurs se produisent durant le traitement du bois. Etant donnée les caractéristiques intéressantes du Plato® Wood, il serait avantageux de connaître son comportement lors du soudage du bois pour des applications futures. Des éprouvettes de Plato® Wood ont donc été préparées selon les indications du paragraphe (4.1.3) à partir de *Fagus sylvatica*, *Betula alba* et *Populus sp*. A partir de ces pièces on a ensuite fabriqué des pièces de dimension standard pour le soudage (4.1.2) puis elles ont été soudées avec différentes combinaisons

de paramètres et ont été testées en cisaillement (4.3.5.1). Les résultats sont indiqués dans le Tableau 26. Des images par MEB selon la méthode décrite en 4.3.3 ainsi que des analyses en microdensitométrie à rayons X selon la méthode décrite en 4.3.4 ont été réalisées. Les résultats du Tableau 26 indiquent que les pièces traitées thermiquement peuvent être soudées, bien que ces résultats soient en général plus faibles que ceux obenus avec des bois non-traités.

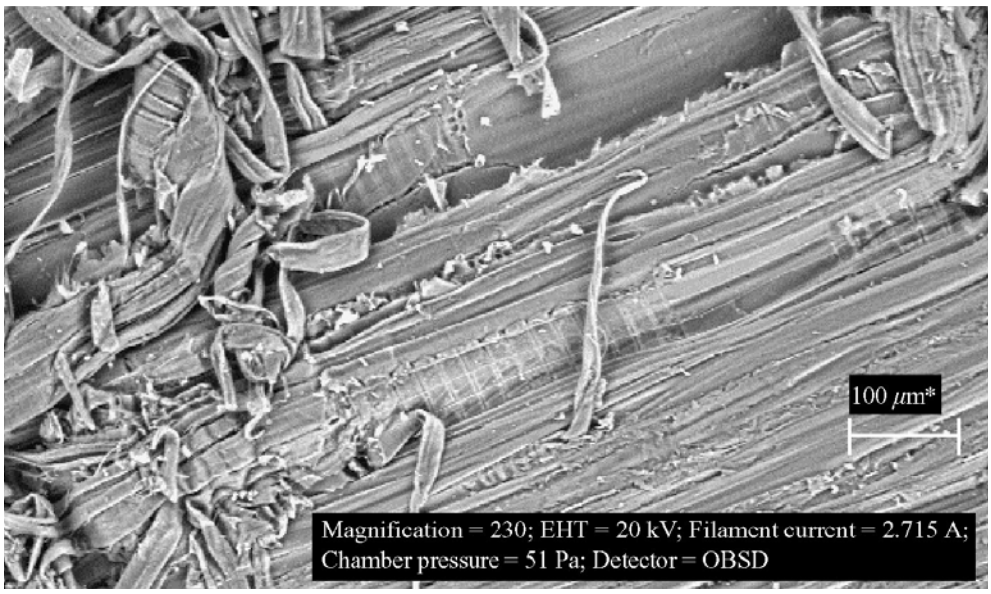
Tableau 26: Paramètres de soudage pour les bois traités thermiquement et résultats de la résistance en cisaillement des liaisons soudées.

Essence et traitement	t_s	p_s	t_m	p_m	Densité moyenne (kg/m^3)	Résistance (N/mm^2)	Ecart-type	Valeur max. (N/mm^2)	Valeur min. (N/mm^2)
Betula alba hydrothermolyse	4	1,33	7	1,33	515	2,08	0,82	3,49	1,10
Betula alba Plato	3	1,33	7	1,33	568	3,71	1,04	5,29	2,91
Betula alba Plato	3	1,33	10	1,33	591	5,50	1,45	7,25	4,26
Betula alba Plato	3	1,33	7	1,33	577	4,34	1,5	7,35	2,91
Betula alba non traité	3	1,33	7	1,33	561	5,97	0,68	6,51	5,35
Populus sp. hydrothermolyse	2	1,33	7	1,5	423	2,64	0,65	3,53	1,44
Populus sp. Plato	2	1,33	7	1,5	444	2,29	0,94	3,53	1,17
Fagus sylvatica Plato	3	1,33	7	1,5	661	4,32	2,31	8,82	1,29
Fagus sylvatica non traité	3	1,33	7	1,5	657	8,07	1,06	8,61	7,44

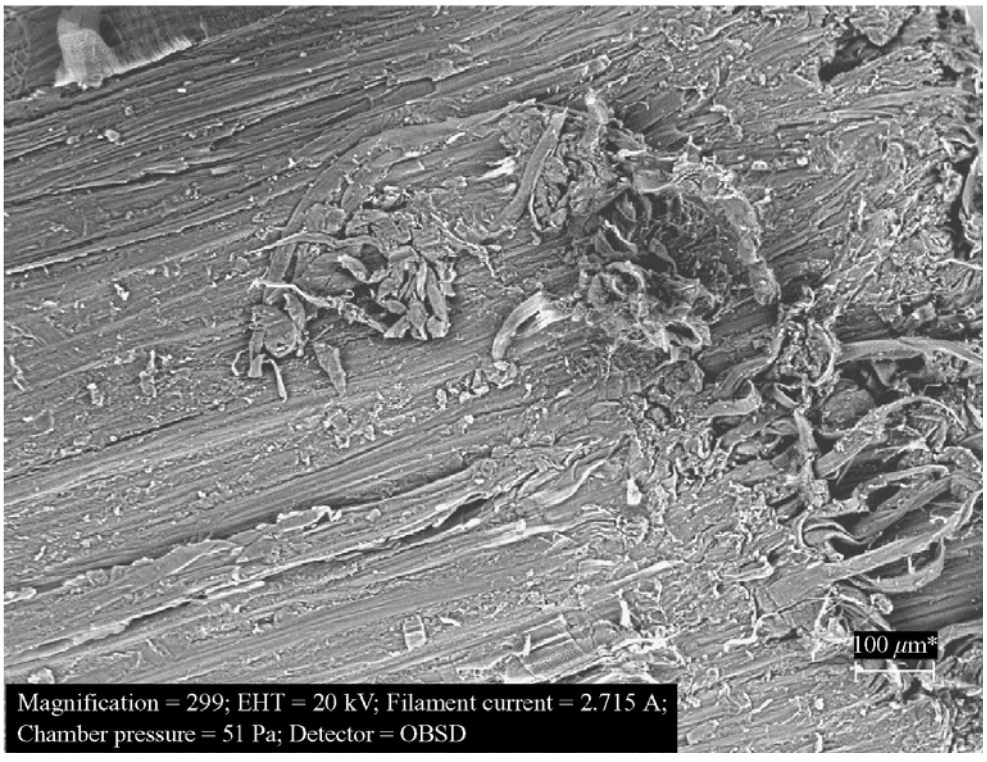
Cela peut s'expliquer par le fait que la dégradation de la paroi cellulaire, due au traitement thermique (Kamdem *et al.* 1999 et 2000), est connue comme étant un facteur responsable de la baisse de la résistance mécanique du bois ainsi que de la baisse de son caractère ductile (Kamdem *et al.* 2000). On sait que le traitement thermique du bois provoque la baisse de la résistance du bois en traction (l'hydrolyse de la cellulose provoque un clivage des microfibrilles) alors que la résistance en compression se trouve augmentée (augmentation de la réticulation de la lignine due aux réactions chimiques se déroulant durant le traitement) (Tjeerdsma *et al.* 1998). Si l'on observe les résultats de la MEB des interfaces soudées (Figure 98 et Figure 99) on peut observer que :

1. Les longues cellules de bois sont seulement partiellement détachées et enchevêtrées, moins que ce qu'il a été observé dans les travaux de Gfeller (2003) sur

du bois non-traité. On remarque aussi peu de matériel amorphe fondu et aggloméré autour des cellules (Figure 98).

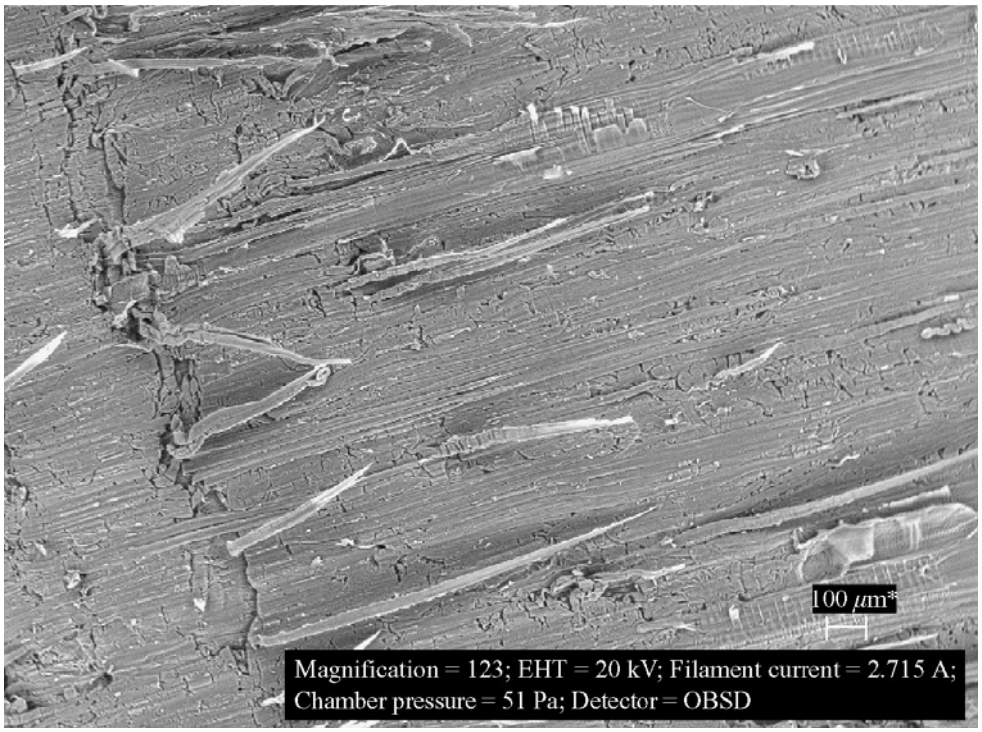


(a)

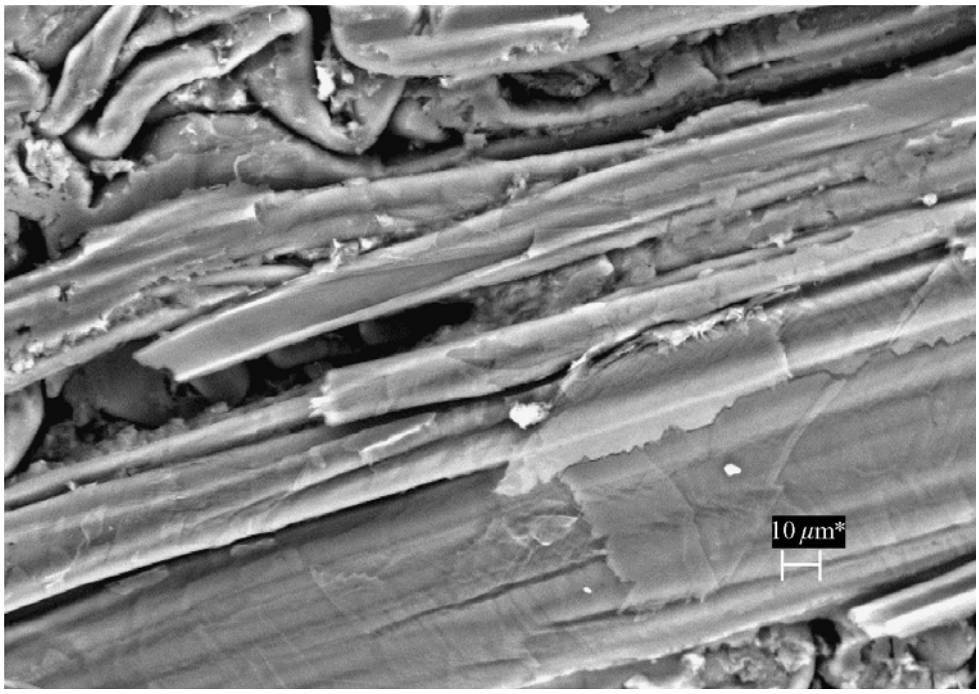


(b)

Figure 98: (a) Microscopie électronique à balayage d'un échantillon de *Populus sp*. traité thermiquement et soudé. (b) Microscopie électronique à balayage d'un échantillon de *Betula alba* traité par hydrothermolyse et soudé.



(a)



(b)

Figure 99: (a) Microscopie électronique à balayage d'un échantillon de *Populus sp*. traité par hydrothermolyse et soudé. (b) Détail à plus fort grossissement de (a).

Cela signifie que le matériau qui en temps normal se ramollit, se trouve en plus faible quantité, voir absent. Cela est la conséquence du traitement thermique qui provoque

la perte de materiel intercellulaire. On aura donc moins d'enchevêtrement et moins de matériel fondu comblant les aspérités et ainsi donc une moins bonne adhésion.

2. Dans la Figure 99, les cellules ne sont pas détachées et enchevêtrées comme on le constate dans un soudage classique. Elles semblent rigides et non affectées par le procédé. On peut supposer que l'augmentation de la rigidité de la paroi cellulaire empêche le détachement et l'enchevêtrement cellulaire.

Des conditions plus fortes pour le soudage (t_s plus long et p_s plus élevée) devraient pouvoir améliorer la qualité du soudage des bois traités thermiquement. Le Tableau 26 montre que des combinaisons avec des conditions plus fortes ont été testées. Les valeurs de l'écart-type montrent que les résultats obtenus varient fortement et en tous les cas plus que pour le soudage de pièces de bois non traitées thermiquement. L'écart important entre les valeurs maximales et minimales semble traduire la grande variabilité au niveau anatomique provoquée par des changements physico-thermiques issus du traitement thermique (Tjeerdsma *et al.* 1998, Nuopponen *et al.* 2004, Kamdem *et al.* 2002 et 1999). On constate cependant que les bois soumis à un traitement complet semblent donner de meilleures résistances mécaniques que les bois qui ont seulement subi une hydrothermolyse (Tableau 26). En observant la Figure 100 et la Figure 101 on remarque que le pic de densification du bois ayant subi une hydrothermolyse est beaucoup plus large que dans le cas d'un traitement complet. La deuxième étape du traitement Plato® Wood est donc nécessaire pour obtenir une bonne résistance mécanique des liaisons soudées. L'augmentation de température brutale et forte que provoque le soudage ne peut donc pas remplacer cette étape essentielle du traitement Plato® Wood. Le fait que l'hydrothermolyse mène à des résultats moins bons que le traitement complet est inattendu. Durant la première étape du traitement (l'hydrothermolyse) des réactions de condensations et des réarrangements ont été observés ainsi que nombreuses hydrolyses des constituants du bois (Tjeerdsma *et al.* 1998, Nuopponen *et al.* 2004, Repellin et Guyonnet 2005, Weiland et Guyonnet 2003, Kamdem *et al.* 1999, 2000 et 2002). L'apparition de telles réactions dans l'étape humide du traitement Plato® Wood implique que leur mécanisme dépend de la présence d'eau sous forme de vapeur. De plus, la vapeur d'eau sous pression et à haute température diminue le point de ramollissement de la plupart des constituants du bois. Il est cependant difficile de savoir si ce ramollissement est dû à l'interaction réduite entre les différents composants ou à la baisse de la cristallinité de la cellulose. Durant la deuxième phase du traitement les réactions de condensation se produisent mais pas les hydrolyses car l'eau est absente (Tjeerdsma *et al.* 1998, Nuopponen *et al.* 2004, Repellin et Guyonnet 2005, Weiland et Guyonnet 2003, Kamdem *et al.* 1999, 2000 et 2002).

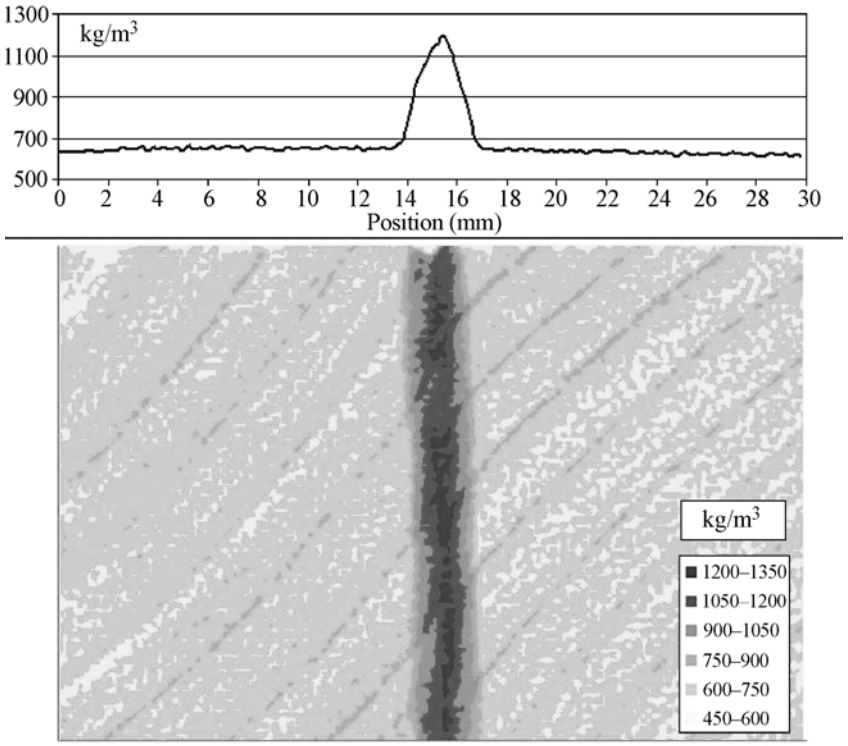


Figure 100: Cartographie de microdensitométrie aux rayons X de l'interface soudée de deux pièces de *Betula alba* ayant subi une hydrothermolyse.

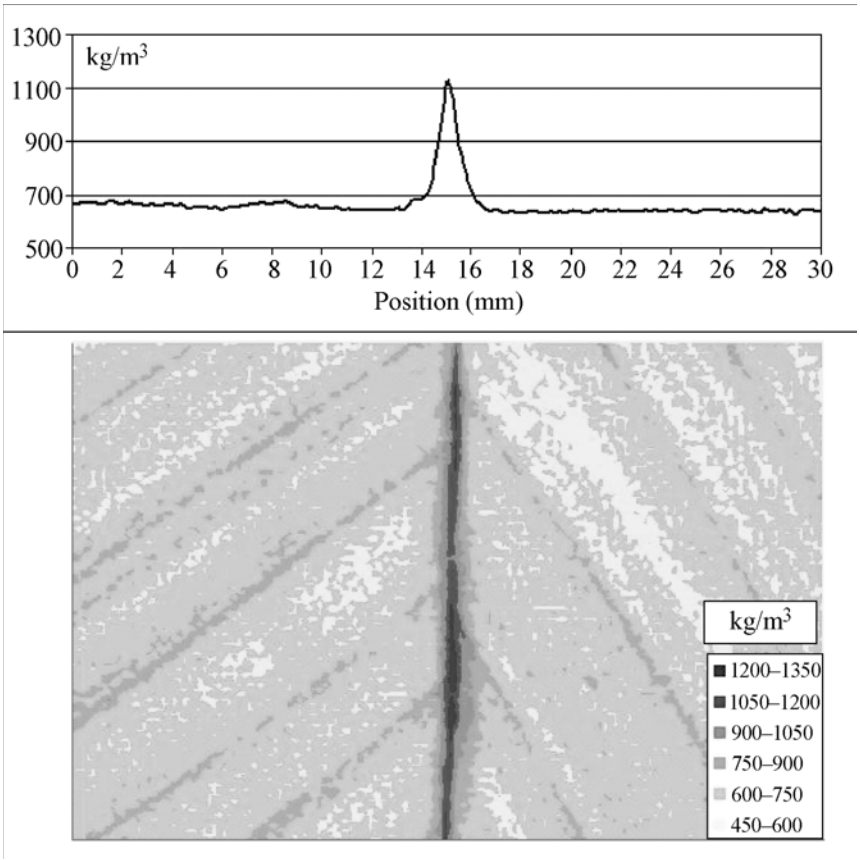


Figure 101: Cartographie de microdensitométrie aux rayons X de l'interface soudée de deux pièces de *Betula alba* ayant subi un traitement thermique complet.

Ainsi les différentes raisons possibles responsable de la différence de résistance mécanique de la liaison soudée entre les bois hydrothermolysés et les bois traités avec Plato® Wood complet :

- Les différences chimiques et physiques comme l'augmentation de la rigidité des parois cellulaires et la perte d'une grande partie du matériau intercellulaire.
- Une différence d'humidité du bois : le bois thermohydrolysé a une humidité de 14-18 % tandis que le bois Plato® Wood a une humidité de 5-7 % avant soudage. Ceci a une influence aussi bien sur les réactions chimiques que sur le processus physique lors du soudage (Gfeller *et al.* 2003).
- La qualité de surface des échantillons hydrothermolysé est moins bonne que celle des bois traités par procédé Plato® Wood complet. Il est difficile d'obtenir une surface lisse du bois thermohydrolyse après le rabotage. En effet les fibres ont tendance à se relever lors de l'usinage. Cela peut donc expliquer la mauvaise soudabilité de ces échantillons (5.5.2).

Les résultats du Tableau 26 montrent qu'il n'existe pas de corrélation directe entre la densité du bois et la résistance mécanique des échantillons soudés. Les différences les plus nettes qui apparaissent sont celles entre l'absence de traitement, l'hydrothermolyse et le traitement Plato® Wood complet.

Il est donc possible de souder des pièces de bois traitées thermiquement par le procédé industriel Plato® Wood bien que les résultats obtenus soit inférieurs à ceux du soudage sur bois non traité thermiquement. Le traitement complet donne de meilleures résistances mécaniques des joints soudés que le traitement par simple hydrothermolyse. Dans le cas de l'hydrothermolyse, le matériel intercellulaire fondu apparaît en très faible quantité et l'enchevêtrement des fibres n'est pratiquement pas existant. Il semble que le traitement thermique provoque la perte de matériel intercellulaire ou sa forte réticulation, le rendant ainsi inaccessible ou empêchant sa fusion nécessaire à l'adhésion lors du soudage du bois. Ceci provoque par conséquent une baisse de la résistance mécanique des joints.

5.5.4.2.Bois traités chimiquement

Le second moyen de réduire l'affinité à l'eau du bois et d'augmenter sa stabilité dimensionelle et sa durabilité est de procéder à un traitement chimique (modification active) ou à une imprégnation (modification passive). La plupart des traitements chimiques sont basés sur la réaction d'un produit chimique avec les groupements hydroxyles des polymères de constitution de la paroi cellulaire. Ceci provoque la formation de liaisons simples ou de réticulations. La nature chimique de la paroi cellulaire en est ainsi changée, offrant la possibilité au matériau d'acquérir de nouvelles propriétés. Des essais de soudage ont été

réalisés sur du bois de *Picea sitchensis* ayant subi différents types de traitement (Tableau 27).

Tableau 27: Types de traitement pré-soudage effectués sur des échantillons de *Picea sitchensis.*

Nom du traitement	Désignation
Pas de traitement	O
Acétylation	A
Traitement thermique New Option Wood	B
Furfurylation	C

L'acétylation permet une substitution des groupements hydroxyles des polymères de la paroi cellulaire par des groupements ester. Ceci provoque une diminution de l'énergie de surface et donc de l'affinité avec l'eau. Le traitement thermique New Option Wood, de façon similaire au traitement Plato® Wood (5.5.4.1), provoque des modifications des composants du bois et en particulier des hémicelluloses, ce qui a pour conséquence la baisse de l'hygroscopie du bois. La furfurylation est une imprégnation du bois avec de l'alcool furfurylique. Grâce à une catalyse (chaleur et acide citrique, acide formique ou chlorure de zinc) l'alcool furfurylique polymérise à l'interieur de la paroi cellulaire. Ce procédé provoque un fort changement de la couleur du bois et une augmentation de la dureté et de l'imperméabilité du bois. Les trois traitements ont été réalisés de façon industrielle. On a aussi utilisé des pièces de *Picea sitchensis* non traitées comme témoins. Des pièces de dimension 20 x 20 x 50 mm ont été préparées pour chacun des types de traitement et soudées par paires afin de former une surface soudée de 20 x 50 mm. Elles ont été soudées selon les paramètres indiqués dans le Tableau 28. Des pièces de dimension 20 x 20 x 50 mm ont été collées par paires avec un adhésif de type PVAc afin d'avoir une référence. Trois différents types de conditionnement ont été réalisés avant le test mécanique. Dans un premier cas (sec) les pièces ont été simplement conditionnées quelques jours à 23°C et 50% d'humidité relative (HR). Dans le deuxième cas (humide) les échantillons ont été immergés dans l'eau à 23°C durant 24 heures et séchés à 23°C et 50% HR durant 24 heures. Enfin dans le troisième cas (humide puis sec) les échantillons ont été immergés dans l'eau à 23°C durant 24 heures, séchés à 103°C durant 24 heures et refroidis à 23°C et 50% HR durant 2 heures. Les pièces ont ensuite été testées par traction perpendiculaire selon les indications du paragraphe 4.3.5.2. Les pièces qui ont rompu avant le test n'ont pas été prises en compte. Pour chaque échantillon on a observé si la rupture était cohésive ou adhésive (Tableau 29).

Tableau 28: Paramètres de soudage selon les différents types de traitement de *Picea sitchensis.* Les remarques sont des observations visuelles effectuées durant le procédé de soudage.

Traitement	t_s (s)	p_s (N/mm^2)	t_mT (s)	p_m (N/mm^2)	Remarque
O	5.8	1.33	10	1.33	
A	3.5	1.33	20	1.33	Un temps de maintien de 20 s évite la délamination du joint.
B	5.7	1.33	10	1.33	
	3.5	1.33	10	1.33	Pas d'adhésion
	3.8	1.33	10	1.33	Pas d'adhésion
	3	1.33	10	1.33	Pas d'adhésion
	2.7	1.33	10	1.33	Pas d'adhésion
C	3.5	1.33	20	1.33	Pas d'adhésion
	3.8	1.33	20	1.33	Pas d'adhésion
	3.3	1.33	20	1.33	Pas d'adhésion
	3.3	1.33	20	1.33	Pas d'adhésion
	3.5	1.33	20	1.33	Pas d'adhésion

De manière générale il a été difficile de trouver de bonnes combinaisons de paramètres permettant d'aboutir à des résultats homogènes. Cela s'explique en partie par la trop petite quantité d'essais qui a été réalisée lors de cette étude. Le bois de *Picea sitchensis* montre aussi de très fortes variations de qualité, notamment de diverses largeur de cernes annuels et de fortes variations de densité entre les échantillons. Ces facteurs ont tendance à causer de fortes différences dans les résultats. Il est cependant possible de déterminer certaines tendances. De nombreuse combinaisons de paramètres ont été testées (Tableau 28) afin d'essayer d'obtenir une adhésion par le soudage des pièces ayant subi une furfurylation: en vain. On peut trouver dans la littérature que, lors de la furfurylation, une réaction de l'alcool furfurylique avec le polymère de la lignine est possible (Hill 2006). D'une part cette polymérisation pourrait stopper le ramollissement de la lignine qui est déterminant lors du soudage du bois (5.3.1). D'autre part, la polymérisation réduisant fortement l'accessiblité des groupements hydroxyles, les réactions d'hydrolyses et de condensations se produisant en temps normal durant le soudage (5.3.2) ne vont plus avoir lieu. Ainsi tous les facteurs permettant l'adhésion des deux pièces de bois seraient inihibés par la furfurylation.

Tableau 29: Résistance à la traction de joints soudés de *Picea sitchensis* selon le type de modification du bois et le type de conditionnement post-soudage. Les échantillons de référence collés avec un adhésif PVAc ont été conditionnés selon le type "sec".

Traitement	Joint	Condition-nement	Nombre de pièces	Résistance moyenne à la traction (N/mm^2)	Ecart-type (N/mm^2)	Rupture	Valeur max (N/mm^2)	Valeur min (N/mm^2)
O	Collé	sec	5	2,39	0,92	cohésive	3,51	1,27
	Soudé	sec	9	0,54	0,19	adhésive	0,85	0,28
	Soudé	humide	4	0,77	1,21	adhésive	2,58	0,06
	Soudé	humide puis sec	1	0,26		adhésive	0,26	0,26
A	Collé	sec	5	1,15	0,34	cohésive	1,55	0,7
	Soudé	sec	10	0,66	0,32	adhésive	1,07	0,2
	Soudé	humide	6	0,23	0,13	adhésive	0,37	0,07
	Soudé	humide puis sec	6	0,28	0,18	adhésive	0,6	0,1
B	Collé	sec	5	1,15	0,44	cohésive	1,57	0,52
	Soudé	sec	10	0,57	0,34	adhésive	1,19	0,23
	Soudé	humide	4	0,09	0,04	adhésive	0,13	0,04
	Soudé	humide puis sec	4	0,17	0,17	adhésive	0,42	0,08
C	Collé	sec	4	1,37	1,37	cohésive	3,36	0,24
	Soudé	sec	-					
	Soudé	humide	-					
	Soudé	humide puis sec	-					

Ceci explique l'impossiblité de souder ensemble deux pièces de bois traités par furfurylation. Les résultats des tests à la traction sont présentés dans le Tableau 29 et la Figure 102. On peut remarquer que pour tous les résultats l'écart-type et la différence entre les valeurs minimales et maximales sont très élévés. En plus des problèmes dus à la géométrie des échantillons expliqués précédemment, on a pu remarquer que l'état de surface des bois acétylés et traités par New Option Wood était plutôt mauvais. Ceci a tendance à rendre la friction moins homogène sur la surface et mène à de grandes différences de résistance mécanique. Dans tout les cas les échantillons collés montrent de meilleurs résultats de résistance à la traction et sont les seuls qui présentent des ruptures cohésives.

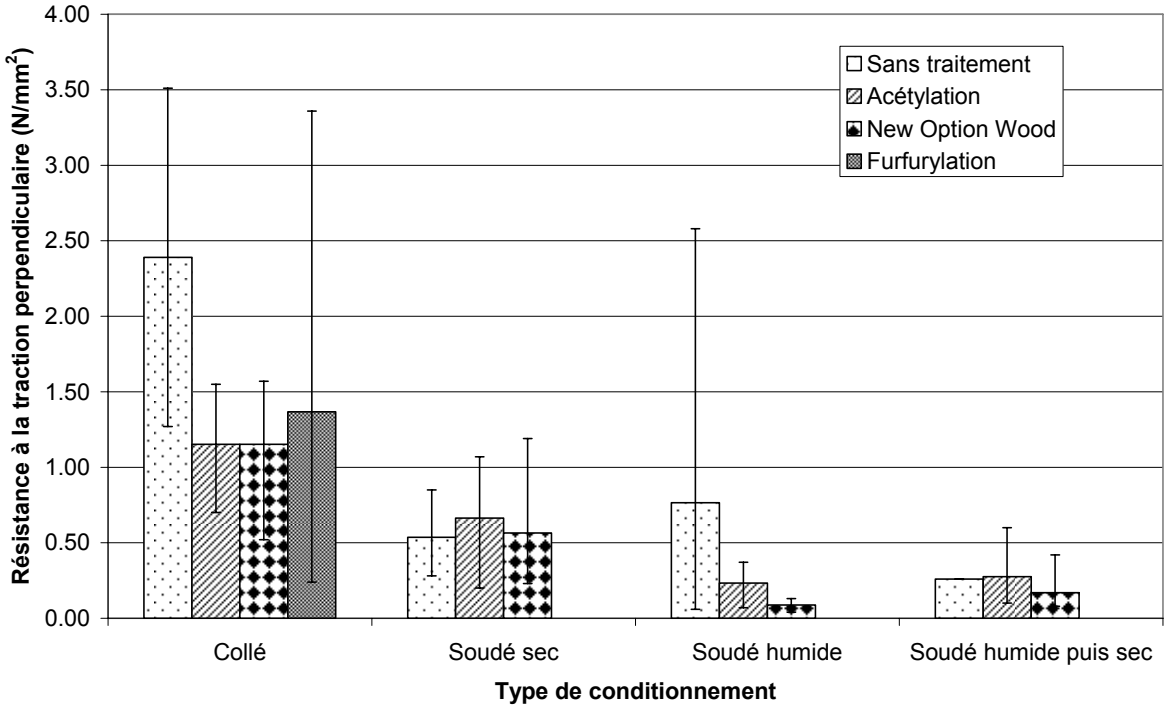


Figure 102: Valeurs moyennes de résistance à la traction des échantilllons de *Picea sitchensis* traités chimiquement. Les indicateurs déterminent pour chaque série la valeur maximale et la valeur minimale.

On peut aussi dire que les conditionnements “humide” et “humide puis sec” provoquent une baisse de résistance du joint. Les résultats concernant le *Picea sitchensis* non traité sont extrêmement variables ce qui rend leur interprétation difficile. Cependant dans le cas de joints collés c’est *Picea sitchensis* non traité qui semble avoir les meilleures performances. Etant donné qu’il s’agit pour toutes les éprouvettes collées de ruptures cohésives, cela traduit une perte de performance de résistance à la traction très marquée des bois traités par acétylation et New Option Wood. La perte de performance des bois furfurylés apparaît être plus faible. Si l’on observe l’effet des différents conditionnements sur les différents types de traitements (O, A et B), on constate que dans tous les cas les résistances sont faibles mais similaires. Le traitement par acétylation semble être celui qui est le moins affecté par les différents conditionnements suivit par le traitement New Option Wood.

Ces tests ont montré des résultats très variables qui semblent être dus principalement à la taille réduite des échantillons et leur quantité réduite. D’autre part *Picea sitchensis* présente une grande hétérogéneité de densité et largeur de cernes ce qui se traduit directement par une hétérogéneité forte des résultats que ce soit pour le collage ou le soudage. La furfurylation accentue visiblement ce problème ce qui n’apparait pas sur les deux autres types de traitement. Bien que les conditions du test fussent particulièrement difficiles il se dégage deux tendances. Le traitement par acétylation, bien que ses performances pour le

soudage soient très basses, semble être favorable à la résistance à l'eau des connections soudées. La furfurylation rend les pièces de *Picea sitchensis* insoudables et appuie l'idée que les caractéristiques du substrat ont une forte influence sur la soudabilité des échantillons.

5.5.5.Etude sur les panneaux dérivés du bois

Les panneaux derivés du bois sont pour le soudage des substrats intéressants à étudier. Ils sont composés d'éléments de bois massif plus ou moins grands. Les contreplaqués (CP) sont fabriqués avec des pièces de bois massif déroulées, les panneaux de grande particules orientés (OSB) avec de grande particules de bois massif, les panneaux de particules (PP) avec des particules de bois massif plus petites et enfin les panneaux de fibres de bois de densité moyenne (MDF) avec des fibres de bois. L'ordre anatomique du bois massif se retrouve complètement, partiellement ou pas du tout dans les produits dérivés bois de type panneaux.

Tableau 30: Paramètres de soudages et résistances en cisaillement des liaisons soudées comparés à la résistance en cisaillement du matériau pour chaque type de panneaux.

Type de panneau	t_s (s)	p_s et p_m (N/mm^2)	Résistance cisaillement soudage (N/mm^2) ± écart-type	Résistance en cisaillement du matériau (N/mm^2)
PP, face	7	1,5	1,81±0,12	0,55
PP, chant	5	1,16	2,80±0,20	3,05
OSB, face	5,5	1,33	2,34±0,83	1,21
OSB, chant	5,5	1,22	3,09±0,56	3,55
MDF, face	10	1,5	3,84±0,89	1,64
MDF, chant	8	1,4	4,29±1,58	5,75
CP Hêtre/Peuplier, face	3	1,33	7,22±1,19	5,41
CP Hêtre/Peuplier, chant	3,5	1,48	6,21±0,82	10,76
CP okoumé, face	3	1,33	2,09±1,17	5,15
CP okoumé, chant	3	1,33	4,36±0,64	6,24

On peut donc penser qu'il peut être possible de souder ces matériaux mais que certaines caractéristiques comme la disposition de leurs éléments (fibres, particules ou placages) peuvent avoir une forte influence sur le soudage. L'étude suivante s'interesse aux 5 types de panneaux dérivés bois CP Okoumé, CP Peuplier/Hêtre, OSB, PP et MDF (caractéristiques décrites en 4.1.1). Pour ces 5 types de panneaux on a préparé des éprouvettes de géométrie standard (4.1.2). Etant donné que les panneaux dérivés du bois, de part leur procédé de fabrication sont anisotropes, trois types de soudage pour tous les panneaux ont été étudiés: face sur face, chant sur chant et enfin chant sur face. Les pièces soudées obtenues ont ensuite été testées en cisaillement (4.3.5.1) et les éprouvettes ont été observées par microscopie optique (4.3.2) et densitométrie aux rayons X (4.3.4). Les résultats des tests sont présentés dans le Tableau 30.

5.5.5.1.Panneaux de particules (PP)

De manière générale le panneau de particules est le matériau qui montre le plus faible écart entre les résultats que se soit pour le soudage sur face ou chant. Dans le cas du soudage sur face, lors des tests en cisaillement, toutes les éprouvettes on rompu à côté de la ligne de soudage, à 1 ou 2 mm du joint (Figure 103).

Figure 103: Mode de rupture du panneau de particules soudé sur face.

Cela signifie que le matériau est plus faible que la ligne de soudage. En effet si l'on observe la valeur de l'essai sur le matériau pur (0,55 MPa) elle est nettement plus faible car elle a eu lieu au milieu du panneau, là où la densité est la plus faible, où il y a le moins de cohésion entre les particules. Ceci apparaît de manière très nette lors de l'observation au microscope à lumière réfléchie des liaisons soudées de PP (Figure 104). La valeur obtenue pour le soudage sur chant est intéressante puisqu'elle représente plus de 90% de la valeur de

résistance du matériau en lui-même. Le soudage du panneau de particules est donc bien adapté comme type d'assemblage pour ces deux directions.

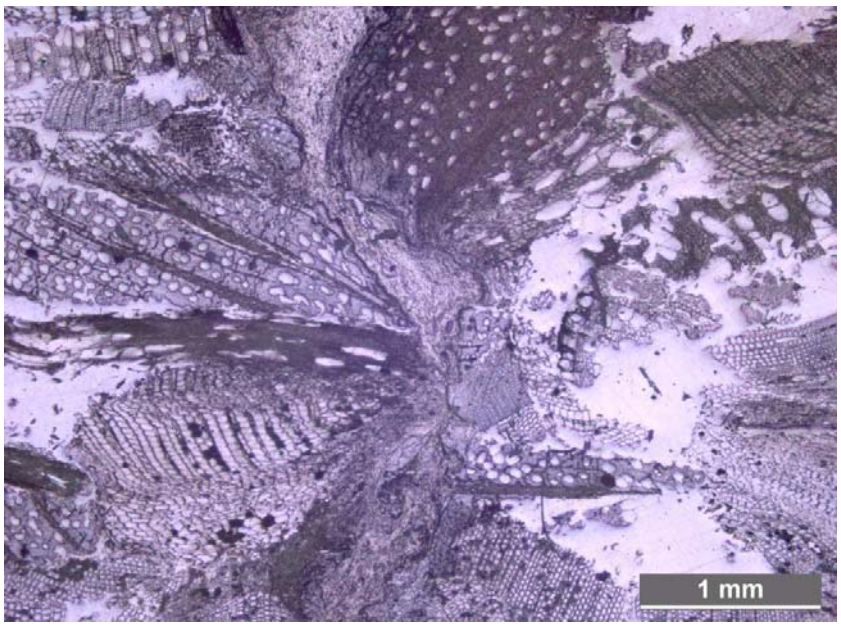


Figure 104: Observation microscopique de la ligne de soudage sur une éprouvette de PP soudée sur le chant. Les zones vides entre les particules du panneau apparaissent en clair. La ligne de soudage (traversant l'image de haut en bas) semble coller les particules entre elles.

5.5.5.2.OSB

L'OSB, grâce à la grande taille de ses particules a, de manière générale, de meilleures propriétés mécaniques que le panneau de particules. Ceci explique pourquoi les valeurs de résistance au cisaillement sont meilleures. Le soudage sur face, qui donne des résultats meilleurs que la valeur du matériau lui-même montre cependant une assez grande variation des résultats. En effet, étant donnée la grande largeur des particules par rapport à la taille des échantillons il en découle grande variation de la qualité du matériau au niveau de la surface. Les coefficients de friction sont très différents les uns des autres et il est difficile d'obtenir une valeur suffisamment constante. Sur chant la valeur obtenue est intéressante puisqu'elle représente environ 90% de la valeur de résistance du matériau en lui-même. On peut donc bien souder l'OSB dans cette direction.

5.5.5.3.MDF

Le MDF est un matériau assez difficile à souder. Cela doit s'expliquer par le fait que ses caractéristiques sont celles qui sont les plus éloignées du bois massif et que sa densité est très élevée. L'optimisation des paramètres pour le soudage sur face a demandé beaucoup d'éprouvettes et finalement peu d'éprouvettes on pu être testées. Le soudage sur face demande un temps de vibration assez long (10 s) pour arriver à un coefficient de friction suffisant pour la fusion. Cela est dû à la densité très élevée des surfaces de ce panneau. Les

résultats traduisent une résistance plus élevée que celle de la partie centrale du panneau. Sur le chant le soudage est assez bon (environ 75% du matériau lui-même) mais présente de grandes variations (Figure 105). La modification qu'ont subi les fibres lors de la fabrication du panneau peut avoir un effet négatif sur la résistance de cet assemblage, d'autre part on ignore encore l'effet de l'adhésif contenu dans le panneau qui pourrait aussi entraîner, lors de sa dégradation thermique, une moins bonne adhésion.

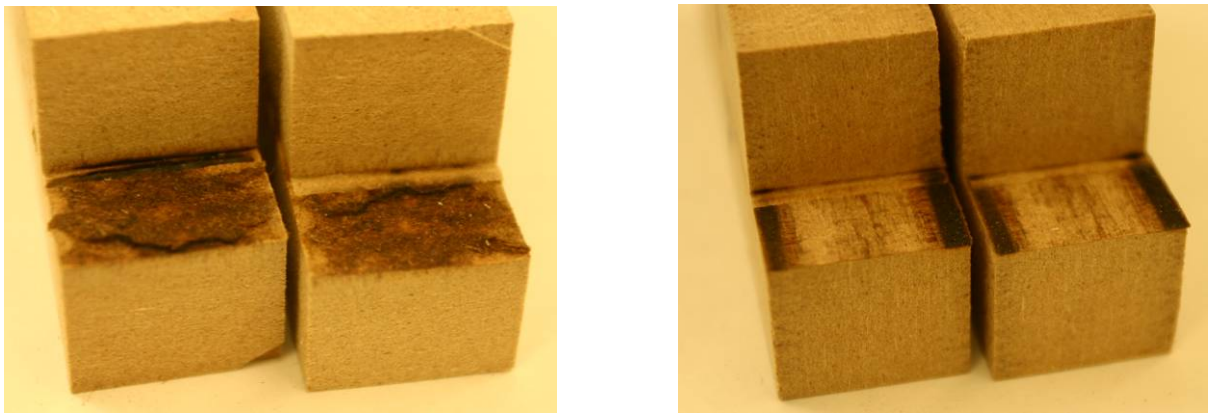


Figure 105: Tests de cisaillement sur panneau de MDF (à gauche soudé sur face, à droite soudé sur chant).

5.5.5.4.Contreplaqué Hêtre/Peuplier

Sur face, le contreplaqué montre des résultats de résistances mécaniques tout à fait logiques par rapport aux résultats d'autres études. En effet la résistance en cisaillement des liaisons soudées de *Fagus sylvatica* est de 8,5 MPa en moyenne pour des orientations de fil de 45° à 90° (5.3.1). Or on sait d'après des études sur l'Erable que l'orientation du fil à 0° donne des résultats beaucoup moins élevés que pour les deux autres orientations 5.5.1). Dans le contreplaqué utilisé, les plis de Hêtre sont orientés à 0°, il est donc normal de trouver une valeur inférieure à 8,5 MPa. Elle est plus élevée que la valeur de résistance du matériau lui-même ce qui nous montre que ce type d'assemblage est efficace. Sur chant les valeurs sont un peu plus faibles, en effet les plis de Hêtre sont orientés dans la bonne direction mais les plis de Peuplier eux, sont orientés en bois de bout lors du soudage. La moitié de la surface ne présente donc pas un soudage optimal à cause de l'orientation du fil en bois de bout. Une observation au microscope en lumière réfléchie d'un échantillon soudé de CP Hêtre/Peuplier montre l'état de la ligne de soudage côté Peuplier et côté Hêtre (Figure 106). La ligne de soudage est plus large et moins régulière dans le pli de peuplier, elle présente notamment des fissures. Ces caractéristiques sont typiques d'une mauvaise liaison soudée. Cependant la valeur obtenue est l'une des meilleures pour toute la série de panneaux.

Figure 106: Observation microscopique de la ligne de soudage sur une éprouvette de CP Hêtre/Peuplier soudée sur le chant. La moité supérieure de l'image correspond à un pli de Peuplier, la moitié inférieure à un pli de Hêtre. La ligne de soudage traverse l'image au centre de haut en bas.

La valeur élevée obtenue pour le test sur le matériau propre et due à la forte résistance au cisaillement des fibres de peuplier qui sont orientées perpendiculairement à l'effort (Figure 107). Dans le cas du soudage ces fibres ne se prolongent plus de part et d'autre de la liaison ce qui explique la grande différence entre ces 2 valeurs.

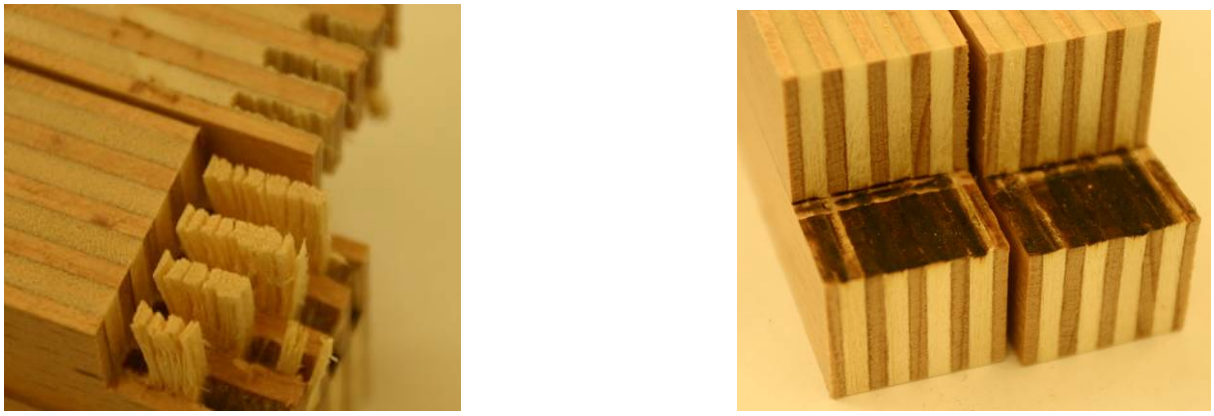


Figure 107: Test de cisaillement sur le contreplaqué non soudé (à droite) et soudé (à gauche) sur chant.

5.5.5.5.Contreplaqué Okoumé

L'Okoumé est une essence exotique qui n'avait, jusqu'à présent, jamais été testée pour le soudage du bois massif. D'après les résultats obtenus, le soudage sur face (orientation tangentielle de l'Okoumé) de ce panneau est moins bon que le soudage sur chant (partiellement orientation en bois de bout de l'Okoumé). En effet que ce soit pour le

cisaillement de la ligne de soudage ou le cisaillement du matériau en lui-même, les valeurs sur chant sont meilleures que les valeurs sur face. Le soudage sur chant présente une surface de bois de bout plus grande que la surface de bois orienté tangentiellement. Si l'on observe ces joints au microscope en lumière réfléchie (Figure 108) on s'aperçoit que si le bois est orienté de façon tangentielle par rapport au soudage (soudage sur face), la ligne de soudage apparaît extrêmement fine et à certains endroits invisible. L'ensemble du matériau fondu est directement « poussé » dans la lumière des larges vaisseaux de l'Okoumé. Dans le soudage sur chant la moitié des plis est soudée en bois de bout. Sur les microscopies (Figure 108) on voit que la largeur de la ligne de soudage est normale et régulière. D'autre part, le matériau fondu est ici aussi distribué dans la lumière des vaisseaux mais ceci représente une surface poreuse moins importante qu'en orientation tangentielle. Moins de matériel adhérent est donc perdu dans la lumière des vaisseaux.

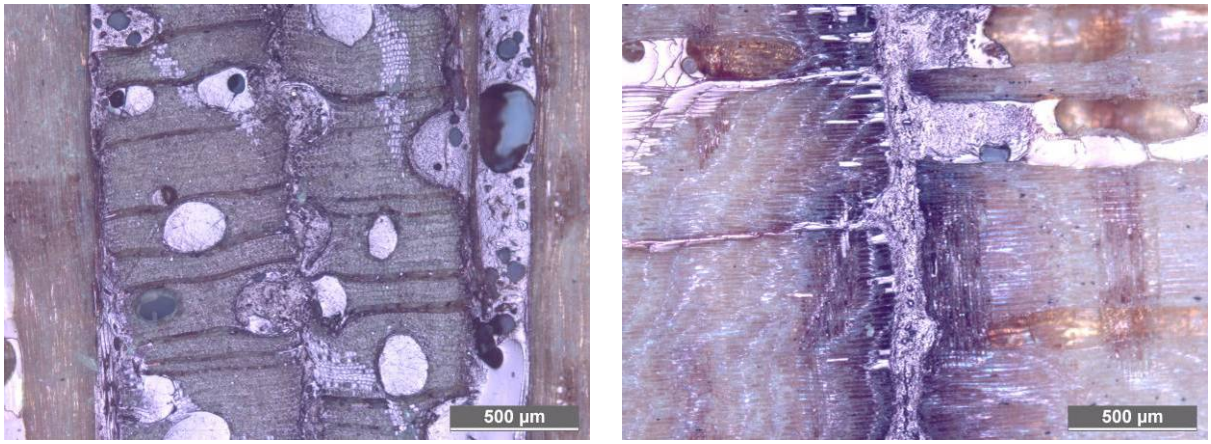
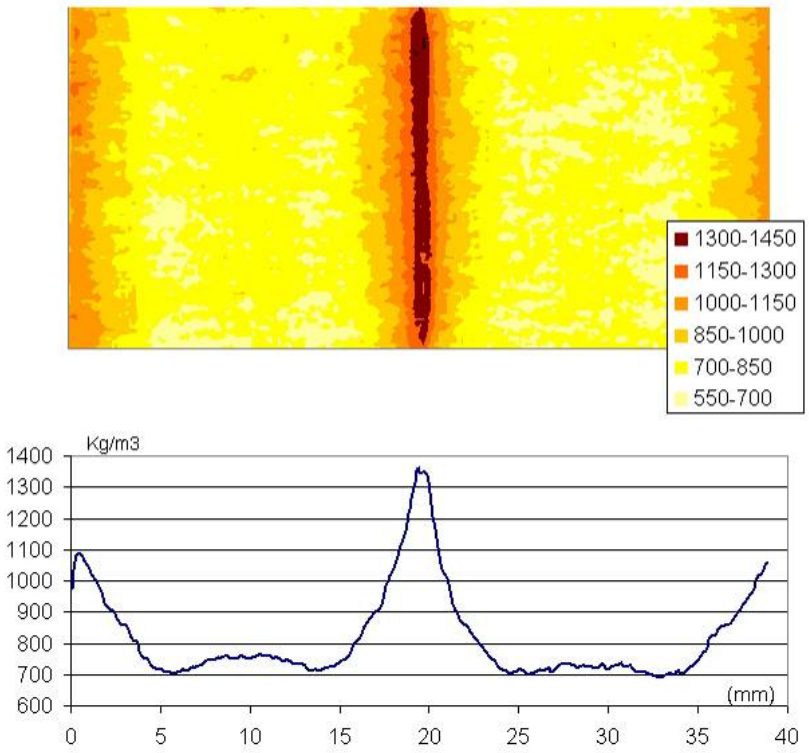


Figure 108: Observation microscopique de joints soudés de CP Okoumé sur face (à gauche) et sur chant (à droite).

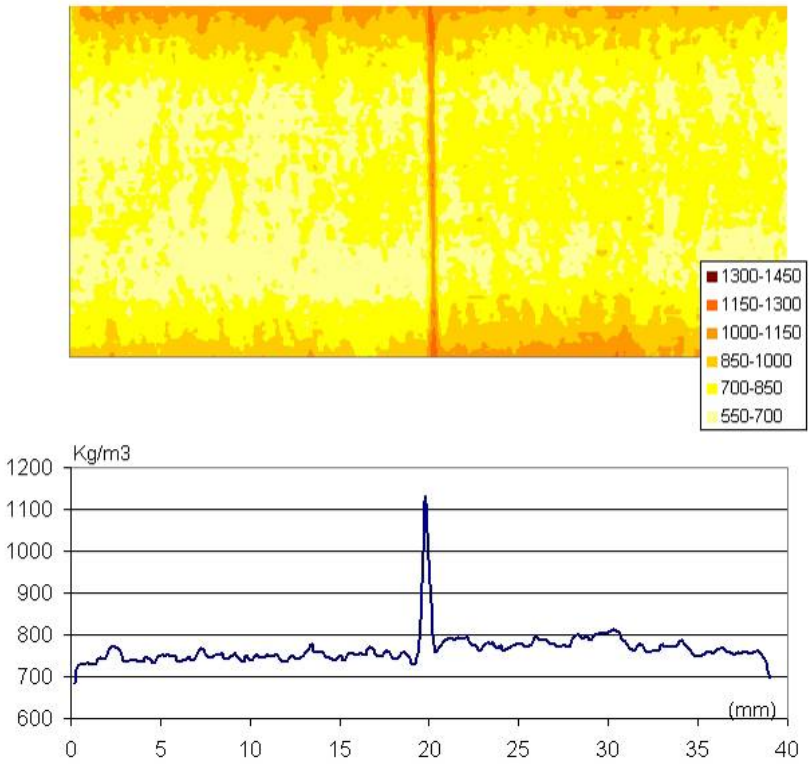
Ceci pourrait expliquer la meilleure adhésion des pièces soudées sur chant. Les valeurs obtenues pour le soudage sur chant sont très encourageantes car assez stables. La différence entre les valeurs de cisaillement sur chant de la ligne de soudage et du matériau lui-même est due ici aussi à la forte résistance en cisaillement du matériau perpendiculairement aux fibres.

5.5.5.6.Densitométrie à rayons X

La densitométrie aux rayons X des joints soudés montre aussi quelques résultats intéressants et explique les tendances observées précédemment. Dans le cas des types de panneaux PP, OSB ou MDF (le cas du MDF est présenté sur la Figure 109), la ligne de soudage apparait nettement.



(a)



(b)

Figure 109: Carte de microdensitométrie aux rayons X de deux joints de soudage de MDF l'un sur chant (a) et l'autre sur face (b). Le graphique correspondant donne les valeurs de densités des échantillons.

Dans le cas de soudage sur chant des PP et OSB elle est plus fine et la densification est élevée. A l'opposé, dans le cas du soudage sur face, la ligne de soudage est plus large avec une augmentation de la densité plus graduelle. Seul le MDF présente une valeur de densification plus élevée sur face que sur chant. Cette inversion de tendance de la valeur maximale de densification de la ligne de soudage du MDF peut-être due aux conditions extrêmes subies par ce type de panneau en conséquence de sa densité élevée. Le soudage sur chant des CP montre un pic de densification plus fin et plus élevé que les autres types de panneaux. Dans le cas du soudage sur face du CP la densité atteinte est comparable à la densité des joint de colle (entre chaque pli) pour le CP Hêtre/Peuplier mais elle plus faible que la colle dans le cas de l'Okoumé.

De manière générale le soudage des panneaux composite bois se présente comme une bonne possibilité d'application de cette technologie avec des résultats de résistance intéressants en particulier pour les soudages sur chant. En général la résistance au cisaillement atteinte par les joints de soudage en soudage sur chant et très faiblement inférieure à la résistance en cisaillement du matériau lui-même. Le MDF est le composite qui est le plus difficile à souder et ceci à cause de sa densité élevée ainsi que ses caractéristiques mécaniques et anatomiques éloignées du bois massif. Les lignes de soudage obtenues sont fines, discrètes et régulières. L'influence de la présence d'adhésif durci dans les panneaux sur le soudage n'a pas été étudiée. Il se peut que l'adhésif puisse, par l'action du soudage, à nouveau réagir et renforcer le joint soudé. Cependant les temps de soudage étant extrêmement courts on peut s'attendre à ce que cet effet soit faible voir inexistant.

5.5.6.Conclusions sur l'influence du substrat à souder

Le bois est considéré comme étant un matériau avec de fortes variabilités de ses propriétés physiques et chimiques. L'adhésion de deux pièces de bois induite par le soudage par friction linéaire nécessite la modification thermique et chimique du matériel cellulaire. Par conséquent les variations de propriétés du substrat se répercutent sur la soudabilité et les performances des liaisons soudées. Le chapitre 5.5 a permis de mettre en évidence l'effet du substrat sur le soudage par les points suivants :

- L'orientation anatomique du plan de soudage a une grande influence sur la résistance mécanique du joint. Une mauvaise orientation peut provoquer une baisse des performances en cisaillement de 30% du joint. Dans le cas de *Fagus sylvatica* L. l'orientation tangentielle du plan de soudage s'est avérée défavorable alors que

l'orientation à 45° des cernes d'accroissement naturel par rapport au plan de soudage fournit les meilleures performances. Le soudage en bois de bout est possible mais reste problématique pour les même raisons que le collage en bois de bout est difficile.

- Afin de garantir un bon soudage les plans des éprouvettes à souder doivent être parfaitement parallèles les unes aux autres. Le ponçage des pièces peut provoquer des défauts de planiéité et ainsi conduire à une baisse de la résistance mécanique. D'autre part il provoque une surchauffe de la surface des échantillons ne fournissant plus un matériel ligneux « frais » pour le soudage. L'état de surface de type raboté a fourni les meilleures performances.
- La soudabilité de nombreuses essences a été étudiée. Il apparaît nettement que les paramètres de soudage doivent être réadaptés pour chaque essence. La résistance mécanique obtenue est très variable d'une essence à l'autre. Les dispersions des résultats observés sont aussi élevées. De manière générale les essences de feuillus de densité élevée montrent une soudabilité meilleure que celles de faible densité. Les essences de résineux, comme les essences de feuillus légers, sont moins faciles à souder.
- La modification du bois, qu'elle soit thermique ou chimique a tendance à baisser la capacité de soudabilité. D'une part la modification, particulièrement la modification thermique, a tendance à provoquer une baisse de la qualité de la surface du bois provoquant ainsi des inhomogénéités de soudage. D'autre part elle réduit soit la quantité (bois traités thermiquement) soit l'accessiblité (bois traités chimiquement) du matériel inter-cellulaire. Celui-ci ne peut donc plus se ramollir en quantité suffisante afin d'offrir une bonne adhésion aux pièces soudées.
- Les résultats concernant le soudage des panneaux dérivés du bois ouvrent de nouvelles perspectives pour l'utilisation de cette technologie. Il a été possible de souder des panneaux de contreplaqués, de particules, d'OSB et de MDF sur la face et le chant. Le panneau de particules a montré une bonne soudabilité aussi bien sur chant que sur face. Pour les autres types de panneaux, les résultats les plus intéressants concernent le soudage sur chant. Le MDF reste un panneau difficle à souder quelque soit sont orientation, ceci est dû notamment à sa structure microscopique très éloignée de celle du bois massif. L'influence de l'adhésif contenu dans les panneaux sur le soudage est encore inconnue.

5.6. Développements technologiques (partie confidentielle)

6.Conclusions générales et perspectives

L'objectif de ce travail de thèse a été d'apporter des informations fondamentales sur soudage par vibration linéaire du bois. Il s'est appuyé sur des premiers travaux réalisés en 2003 et 2004 par les équipes de recherche de la HESB, de l'INRA et de l'ENSTIB et qui consistaient en des études préliminaires sur cette nouvelle technique d'assemblage du bois. Les principaux objectifs étaient d'acquérir des connaissances fondamentales concernant les processus d'adhésions permettant un assemblage efficace des deux pièces de bois et de définir les caractéristiques physiques, chimiques et mécaniques des assemblages soudés. Ces connaissances ont demandé le développement de méthodes d'observation et d'analyses spécifiques. Ces résultats ont pour but de pouvoir définir les capacités techniques et économiques de ce type d'assemblage dans le cadre d'une mise en œuvre industrielle.

Dans une première partie les caractéristiques physiques et chimiques des liaisons soudées, pendant et après le procédé ont été observées. Pour cela des mesures de température par thermographie infrarouge, des observations macroscopiques et microscopiques, des tests mécaniques de la liaison et des observations sur la perte de matière et la formation des fumées ont été réalisées.

- Une méthode de mesure de la température de surface durant le soudage en utilisant la thermographie infrarouge a été développée. Cette méthode sans contact non destructive s'est avérée souple, précise et satisfaisante pour les observations qui avaient été planifiées. Elle a permis d'apporter des informations fondamentales concernant la température de soudage et les gradients thermiques lors du processus. Pour des pièces présentant une bonne adhésion on a observé une température moyenne de la ligne de soudage de 220°C à la fin de la période de vibration. Des mesures de la température à l'intérieur des éprouvettes par une méthode destructive, effectuée aussi grâce à la TIR a donné la même valeur de température moyenne à la fin de la période de vibration. Ces mesures ont révélé que l'évolution de la température suit une forme sigmoïde au cours du temps. La thermographie a pu être validée comme une méthode effective du contrôle de la température du soudage. Elle permet notamment de détecter des défauts de soudage.
- L'observation par microscopie optique en lumière réfléchie a montré l'existence d'un gradient de déformations anatomiques de l'interface vers les régions éloignées de la zone de friction. Trois zones principales ont été définies : la MZ où le matériau est entièrement fondu et l'anatomie peu ou pas reconnaissable, la FDR où l'anatomie semble plastiquement déformée et la PDR où des déformations secondaires sont observables. L'ensemble a été appellé HAZ. L'épaisseur de ces différentes zones a

été mesurée et on a constaté qu'elle varie selon l'orientation anatomique du plan de soudage. La HAZ peut varier de 0,5 mm à 2,0 mm dans le cas analysé. La FDR a une épaisseur relativement stable vis-à-vis des autres zones quelque soit le cas de figure observé.

- Des tests mécaniques ont permis d'observer le comportement à la rupture des joints soudés. Pour expliquer la fragilité parfois observée des liaisons soudées, des mesures du taux de restitution d'énergie du couple de pièces soudées ont été réalisées. On a utilisé la méthode de la complaisance expérimentale sur des pièces de *Fagus sylvatica* soudées. La valeur mesurée de G_{Ic} est de 106 J/m^2, ce qui est bas vis-à-vis des joints collés avec les adhésifs classiques. La propagation de la rupture est assez instable et montre que le joint a un comportement à tendance fragile. Tous les joints montrent des ruptures cohésives avec, souvent, la présence de petits amas de fibres arrachés. Cependant ces amas sont très épars et ne peuvent être considérés comme des cas de rupture adhésive. La performance des résistances des liaisons soudées vis-à-vis d'une immersion dans l'eau est très faible. Une immersion des pièces soudées pendant trois heures provoque une perte de résistance de 98% de la résistance initiale. Ces observations mécaniques ont donc révélé que les liaisons soudées ont un comportement très éloigné des liaisons collées et qu'elles demandent des études supplémentaires afin d'augmenter leur performances vis-à-vis des différentes contraintes environnementales.

- La perte de matière et la formation de gaz sont des phénomènes macroscopiques importants lors du soudage. Un calcul de bilan de matières a montré que le volume de gaz formé est d'environ 150 L/m^2. L'analyse de ces gaz par GC-MS n'a malheureusement pas été suffisamment approfondie pour donner des informations sur la composition en gaz de très faible poids moléculaire. Elle a cependant révélé l'existence de substances aromatiques essentiellement issues de la décomposition thermique de la lignine (vanilline, eugénol et isoeugénol) et une petite quantité d'alcool furfurylique. Les paramètres des cycles de soudage ont une influence fondamentale sur la quantité de matière perdue sous forme solide, liquide ou gazeuse. Il est nécessaire de trouver les paramètres justes et suffisants pour ne pas avoir une perte de matière démesurée.

Les méthodes mises en place dans la première partie ont été utilisées dans la deuxième partie, pour observer la formation et l'évolution de la microstructure interfaciale. Il s'agit là de résultats fondamentaux qui expliquent les différentes adhésions ayant lieu lors du soudage. Dans cette deuxième partie, grâce aux résultats précédents on a pu bâtir un scénario

physico-chimique se déroulant à l'interface, le vérifier, notamment par des analyses chimiques, et enfin faire une ébauche de sa simulation par une méthode numérique.

- Des mesures de la température moyenne de la ligne de soudage pour des éprouvettes identiques ont été effectuées. On a bloqué tous les paramètres machines sauf le temps de soudage que l'on a fait varier de 0,5 s à 11 s par pas de 0,5 s. Les séries d'éprouvettes ont ensuite été testées mécaniquement, on a mesuré l'épaisseur de leurs différentes zones anatomiques et la profondeur de la densification du bois. En suivant l'évolution de la courbe de température le scénario suivant a été élaboré. Dans une première phase, qui correspond à un état instationnaire, le bois frictionné commence à s'échauffer. Il se produit alors un ramollissement des polymères du bois notamment des hémicelluloses et de la lignine accompagné d'une évaporation d'eau. L'évaporation de l'eau se fait ensuite de façon plus importante, provoquant des hydrolyses des hémicelluloses et de la cellulose amorphe. Le mouvement mécanique, la forte quantité de vapeur d'eau et l'acidification de l'interface favorisent alors des réactions de condensations des produits issus des l'hydrolyses. On entre alors dans une phase quasi-stationnaire où les réactions d'hydrolyses et de condensation ont lieu en tout point de l'interface. C'est dans cette phase que des liaisons covalentes peuvent se créer et apporter une adhésion chimique au joint de bois soudé. Mais la température a tendance à augmenter encore faiblement, conditionnant ainsi une troisièreme phase où l'hydrolyse de la lignine puis de la cellulose peuvent se produirent. Cette phase, qui ressemble à une pyrolyse accélérée, provoque l'apparition de charbon de bois et la perte du réseau de fibres enchevêtrées. Les meilleurs résultats de résistances mécaniques ont été obtenus pour des pièces dont le temps de soudage était situé dans la deuxième phase : la phase quasi-stationnaire. Ceci implique que l'énergie à apporter à la friction a une valeur minimale mais aussi une valeur maximale.
- Les analyses FT-IR et CP-MAS ^{13}C RMN ont montré que l'essentiel des réactions chimiques se produit dans les 5 premières secondes, ce qui correspond au début de la phase quasi-stationnaire. Dans cette phase d'importantes décarboxylations des hémicelluloses et de la cellulose amorphe ont lieu. Cependant une grande proportion de groupements carbonyles reste disponible à l'interface, protégée, semble-t-il, par le polymère de lignine fondu. Dans cette phase il se produit aussi une apparition progressive de groupement hydroxyles phénoliques issus de la dégradation de la lignine. Des polycondensations et des réticulations de la lignine ont lieu aussi à cette phase. L'ensemble de ces réactions stoppe à 6 s de soudage, ce qui correspond environ à la fin de la phase quasi-stationnaire. L'apparition de liaisons C-O-C et d'eau liée provoque des réticulations supplémentaires de la lignine avec les molécules de

cellulose rétricissant ainsi le réseau de lignine et favorisant des micro-cracs et ainsi la fragilisation du matériau. On se trouve alors à la fin de la période quasi-stationnaire. Ces résultats confirment une grande partie des hypothèses élaborées précédemment.

- En s'appuyant sur les constatations précédentes et les mesures de température une simulation numérique, qui peut-être considérée comme un premier pas vers la modélisation du procédé, a été élaborée. Il s'agit d'un calcul uniquement thermique qui possède encore quelques imprécisions. Mais il permet de dégager d'importantes tendances. Le procédé est tellement court et le matériau tellement isolant qu'il n'existe pas d'effet de bords notable même pour des pièces larges. Les réactions chimiques endothermiques et exothermiques influencent l'évolution de la température à l'interface, ce qui prouve que son évolution n'est pas uniquement due à la friction mécanique.

La troisième partie de la discussion s'est orientée sur l'analyse de l'influence du substrat sur les caractéristiques du soudage définies dans les travaux précédents. On a observé l'influence de l'orientation anatomique du bois, de la qualité de la surface, de l'essence de bois, des traitements thermiques et chimiques du bois. Enfin des essais sur les panneaux dérivés du bois ont été menés.

- Le substrat a une forte influence sur la qualité du soudage, notamment par ses propriétés de surface qui définissent les forces de frictions de l'interface au moment du soudage. Plus le matériau aura une densité hétérogène (par exemple forte différence de densité entre bois de printemps et bois d'été), plus le soudage sera hétérogène. L'orientation tangentielle dans le cas du bois massif est défavorable au soudage, en effet la direction des rayons ligneux parallèle aux forces de pression semble provoquer une friction trop forte et un mauvais enchevêtrement des fibres. Le soudage en bois de bout est possible mais plus difficile qu'en bois de fil. La qualité de la surface la plus favorable au soudage est celle obtenue après rabotage. Enfin l'essence est le facteur qui a le plus d'influence sur le soudage. Plus l'essence a une densité faible et plus son soudage est difficile. Dans les essences de feuillus denses, les bois à grain fin et à pores diffus présentent de meilleures performances que les bois à zone initiale poreuse.

- Le traitement thermique ou chimique du bois est assez défavorable au soudage. Les performances obtenues sont plus basses que pour les bois non traités. Cela s'explique par la faible disponibilité du matériel inter-cellulaire soit perdu lors du traitement thermique soit dont l'accessibilité est bloquée par un traitement chimique. Certains traitements chimiques, comme la furfurylation, montrent même une absence

totale d'adhésion lors du soudage. Cependant ces traitements peuvent être de bonnes solutions en ce qui concerne l'amélioration de la résistance à l'eau des liaisons soudées.

- Les panneaux dérivés du bois sont des matériaux assez faciles à souder montrant même parfois de très bonnes performances d'adhésion. Ces essais ont ouvert des perspectives intéressantes pour l'utilisation cette technologie d'assemblage.

Enfin les résultats de ces différentes études ont permis d'avancer vers les premiers développements technologiques permettant de futures applications de la technologie de soudage par vibration linéaire du bois. Ces essais ont été très importants car ils ont pu révéler de nouveaux aspects techniques et soulever de nouveaux problèmes qui n'etaient jusqu'alors pas apparus.

- Une méthodologie d'optimisation a été développée permettant d'obtenir rapidement, grâce à des observations visiuelles et à la TIR, des joints de bonne qualité. Cependant cette méthodologie a révélé la très haute importance des paramètres de soudages notamment la pression de soudage. On connaît encore trop peu l'influence de certain paramètres de soudage tels que la fréquence, l'amplitude et la friction de soudage, ce qui rend l'optimisation difficile.

- Des essais d'amélioration de la résistance à l'eau ont révélé qu'il s'agit d'un critère de résistance mécanique très difficile à remplir. Deux voies ont été explorées : celle du blocage des variations dimensionnelles du bois, notamment en utilisant des essences dont le retrait volumique est faible et celle de l'introduction d'élastifiant naturels dans la ligne de soudage. Il reste là encore de nombreux essais et travaux à réaliser afin de mieux comprendre quels sont les phénomènes qui sont responsables de la rupture et de sa propagation et en quelles proportions ils agissent.

- Des essais sur le soudage en entures multiples ont été réalisés et ont montré que le soudage nécessite une adaptation géométrique du profil utilisé. Ces résultats ouvrent une nouvelle voie d'utilisation de la technologie notamment pour faciliter les soudages en bois de bout.

- Enfin ces travaux ont pu mettre en œuvre le concept de « lamellé-soudé » notamment sur de grandes dimensions. Des panneaux soudés de 15 lamelles de *Populus sp.* de longueur 1,65 m ont été conçus pour être utilisés dans la fabrication de snowboards. Une étude économique de ce cas a révélé que le soudage permettait de produire des pièces de lamellé-soudés à plus bas prix que pour une production de lamellé-collés. Cependant le soudage de grandes longueurs a révélé de nouveaux problèmes et en premier lieu des problèmes techniques liés aux modes de fixations

des pièces à souder, à la capacité des machines et à l'intégration de la technologie dans une ligne de production. Mais des problèmes technologiques sont aussi apparus, notamment liés aux irrégularités du bois, à sa déformation due au séchage, à sa qualité de surface et son humidité. Les surfaces soudées étant plus grandes, le volume de fumées produites l'est aussi engendrant des conditions de travail désagréables et nécessitant un système de filtrage. Enfin la question de l'influence de la largeur des pièces sur la qualité du joint soudé reste ouverte.

Ce travail a donc permis de répondre aux questions de la problèmatique scientifique ouverte par la découverte du soudage du bois par vibration linéaire. Mais au fur et à mesure de l'avancement du travail, de nouvelles problématiques sont apparues ouvrant de nouvelles perspectives scientifiques. La difficulté principale dans cette technologie est que, bien que sa mise en œuvre soit assez simple et rapide, les phénomènes permettant l'adhésion sont très complexes et leur compréhension requiert des connaissances fondamentales. Les essais se sont donc orientés dans de nombreux domaines scientifiques et ont révélé à chaque fois de nouvelles questions.

- Les ébauches de calcul énergétiques présentées doivent être poursuivies, notamment en ajoutant aux énergies générées par la friction, celles des énergies positives ou négatives des réactions chimiques impliquées dans le soudage. Ceci nécessite des mesures calorimétriques des matériaux contenus à l'interface à différents moments du soudage.
- Connaissant ces données énergétiques, la modélisation numérique pourra être complétée. Les aspects des énergies de réaction et de la chaleur générée par la friction n'on pas été introduits dans le modèle. Les mouvements mécaniques de frictions, les différents types de flux ainsi que les problèmes de changement de viscosités peuvent aussi être combinés et simulés. Des mesures des forces de friction et de la viscosité du matériau lors du soudage permettraient de complèter ce travail de modélisation. Cela implique le développement d'un appareillage muni de divers capteurs et la réalisation de nombreuses séries d'essais.
- Il ne semble pas que pas toutes les essences de bois soient utilisables dans le cadre du soudage par friction linéaire. Les essences les plus étudiées ont été les essences locales. La tendance est la suivante : plus l'essence est dense, son anatomie homogène et son grain fin, plus le soudage est performant. Dans des travaux futurs il sera intéressant d'observer le comportement au soudage d'essences exotiques denses, qui sont dimensionnellement stables et ont une anatomie homogène. Cela

permettra aussi de définir quel est le schéma d'anatomie engendrant une friction idéale pour le soudage par vibration linéaire.

- L'influence de l'humidité du bois lors du soudage reste encore une problèmatique importante à expliquer et à résoudre. L'eau joue un rôle très important lors de la formation du joint, cependant elle peut aussi engendrer des phénomènes défavorables au soudage (pression de vapeur d'eau lors du soudage et variation dimensionnelle après le soudage). Les pistes les plus intéressantes qui se profilent sont celles de l'utilisation d'essences stables dimensionnellement et d'essences possédants dans leurs extraits des substances permettant d'augmenter l'élasticité de la ligne de soudage. En effet elle permettrait de fournir des solutions aux problèmes de fragilité du joint observés dans ce travail. Les travaux sur les bois traités thermiquement et chimiquement, bien que le soudage de ces matériaux soit difficile, ouvrent aussi une autre voie sur l'amélioration de la résistance à l'eau des pièces soudées.
- Enfin les travaux de développement pré-industriels ont soulevé les problèmes dits d' « upscaling effect », c'est-à-dire que le passage de petites à grandes dimensions engendre l'apparition de nouveaux phénomènes jusqu'alors méconnus. Grâce aux informations rassemblées dans ces travaux en collaboration avec l'industrie du bois, il est possible de concevoir de nouveaux types de prototypes de machines paliant aux différents problèmes techniques révélés par les essais. Cependant des études doivent être menées notamment pour observer et comprendre l'influence de la largeur des pièces et ses conséquences sur le volume de gaz générés.

Le soudage par vibration linéaire du bois implique donc des phénomènes complexes qui subissent l'influence des paramètres du procédé et du matériau à souder. La technologie a donné des résultats très intéressants et se positionne, vis-à-vis du collage standard comme un procédé très rapide, performant, économiquement viable ouvrant de nouvelles portes à l'assemblage dans le milieu du bois. Une analyse du cycle de vie des produits soudés révelerait certainement un bon positionnement au niveau de la durabilité de la technologie et probablement un faible impact environnemental en comparaison aux systèmes collés. Les problèmatiques soulevées dans ce travail impliquent la poursuite des travaux de recherches fondamentales et appliquées pour répondre au potentiel d'optimisation que demande la technologie.

7.Index

7.1.Liste des illustrations

Figure 1: Plan ligneux d'un résineux et les trois directions anatomiques (Selon Siau 1984).....19

Figure 2: Les différents tissus végétaux dans l'arbre. 20

Figure 3: Représentation schématique des différentes couches composant la paroi cellulaire des fibres de bois. ML : lamelle moyenne ; P : paroi primaire ; S : paroi secondaire avec ses couches S1, S2 et S3 ; W : couche verruqueuse (Selon Core *et al.* 1979). 21

Figure 4: Deux unités de β ─ D ─ glucopyranoses formant une unité de cellobiose. 23

Figure 5: Structure chimique partielle de la cellulose. 23

Figure 6: Structure chimique partielle d'un xylane de feuillus (O-acetyl-4-O-methylglucoronoxylane). 24

Figure 7: Structure chimique partielle d'un mannane de résineux (O-acetyl-galactoglucomannane). 24

Figure 8: Précurseur de la lignine: alcool p-coumarylique (I), alcool conifèrilyque (II), alcool sinapylique (III) (Fengel et Wegener 2003). 25

Figure 9: Formation des radicaux phénoxy à partir de l'alcool conifèrilyque par déshydrogènation enzymatique (Fengel et Wegener 2003). 25

Figure 10: Représentation de la structure moléculaire d'une lignine de résineux (d'après Adler 1977). 26

Figure 11: Méchanisme réactionnel de l'hydrolyse des polysaccharides (Fengel et Wegener 2003). 27

Figure 12: Formation du furfural, de l'hydromethylfururaI, d'acides lévuliniques et formiques à partir de monosaccharides en milieu acide (Fengel et Wegener 2003).....28

Figure 13: Perte de masse et teneur en carbone de *Fagus sylvatica* après un traitement thermique progressant de 5°C par minute (selon Košík *et al.* 1969). 28

Figure 14: Diagramme thermogravimetrique de *Populus sp.* et de ses principaux composants isolés (Shafizadeh et DeGroot 1976). 29

Figure 15: Analyse thermique différencielle de *Fagus sylvatica* et de ses principaux composants (Košík *et al.* 1968). 30

Figure 16: Température de transition vitreuse: (a) des constituants isolés en fonction de la teneur en eau, (b) de la matrice hémicellulose-lignine native en fonction de l'humidité relative de l'air (Selon Salmén 1982).....31

Figure 17: Etapes probables de la dégradation thermique des hémicelluloses (Fengel et Wegener 2003). 32

Figure 18: Etapes probables de la dégradation thermique de la cellulose (Fengel et Wegener 2003). 33

Figure 19: Produits issus de la dégradation thermique de la lignine (Fengel et Wegener 2003)....34

Figure 20: Illustration des 3 modes élémentaires de rupture d'une plaque fissurée. 38

Figure 21: Les différents comportements de la propagation d'une rupture dans un joint bois-adhésif: (a) fort/instable, (b) fort/stable, (c) fort/modérément instable, (d) faible/stable (Selon River 1994)....40

Figure 22: Principe du soudage par friction linéaire (Selon Giese 1995). 42

Figure 23: Représentation des différentes phases du procédé de soudage par friction linéaire (Selon Giese 1995). 43

Figure 24: Représentation de la déformation de l'extrudat pour une vibration dans la longueur (à gauche) et une vibration dans la largeur (à droite) (Selon Giese 1995)....45

Figure 25: Principe de fonctionnement d'une machine de soudage par friction linéaire à entraînement électromagnétique (Branson Ultraschall, Dietzenbach – Allemagne)....45

Figure 26: Image de microscopie électronique à balayage de l'interface soudée ouverte mettant en évidence l'existence d'un réseau de fibres de bois enchevêtrées et bloquées dans une matrice durcie de matériel inter-cellulaire (Gfeller *et al.* 2003). ...47

Figure 27: Résultat d'une densitométrie aux rayons X d'un joint soudé de *Picea abies* (Leban *et al.* 2004)....48

Figure 28: Direction du plan de soudage par rapport aux cernes d'accroissement naturel. De gauche à droite : orientation tangentielle (0°), orientation radiale (90°), orientation mi-radiale mi-tangentielle (45°). 56

Figure 29: Schéma des types A, B et C de profils testés pour le soudage par friction linéaire. 56

Figure 30: Description de l'installation pour la mesure de température infrarouge. 59

Figure 31: Analyse du profil de la température sur la largeur de l'éprouvette lors du soudage. 61

Figure 32: Analyse de la répartition surfacique de la température à la température maximale lors du soudage. 62

Figure 33: Points de contrôle pour la mesure de température infrarouge le long de la ligne de soudage. 62

Figure 34: Ouverture d'un joint soudé filmée par caméra infrarouge. 63

Figure 35: Relevé de températures maximales lors de l'ouverture d'une éprouvette après soudage. 64

Figure 36: Pas successifs sur une TIR lors de l'ouverture d'une éprouvette. 65

Figure 37: Schéma des coupes effectuées sur les échantillons soudés pour les observations microscopiques. 65

Figure 38: Schéma de la méthode de mesure de la largeur des zones atteintes par le soudage au microscope (les flèches rouges indiquent le sens de la mesure). 66

Figure 39: Différentes méthodes de tests mécaniques en traction des éprouvettes soudées. 68

Figure 40: Schéma de l'installation de test de flexion quatre points. 69

Figure 41: Schéma des éprouvette DCB (dimensions en mm). 70

Figure 42: Schéma du montage pour la mesure de l'ouverture des lèvres de fissure sur une éprouvette DCB. 71

Figure 43: Schéma explicatif du prélèvement des fumées pendant le soudage. 72

Figure 44: Photographie du prélèvement des fumées dans la machine de soudage Branson 2700. 73

Figure 45: Profil de la température moyenne de la ligne de soudage durant un soudage sur une pièce d'*Acer campestre* avec t_s = 4s, $p_s = p_m$ = 1,5 N/mm^2....78

Figure 46: Profil de température de long de la ligne de soudage à 4 s et 9 s pour une éprouvette d'*Acer campestre* avec t_s = 4 s, $p_s = p_m$ = 1,5 N/mm^2. 79

Figure 47: Profil de température sur la longueur du joint en fonction du temps de soudage sur une éprouvette de Acer campestre avec t_s = 4 s, $p_s = p_m$ = 1,5 N/mm^2. 80

Figure 48: Mesure de températures internes lors du refroidissement après soudage. 81

Figure 49: Matériel extrudé sortant de l'interface (à gauche), vagues formées par le matériau fondu sur la surface d'une éprouvette ouverte soudée avec un temps de soudage court (à droite)....84

Figure 50: Mécanisme d'extrusion des fibres (en haut) et de formation des vagues (en bas)....85

Figure 51: Exemples de coupes microscopiques selon les directions A (en haut) et B (en bas) sur des éprouvettes d'*Acer campestre*. 86

Figure 52: Observation d'une coupe transversale pour une orientation de fil de 0° d'une éprouvette soudée d'*Acer campestre*. 87

Figure 53: Observation d'une coupe transversale pour une orientation de fil de 45° d'une éprouvette soudée d'*Acer campestre.* 88

Figure 54: Observation d'une coupe transversale pour une orientation de fil de 90° d'une éprouvette soudée d'*Acer campestre.* 88

Figure 55: Observation microscopique de la zone de soudage pour un angle de 0° (en haut), pour un angle de 45° (au centre) et pour un angle de 90° (en bas) d'éprouvettes soudées d'*Acer campestre.*....89

Figure 56: Caractéristiques anatomiques de la zone de bois soudé MZ. 90

Figure 57: Caractéristiques anatomiques de la zone de bois soudé FDR. 91

Figure 58: Caractéristiques anatomiques de la zone de bois soudé PDR. 91

Figure 59: Exemple de traitement d'image microscopique (grossissement X10) pour la détermination de la largeur des zones atteintes par le soudage (ici échantillon soudé à t_s = 8 s). 92

Figure 60: Observation à fort grossissement de la zone de soudage sur une coupe de type B (longitudinale) sur une pièce d'*Acer campestre* soudée. 93

Figure 61: Observation au microscope à lumière réfléchie d'une extrémité latérale d'un joint soudé d'*Acer campestre* (coupe transversale, échantillon d'orientation 90°). 94

Figure 62: Graphique typique force/déplacement obtenu à partir d'une éprouvette DCB de bois soudé de *Fagus sylvatica*. Détermination des coordonnées (P_{C3} et δ_3) du point de non-linéarité du troisième cycle (x = 3) de chargement – déchargement nécessaire pour le calcul de la complaisance. 95

Figure 63: Graphique complaisance/longueur de fissure d'une éprouvette DCB soudée de *Fagus sylvatica*. 97

Figure 64: Eprouvette DCB après ouverture : la surface noircie présente de rares amas de fibres. Ici quelques fibres de l'éprouvette 1 on été arrachées et se retrouvent sur l'éprouvette 2 (flèches). 99

Figure 65: Schéma de conservation de la masse durant le soudage. 102

Figure 66: Evolution moyenne de la perte dimensionnelle en fonction du temps de soudage (t_s) et de la pression de soudage (p_s). Les indicateurs correspondent aux écart-types de chacune des moyennes. 105

Figure 67: Mesure GC/MS des fumées sur 40 s. 107

Figure 68: Détail de la mesure GC/MS des fumées entre 0 et 15 s. 107

Figure 69: Formule de la vanilline (à gauche), formule de l'eugenol (à droite). 108

Figure 70: Formule de l'alcool furfurylique (à gauche), formule du 4-(2-methylpropane)phenol (au centre) et formule de l'isoeugenol (à droite). 109

Figure 71: Evolution de la température moyenne de la ligne de soudage en fontion du temps pour t_s variant de 0,5 s à 11 s. 111

Figure 72: Profil de température au cours du soudage pour un soudage de 10,5 s. 112

Figure 73: Résistance mécanique des joints soudés en cisaillement par la traction et écart-types. 116

Figure 74: Température et résistance en cisaillement des échantillons en fonction du temps de soudage. 117

Figure 75: Epaisseurs moyennes des différentes régions anatomiques modifiées par le soudage en fonction du temps de soudage. 118

Figure 76: Cartographie globale de la densification d'échantillons de bois soudés pour des temps de soudage de 0 s à 11 s. 119

Figure 77: Densité maximale relative des échantillons de bois soudés pour des temps de soudage de 0 s à 11 s. 119

Figure 78: Bilan des différents facteurs physiques et chimiques agissants lors du soudage du bois. 121

Figure 79: Variations des bandes FT-IR de l'interface soudée dans le domaine 2600-3700 cm^{-1} en fonction du temps de soudage (0s, 2s, 4.5s, 6s et 11s). 123

Figure 80: Variations des bandes FT-IR de l'interface soudée dans le domaine 2600-850 cm^{-1} en fonction du temps de soudage (0 s et 2 s). 124

Figure 81: Déconvolution des bandes du spectre FT-IR dans le domaine 1450-1800 cm^{-1}. 125

Figure 82: Spectres CP-MAS ^{13}C RMN de l'interface soudée en fonction de t_s (0 s, 2 s, 6 s et 11 s). 127

Figure 83: Détail de la fenêtre 128-180 ppm du spectre CP-MAS ^{13}C RMN de l'interface soudée en fonction de t_s (0 s, 2 s, 6 s et 11 s). 128

Figure 84: Détails des différences se produisant entre 2 s et 6 s de soudage dans le domaine 105-195 ppm des spectres CP-MAS-DD ^{13}C RMN de l'interface soudée.. 129

Figure 85: Détail des différences se produisant entre 0 s et 11 s de soudage dans le domaine 105-195 ppm du spectre CP-MAS-DD ^{13}C RMN de l'interface soudée. 130

Figure 86: Géométrie et maillage pour la zone de calcul aux EF correspondante à une coupe transversale d'un échantillon de soudage. 135

Figure 87: Evolution de la température en fonction du temps de soudage pour un cycle de friction de 4,5 s. 138

Figure 88: Détail du bas du maillage: épaisseur des différentes zones et position des points P_1 et P_0. 138

Figure 89: Résultats pour une simulation de soudage avec 3 s de friction. 139

Figure 90: Résultat pour une simulation de soudage avec 10,5 s de friction. 141

Figure 91: Apport de flux d'énergie au système durant le soudage calculé pour trois temps de soudage différents. 142

Figure 92: Résultat d'une simulation pour un temps de soudage de 4.5s sur une pièce de 20cm de large. 143

Figure 93: Influence de l'orientation du fil du bois sur la résistance en cisaillement du soudage avec *Acer campestre*. 145

Figure 94 : Résultats des résistances mécaniques des joints pour des qualités de ponçage différentes. 148

Figure 95: Résultats des températures pour différentes qualités de ponçage. 149

Figure 96: Évolution de la température moyenne maximale de la ligne de soudage pendant le processus. 150

Figure 97: Schématisation du soudage de pièces de bois avec un état de surface raboté (en haut) et poncé (en bas). Les flèches indiquent le sens de la vibration. 150

Figure 98: (a) Microscopie électronique à balayage d'un échantillon de *Populus sp*. traité thermiquement et soudé. (b) Microscopie électronique à balayage d'un échantillon de *Betula alba* traité par hydrothermolyse et soudé. 155

Figure 99: (a) Microscopie électronique à balayage d'un échantillon de *Populus sp*. traité par hydrothermolyse et soudé. (b) Détail à plus fort grossissement de (a). 156

Figure 100: Cartographie de microdensitométrie aux rayons X de l'interface soudée de deux pièces de *Betula alba* ayant subi une hydrothermolyse. 158

Figure 101: Cartographie de microdensitométrie aux rayons X de l'interface soudée de deux pièces de *Betula alba* ayant subi un traitement thermique complet. 158

Figure 102: Valeurs moyennes de résistance à la traction des échantilllons de *Picea sitchensis* traités chimiquement. Les indicateurs déterminent pour chaque série la valeur maximale et la valeur minimale. 163

Figure 103: Mode de rupture du panneau de particules soudé sur face. 165

Figure 104: Observation microscopique de la ligne de soudage sur une éprouvette de PP soudée sur le chant. Les zones vides entre les particules du panneau apparaissent en clair. La ligne de soudage (traversant l'image de haut en bas) semble coller les particules entre elles. 166

Figure 105: Tests de cisaillement sur panneau de MDF (à gauche soudé sur face, à droite soudé sur chant). 167

Figure 106: Observation microscopique de la ligne de soudage sur une éprouvette de CP Hêtre/Peuplier soudée sur le chant. La moité supérieure de l'image correspond à un pli de Peuplier, la moitié inférieure à un pli de Hêtre. La ligne de soudage traverse l'image au centre de haut en bas. 168

Figure 107: Test de cisaillement sur le contreplaqué non soudé (à droite) et soudé (à gauche) sur chant. 168

Figure 108: Observation microscopique de joints soudés de CP Okoumé sur face (à gauche) et sur chant (à droite). 169

Figure 109: Carte de microdensitométrie aux rayons X de deux joints de soudage de MDF l'un sur chant (a) et l'autre sur face (b). Le graphique correspondant donne les valeurs de densités des échantillons. 170

7.2.Liste des tableaux

Tableau 1: Distribution des composants de la paroi cellulaire selon les différentes couches de trachédéide de *Picea abies* (Fengel 1969, 1970). 22

Tableau 2 : Caractéristiques des matériaux testés pour le soudage linéaire à 12% d'humidité (* densité à 4% d'humidité environ). 55

Tableau 3: Ordre de grandeur des paramètres de soudages étudiés. 58

Tableau 4: Caractéristiques techniques de la caméra infrarouge ThermaCAM S60. 59

Tableau 5: Paramètres de soudage des essais de mesures de température interne. 63

Tableau 6: Paramètres de soudage pour les essais de chargement cyclique. 68

Tableau 7: Paramètres de soudage pour les éprouvettes DCB. 70

Tableau 8: Paramètres de soudage pour les tests de résistance à l'eau. 72

Tableau 9: Paramètres de soudage pour l'analyse des fumées. 73

Tableau 10: Largeur des différentes zones affectées par le processus selon l'orientation du fil du bois pour des éprouvettes soudées d'*Acer campestre*. 92

Tableau 11: Valeurs du taux de restitution d'énergie G_{Ic}, longueur de fissure a, moyenne et écart-type global pour des éprouvettes DCB de *Fagus sylvatica* soudées. 98

Tableau 12: Taux de restitution d'énergie GIc d'éprouvette DCB en *Fagus sylvatica* pour différents types de joints. 99

Tableau 13: Tests de résistance à l'eau des liaisons soudées et collées de *Fagus sylvatica*, valeurs des résistances mécaniques au cisaillement par la traction. 101

Tableau 14: Résultats de la perte de matière d'éprouvettes de *Fagus sylvatica* durant le soudage. 103

Tableau 15: Paramètres de soudage pour l'étude de l'évolution de la perte de matière en fonction de t_s et p_s. 105

Tableau 16: Variations des bandes IR et RMN et leur proportions en fonction du temps de soudage. 123

Tableau 17: Epaisseur des différentes zones de bois pour la construction du maillage. 135

Tableau 18: Evolution de la capacité calorifique du bois en fonction de la température (Eurocodes 5, 2002). 136

Tableau 19: Progression de la conductivité thermique du bois en fonction de la température (Eurocodes 5, 2002). 136

Tableau 20: Quantité de flux de chaleur évaluée grâce aux mesures expérimentales. 139

Tableau 21: Paramètres de soudage pour l'étude de l'influence de l'orientation des cernes d'accroissement. 144

Tableau 22: Combinaisons de paramètres choisis pour le soudage en bois de bout de *Fagus sylvatica* et résistance des assemblages à la traction perpendiculaire. 146

Tableau 23: Types de qualité d'usinage des surfaces testées pour le soudage d'*Acer campestre.* 147

Tableau 24: Paramètres de soudage d'*Acer campestre* pour la détermination de l'influence de la qualité d'usinage de la surface. 148

Tableau 25: Résistances mécaniques de joints soudés et température moyenne maximale lors du soudage pour différentes essences de bois. L'écart-type est indiqué après chaque valeur ainsi que le nombre de répétitions entre crochets. 152

Tableau 26: Paramètres de soudage pour les bois traités thermiquement et résultats de la résistance en cisaillement des liaisons soudées. 154

Tableau 27: Types de traitement pré-soudage effectués sur des échantillons de *Picea sitchensis.* 160

Tableau 28: Paramètres de soudage selon les différents types de traitement de *Picea sitchensis.* Les remarques sont des observations visuelles effectuées durant le procédé de soudage. 161

Tableau 29: Résistance à la traction de joints soudés de *Picea sitchensis* selon le type de modification du bois et le type de conditionnement post-soudage. Les échantillons de référence collés avec un adhésif PVAc ont été conditionnés selon le type "sec". 162

Tableau 30: Paramètres de soudages et résistances en cisaillement des liaisons soudées comparés à la résistance en cisaillement du matériau pour chaque type de panneaux. 164

8. Références bibliographiques

[1] Adler E. Lignin chemistry—past, present and future, Wood Science and Technology 11(3), 169-218 (1997).

[2] Allen K.W. Theories of adhesion, in: Packham D.E. Handbook of adhesion, 535-538, Wiley, Chichester (2005).

[3] ASTM D 3433, “Standard test method for fracture strength in cleavage of adhesives in bonded metal joint” (1993).

[4] Atalla R.H. and VanderHart D.L. The role of solid state 13C NMR spectroscopy in studies of the nature of native celluloses, Solid State Nuclear Magnetic Resonance 15(1), 1-19 (1999).

[5] Back E.L. and Salmén N.L. Glass transitions of wood components hold implications for molding and pulping processes, Tappi 65(7), 107-110 (1982).

[6] Banerjee P., Govardhan S., Wikle H.C., Liu J.Y. and Chin B.A. Infrared sensing for on-line weld process monitoring and control. *J. Manuf. Sci. Eng.* 115, 907–918 (1993).

[7] Barett J.D. and Foschi R.O. Mode II stress-intensity factors for cracked wood beams, Eng. Fracture Mech. 9, 371-378 (1977).

[8] Bocquet J.F., Pizzi A. and Resch L. Full-scale industrial wood floor assembly and structures by welded-through dowels, Holz Roh Werkstoff, 65(2), 149-156 (2007).

[9] Bocquet J.F., Pizzi A., Despres A., Mansouri H.R., Resch L., Michel D. and Letort F. Wood joints and laminated wood beams assembled by mechanically-welded wood dowels, J. Adhesion Sci. Technol. 21, 301-317 (2007).

[10] Bourgois J. and Guyonnet R. Characterization and analysis of torrified wood, Wood Science and Technology 22, 143-155 (1988).

[11] Brunner E., Karge H.G. and Pfeifer H. On the correlation between the 1 H NMR chemical shift and the stretching vibration frequency of …, Z. Phys. Chem. 176-173 (1992).

[12] Burmester A. Dimensional stabilisation of wood. International Research Group on Wood Preservation, Doc. IRG/WP 3171 (1981).

[13] Burmester A. Einfluss einer Wärme-Druck-Behandlung haldtrockenen Holzes auf seine Formbeständigkeit, Holz als Roh- und Werkstoff 31, 237-243 (1973).

[14] Burmester A. Zur Dimensionsstabilisierung von Holz. Holz als Roh- und Werkstoff 33, 333-335 (1975).

[15] Buxton A.L. Welding plastics, in: Packham D.E. Handbook of adhesion, 583-591, Wiley, Chichester (2005).

[16] Christensen C.M. The Innovator's Dilemma: When New Technologies Cause Great Firms to Fail. Boston, Mass.: Harvard Business School Press (1997).

[17] Colom X., Carrillo F., Nogues F. and Garriga P. Structural analysis of photodegraded wood by means of FTIR spectroscopy, Polymer Degradation and Stability 80(3), 543-549 (2003).

[18] Core H.A., Cote W.A. and Day A.C. Wood structure and identification. 2nd Edition, Syracuse University Press, 182 p. (1979).

[19] Darras B.M., Omar M.A. and Khraisheh M.K. Experimental thermal analysis of friction stir processing. Materials Science Forum 539-543, 3801-3806 (2007).

[20] Davé V.R., Cola M.J. and Hussen N.A. Heat generation in inertia welding of dissimilar tubes. Weld. J. Res. Suppl. 10, 246–252 (2001).

[21] Davidson B.D., Altonen C.S. and Polaha J.J. Effect of Stacking Sequence on Delamination Toughness and Delamination Growth Behavior in Composite End-Notched Flexure Specimen, in: Composite Materials: Testing and Design, Deo V.R.B. and Saff C.R., pp. 393-414, ASTM STP 1274 (1996).

[22] Duchanois G., Mesure de la tenacité et étude du comportement mécanique des joints bois-colle. Thèse de l'Institut National Polytechnique de Lorraine, Nancy, France (1984).

[23] Ebewele R., River B. and Koutsky J.A. Tapered double cantilever beam fracture tests of phenolic-wood adhésive joints: Part I. Development of specimen geometry; effects of bondline thickness, wood anisotropy and cure time on fracture energy, Wood Fiber 11, 197-213 (1979).

[24] Ehrenstein G.W., Schlarb A.K.and Varga J., A polipropilén vibrációs hegesztése, Muanyag Gumi. 25, 339-347 (1988).

[25] Erçin D. and Yürüm Y. Carbonisation of Fir (*Abies bornmulleriana*) wood in an open pyrolysis system at 50–300 °C, Journal of Analytical and Applied Pyrolysis 67(1), 11-22 (2003).

[26] Eurocode 5 – Design of timber structures, Part 1-2: General rules – Structural fire design. Comité européen pour la Normalisation (2002).

[27] European standard EN 204, Adhésives-Wood adhésives for non-structural applications. Classification of thermoplastic wood adhésives for non-structural applications (2001).

[28] European standard EN 205, Adhésives-Wood adhésives for non-structural applications. Determination of the tensile-shear strength of lap joints (2003).

[29] European standard EN 319, Panneaux de particules et panneaux de fibres - Détermination de la résistance à la traction perpendiculaire aux faces du panneau (1993).

[30] Fagan M.J. Finite element analysis, Theory and Practice, Longman, Singapore (1992).

[31] Fang P. and McGinnis G.D. Flash Pyrolysis of Holocellulose from Loblolly Pine Bark, in: Thermal Uses and Properties of Carbohydrates and Lignins, F. Shafizadeh, K.V. Sarkanen and D.A. Tillman, Eds., pp. 37-47. Academic Press, San Francisco (1976).

[32] Fengel D. and Wegener G. Wood chemistry, ultrastructure, reactions, Kessel Verlag, Münich (2003).

[33] Fengel D. The ultrastructure of cellulose from wood, Wood Science and Technology 3(3), 203-217 (1969)

[34] Fengel D. The ultrastructure of cellulose from wood, Wood Science and Technology 4(1), 15-35 (1970).

[35] Focher B., Palma M.T., Canetti M., Torri G., Cosentino C. and Gastaldi G. Structural differences between non-wood plant celluloses: evidence from solid state NMR, vibrational spectroscopy and X-ray diffractometry, Industrial Crops and Products 13(3), 193-208 (2001).

[36] Forest product laboratory, Wood handbook – Wood as an Engineering material. Forest Products Society, Madison, WI (1999).

[37] Fu L., Duan L.Y. and Du S.G., Numerical Simulation of Inertia Friction Welding Process by Finite Element Method, Welding J. March, 65-70 (2003).

[38] Funaoka M., Kako T. and Ahe I. Condensation of lignin during heating of wood, Wood Science and Technology 24(3), 277-288 (1990).

[39] Fuss M. Fräsen von Holz und Holzwerkstoffen, Verbesserung von Zeispanleistung und Wirtschaftlichkeit. Ing. Thesis, Teschnische Universität Dresden, Allemagne (1995).

[40] Gagliano J.M. and Frazier C.E. Improvements in the fracture cleavage testing of adhésively-bonded wood, Wood Fiber Sci. 33, 377-385 (2001).

[41] Gérard J., Beauchêne J., Fouquet D., Guibal D., Langbour P., Thévenon M.F., Thibault A. et Vernay M. Tropix 5.0, Caractéristiques technologiques de 215 essences tropicales, Département fôrets du CIRAD, Programme bois, Montpellier, France, ISBN 2-87614-571-5 (2004).

[42] Gerber C. and Gfeller B. Joint connection with welded thermoplastic dowels and Wood Welding Technologies, in: Proceedings of the World Conference on Timber Engineering, British Columbia, Canada (2000).

[43] Gfeller B. and Properzi M. Woobration, CTI scientific report. BFH-HSB, Bienne, Switzerland (2003).

[44] Gfeller B., Pizzi A., Zanetti M., Properzi M., Pichelin F., Lehmann M. and Delmotte L. Solid wood joints by in situ welding of structural wood constituants, Holzforschung 58:45-52 (2004).

[45] Gfeller B., Zanetti M., Properzi M., Pizzi A., Pichelin F., Lehmann M. and Delmotte L. Wood bonding by vibrational welding, J. Adhesion Sci. Technol. 17, 1573-1589 (2003).

[46] Giebeler E. Dimensionsstabilisierung von Holz durch eine Feuchte/Wärme/Druck-Behandlung, Holz als Roh- und Werkstoff 41, 87-94 (1983).

[47] Giese M. Fertigungs- und werkstofftechnische Betrachtungen zum Vibrationsschweissen von Polymerwerkstoffe, PhD Thesis, Lehrstuhl für Kunststofftechnik, Universität Erlangen-Nürnberg, ISBN: 3-9802740-7-1 (1995).

[48] Gliniorz K.U., Mohr S., Natterer J. and Navi P. Wood welding, in: Proceedings of the 1st International Conference of the European Society for Wood Mechanics, Lausanne, Switzerland (2001).

[49] Griffith A.A. The Phenomena of Rupture and Flow in Solids, Phil. Trans. Roy. Soc. 221, 163-198 (1921).

[50] Hakkou M., Pétrissans M., Zoulalian A. and Gérardin P. Investigation of wood wettability changes during heat treatment on the basis of chemical analysis, Polymer Degradation and Stability 89(1), 1-5 (2005).

[51] Haw J.F. and Schultz T.P. Carbon 13 CP/MAS NMR and FT-IR study of low temperature lignin pyrolysis, Holzforschung 39(5), 289-296 (1985).

[52] Hiermaier S. Prozeßverlauf, Schmelzebelastung und Nahtfestigkeiten beim biaxialen Vibrationsschweißen von Polypropylen, Ing. Thesis, Lehrstuhl für Kunststofftechnik, Universität Erlangen-Nürnberg (1998).

[53] Hill C., Wood Modification Chemical, Thermal and Other Processes. John Wiley & Sons Ltd, Chichester (2006).

[54] Hillis W.E. High temperature and chemical effects on wood stability. Part 1. General considerations, Wood Science and Technology 18, 281-293 (1984).

[55] Hofstetter K., Hinterstoisser B. and Salmén L. Moisture uptake in native cellulose – the roles of different hydrogen bonds: a dynamic FT-IR study using Deuterium exchange, Cellulose 13(2), 131-145 (2006).

[56] Holtman K.M., Chang H., Jameel H. and Kadla J.F. Quantitative ^{13}C NMR Characterization of Milled Wood Lignins Isolated by Different Milling Techniques, Journal of Wood Chemistry and Technology 26(1), 21-34 (2006).

[57] Hunt D.G. and Croager W.P. Mode II fracture toughness of wood measured by a mixed-mode test method, J. Mater. Sci. Lett. 1, 77-79 (1982).

[58] Jodin P. Le bois, matériau d'ingénierie, A.r.bo.lor, Nancy (1994).

[59] Kamdem D.P. , Pizzi A. and Jermannaud A. Durability of heat-treated wood, Holz als Roh- und Werkstoff 60(1), 1-6 (2002).

[60] Kamdem D.P., Pizzi A. and Triboulot M.C. Heat-treated timber: potentially toxic byproducts presence and extent of wood cell wall degradation, Holz als Roh- und Werkstoff 58(4), 1-6 (2000).

[61] Kamdem D.P., Pizzi A., Guyonnet R. and Jermannaud A. International Research Group (IRG) on Wood Perservation, Document IRG/WP 99-40145, Rosenheim, 1-15 (1999).

[62] Kanazawa F., Pizzi A., Properzi M., Delmotte L. and Pichelin F. Parameters influencing wood-dowel welding by high-speed rotation, J. Adhesion Sci. Technol. 19(12):1025-1038 (2005).

[63] Keith C.T. and Chang C.I. Properties of heat-darkened wood. I. Hygroscopic properties. Report OPX213E, Eastern Forest Products Laboratory, Canada (1978).

[64] Killmann W. and Hong L.T. Rubberwood – the success of an agricultural by-product, Unasylva 201(51), 66-72 (2000).

[65] Kim D.Y., Nishiyama Y., Wada M., Kuga S. and Okano T. Thermal Decomposition of Cellulose Crystallites in Wood, Holzforschung 55(5), 521-524 (2001).

[66] Kinloch A.J. Fracture mechanics, in: Packham D.E. Handbook of adhesion, 206-207, Wiley, Chichester (2005).

[67] Kollmann F. and Fengel D. Änderungen der chemischen Zusamensetzung von Holz durch thermische Behandlung, Holz als Roh- und Werkstoff 21(3),77-85(1965).

[68] Kollmann F. and Schneider A. Über dass Sorptionsverhalten wärmebehandelter Hölzer, Holz als Roh- und Werkstoff 41, 87-94 (1963).

[69] Kollmann F. Occurrence of exothermic reactions with wood, Holz als Roh- und Werkstoff 18(6), 193-200 (1960).

[70] Komatsu K., Sasaki H. and Maku T. Estimating Fracture Toughness from Nonlinear Load-Deflection Relation, Wood Res. 59, 80-92 (1976).

[71] Koshijima T. and Watanabe T. Association between Lignin and Carbohydrates in Wood and Other Plant Tissues. Springer series in wood science, Springer-Verlag, Berlin (2003).

[72] Košík M., Dandárová M. and Domanský R. Pyrolyse des Buchenholzes bei niedrigen Temperaturen IX.: Chemische Veränderungen im Buchenholz während der Pyrolyse, Holzforschung Holzverwendung 21, 40-43 (1969).

[73] Košík M., Kozmál F., Reiser V. and Domanský R. Pyrolyse des Buchenholzes bei niedrigen Temperaturen I.: Der gegenwärtige Stand unserer Erkenntnisse über den Mechanismus der Pyrolyse der Holzpolysaccharide, Holzforschung Holzverwendung 20, 11-15 (1968).

[74] Kubiszyn I. and Pietras A. Numerical modelling of the friction-welding process, Welding International 17(6), 425-430 (2003).

[75] Kulticova E.V. Structure and proprieties relationship of densified wood. M.Sc. Thesis, Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, VA, USA (1999).

[76] Lavisci P., Pizzo B., Gagliano J.M., Triboulot P. and De Ciechi M. Fracture energy testing of thick joints with structural wood adhésives, Holz als Roh- und Werkstoff 61, 355-357 (2003).

[77] Le Fichoux E. Présentation et utilisation de CASTEM 2000. Accessible sur http://www-cast3m.cea.fr (1998).

[78] Leban J.M., Pizzi A., Wieland S., Zanetti M., Properzi M. and Pichelin F. X-ray microdensitometry analysis of vibration-welded wood, J. Adhesion Sci. Technol. 18, 673-685 (2004).

[79] Lin C.B., Mu C.K., Wu W.W. and Hung C.H. The effect of joint design and volume fraction on friction welding proprieties of A360/SiC (p) composites. Weld. J. Res. Suppl 3, 100–108 (1999).

[80] Mackerle J. Finite element analyses in wood research: a bibliography, Wood Sci. Technol. 39, 579-600 (2005).

[81] Mackerle J. Finite element analysis and simulation of welding – an addendum: a bibliography (1996-2001), Modeling Simul. Mater. Sci. Eng. 10, 295-318 (2002).

[82] Mall S., Murphy J.F. and Shottafer J.E. Criterion for Mixed Mode Fracture in Wood, J. Eng. Mech. 109, 680-690 (1983).

[83] Massiot D. Sensitivity and Lineshape Improvements of MQ-MAS by Rotor-Synchronized Data Acquisition, Journal of Magnagnetic Resonance 122, 240-245 (1996).

[84] Maunu S.L. NMR studies of wood and wood products, Progress in Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy 40(2), 151-174 (2002).

[85] Méalares C., Hui Z. and Gandini A. Conjugated polymers bearing furan rings: 1. Synthesis and characterization of oligo(2,5-furylene vinylene) and its thiophene homologue, Polymer 37(11), 2273-2279 (1996).

[86] Meola C. and Carlomagno G.M. Recent advances in the use of infrared thermography, Meas. Sci. Technol. 15, R27-R58 (2004a).

[87] Meola C., Carlomagno G.M., Squillace A. and Giorleo G. The use of infrared thermography for nondestructive evaluation of joint. Infared Physics & Technology 46, 93-99 (2004b)

[88] Meola C., Squillace A., Minutolo F.M.C. and Morace R.E. Analysis of stainless steel welded joints: a comparison between destructive and non-destructive techniques. J. Mater. Process. Technol. 155, 1893–1899 (2004c).

[89] Mijovic J.S. and Koutsky J.A. The effect of postcure time on the fracture properties and nodular morphology of an epoxy resin, Wood Sci. 11, 164-168 (1979).

[90] Nassar M.M. and McKay G.D.M. Mechanism of thermal decomposition of lignin. Wood and Fiber Science, 16(3), 441-453 (1984).

[91] Nepveu G. Variabilité, in : Jodin P. Le bois, matériau d'ingénierie, A.r.bo.lor, Nancy (1994).

[92] Nimz H. Beech Lignin - Proposal of a Constitutional Scheme, Angewandte Chemie 13(5):313-321 (1974).

[93] Nishar D.V., Shiano J.L., Perkins W.R. and Weber R.A. Adaptive control of temperature in arc welding, IEEE control system, August 1994, 4-12 (1994).

[94] Noack D. Űber die Heisswasserbehandlung von Rotbuchenholz im Temperaturbereich von 100 bis 180°C, Holzforschung und Holzverwertung 21(5),118-124 (1969).

[95] Nuopponen M., Wikberg H., Vuorinen T., Maunu S.L., Jämsä S. and Viitaniemi P. Heat-treated softwood exposed to weathering, J. Appl. Polym. Sci. 91(4), 2128-2134 (2004).

[96] Olsson A.M. and Salmén L. The association of water to cellulose and hemicellulose in paper examined by FTIR spectroscopy, Carbohydrate Research 339(4), 813-818 (2004).

[97] Omrani P., Bocquet J.F., Pizzi A., Leban J.M. and Mansouri H. Zig-zag rotational dowel welding for exterior wood joints, J. Adhesion Sci. Technol. 21(10), 923-933 (2007).

[98] Omrani P., Masson E., Mansouri H.R. and Pizzi A. Zig-zag rotational dowel welding for exterior wood joints, J. Adhesion Sci. Technol, in press 21(10), 923-933 (2007).

[99] Opella S.J. and Frey M.H. Selection of nonprotonated carbon resonances in solid-state nuclear magnetic resonance, Journal of the American Chemical Society 101, 5854 (1979).

[100] Packham D.E. (Eds) Handbook of adhesion, John Wiley & Sons Ltd, Chichester (2005).

[101] Pandey K.K. and Pitman A.J. FTIR studies of the changes in wood chemistry following decay by brown-rot and white-rot fungi, International Biodeterioration & Biodegradation 52(3), 151-160 (2003).

[102] Papp G., Preklet E., Koíková B., Barta E., Tolvaj L., Bohus J., Szatmári S. and Berkesi O. Effect of UV laser radiation with different wavelengths on the spectrum of lignin extracted from hard wood materials, Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry, 163(1-2), 187-192 (2004).

[103] Pichelin F., Pizzi A. and Frühwald A. Improving oriented strand board proprieties by using high moisture tolerant adhésives. In: Proceedings of the International Conference on Wood and Wood Fiber Composites, Otto-Graf-Institute, Stuttgart, Germany, 429–438 (2000).

[104] Pizzi A. Recent developments in eco-efficient bio-based adhésives for wood bonding: opportunities and issues, J. Adhesion Sci. Technol. 20, 829-846 (2006).

[105] Pizzi A., Despres A., Mansouri H. R., Leban J.M. and Rigolet S. Wood joints by through-dowel rotation welding: Microstructure, 13C-NMR and water resistance, J. Adhesion Sci. Technol. 20(5), 427-436 (2006).

[106] Pizzi, A., Leban, J.M., Kanazawa, F., Properzi, M. and Pichelin, F. Wood dowel bonding by high-speed rotation welding, J. Adhesion Sci. Technol. 18(11), 1263-1278 (2004).

[107] Porter A. On the mechanics of fracture in wood, Forest Products J. 14, 325-331 (1964).

[108] Properzi M., Leban J.M., Pizzi A., Wieland S., Pichelin F. and Lehmann M. Influence of grain direction in vibrational wood welding, Holzforschung 59, 23-27 (2005).

[109] Repellin V. and Guyonnet R. Evaluation of heat-treated wood swelling by differential scanning calorimetry in relation to chemical composition, Holzforschung 59(1), 28-34 (2005).

[110] Resch L., Despres A., Pizzi A., Bocquet J.F. and Leban J.M. Welding-through doweling of wood panels, Holz als Roh- und Werkstoff 64(5), 423-425 (2006).

[111] Riegel A. Holz- und Lackzwischenschliff, Beitrag zu Prozessmodellierung. Ing. Thesis, Teschnische Universität Dresden, Allemagne (1997).

[112] River B.H. Fracture of adhésive-bonded wood joints, in: Handbook of Adhésive Technology, Pizzi A. and Mittal K.L. (Eds), pp. 151-177, Marcel Dekker, New York (1994).

[113] Ropp J. Wood processing method for building construction, involves providing stage of thermal processing to change wood's physicochemical structure by weighing wood and based on removal of constitution of water resulting in loss of dry mass of wood, Prodeo Soc., Brevet FR2900859 A1 (2007)

[114] Rowell R. M. (Ed.) Handbook of wood chemistry and wood composites, CRC Press, Boca Raton, FL (2005).

[115] Rowell R. M. and LeVan-Green S. L. Thermal Properties, in: Handbook of wood chemistry and wood composites, Rowell R. M. (Ed.), 121-138. CRC Press, Boca Raton, FL (2005).

[116] Russek U.A. Innovative trends in laser beam welding of thermoplastics. Proceedings of the 2nd International WLT-Conference on Lasers in Manufacturing LIM, June 2003, 105-111, Munich, Germany, (2003).

[117] Ruyter H.P. European patent Appl. No. 89-203170.9 (1989).

[118] Salmén N.L., Temperature and Water Induced Softening Behavior of Wood Fiber Based Materials, PhD Thesis, KTH, Stockholm (1982).

[119] Schlarb A.K.H., Zum Vibrationsschweissen von Polymerwerkstoffen. Process – Struktur – Eigenschaften. Institut für Werkstofftechnik, Universität Kassel, Germany (1989) ISBN: 3-88122-512-9.

[120] Seborg R.M., Tarkow H. and Stamm A.J. Effect of heat upon the dimensional stabilization of wood, Journal of Forest Products Research Society 3, 59-67 (1953).

[121] Selbo, M.L. End and corner joint construction. In: Adhesive bonding of wood. Technical bulletin N°1512. USDA. Forest Serv., Washington, DC. EU., 49-55 (1975).

[122] Shafizadeh F. Acidic hydrolysis of glycosidic bonds, Tappi 46(6):381-383 (1963)

[123] Shafizadeh F. and DeGroot W.F. Combustion characteristics of cellulosic fuels, in: Thermal Uses and Properties of Carbohydrates and Lignins, F. Shafizadeh, K.V. Sarkanen and D.A. Tillman, pp. 1-17. Academic Press, San Francisco (1976).

[124] Siau J.F. Transport processes in wood, Springer Verlag, 243 p. (1984).

[125] Sivonen H., Maunu S.L., Sundholm F., Jämsä S. and Viitaniemi P. Magnetic resonance studies of thermally modified wood, Holzforschung 56(6), 648-654 (2002).

[126] Sjöström E. Wood Chemistry - Fondamentals and Applications, Second Edition, Academic Press, San Diego, CA (1993).

[127] Smith I. and Vasic S. Fracture behaviour of softwood, Mech. Mater. 35, 803-815 (2003).

[128] Stamm A.J. Wood science and technology, The Ronald Press Company, USA, Chapter 19, 312-342 (1964).

[129] Stamm B. Development of friction welding of wood – Physical, mechanical and chemical studies, PhD thesis, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (2005).

[130] Stamm B., Natterer J. and Navi P. Joining wood by friction welding, Holz als Roh- und Werkstoff 63, 313 (2005).

[131] Stamm B., Natterer J., Windeisen E. and Wegener G. Thermal behaviour of polysaccharides in wood during friction welding, Holz als Roh- und Werkstoff 63, 388 (2005).

[132] Sundqvist B. Colour change and acid formation in wood during heating. PhD. Thesis, Lulea University of Technology, Sweden (2004).

[133] Sutthof B., Franz U., Hentschel H. and Schaaf A. Verfahren zum reibschweissartigen Fügen und Verbinden von Holz, German Patent No. DE 19620273 C2 (1996).

[134] Takatani M. and Sasaki H. Effect of Glue-line Flexibility on Cleavage Fracture Toughness of Wood-Epoxy Resin Bond System, Wood Res. 66, 30-51 (1980).

[135] Takatani M., Hamada R. and Sasaki H. Testing Method for Cleavage-Fracture Toughness of Glue lines in Bonded Wood II. Determination of the Size of the Standard Specimen and Measurement of the Fracture Toughness, Mokuzai Gakkaishi 30(2), 130-138 (1984).

[136] ThermaCamTM Researcher, User's manual, Flir systems, Professional edition. Version 2.8 SR-1, Emissivity tables, pp121-136 (2004).

[137] Timell T.E. The acid hydrolysis of glycosides: I. General conditions and the effect of the nature of the aglycone, Canadian Journal of Chemistry 42:1456-1472 (1964)

[138] Tjeerdsma B.F., Boonstra M., Pizzi A., Tekely P. and Militz H. Characterisation of thermally modified wood: molecular reasons for wood performance improvement, Holz als Roh- und Werkstoff 56, 149-153(1998).

[139] Tod D.A. Tests of adhesion, in: Packham D.E. Handbook of adhesion, 533-535, Wiley, Chichester (2005).

[140] Toussaint B., Autohydrolyse rapide du bois de peuplier *Populus Tremula*, modifications ultrastructurales, hydrolyse enzymatique, inhibitions et reversions, PhD Thesis, Université J. Fournier, Grenoble (1990).

[141] Triboulot P., Jodin P. and Pluvinage G. Validity of fracture mechanics concepts applied to wood by finite element calculation, Wood Sci. Technol. 18, 51-58 (1984).

[142] Vairis A. and Frost M. Modelling the linear friction welding of titanium blocks, Mater. Sci. Eng. 292, 8-17 (2000).

[143] Valentin G. and Adjanohoun G. Applicability of classical isotropic fracture mechanics specimens to wood crack propagation studies, Materials and Structures 25, 3-13 (1992).

[144] Valentin G. and Caumes P. Crack propagation in mixed mode in wood: a new specimen, Wood Sci. Technol. 23, 43-53 (1989).

[145] Van Zuylen A. Chem. Mag. 212-213 (1995).

[146] Vasic S. and Smith I. Bridging crack model for fracture of spruce, Eng. Fracture Mech. 69, 745-760 (2002).

[147] Venkatraman B., Baldev R. and Menaka M. Online infrared detection of inclusions and lack of penetration during welding. Mater. Eval. 9, 933–937 (2005).

[148] Wagenführ R., HOLZatlas, Carl Hauser Verlag, Leipzig (2000).

[149] Wang Y. and Chin B.A. Online sensing of weld penetration using infrared thermography. Opt. Tech. Insp. 34, 314–320 (1986).

[150] Weiland J.J. and Guyonnet R. Study of chemical modifications and fungi degradation of thermally modified wood using DRIFT spectroscopy, Holz als Roh- und Werkstoff 61(3), 216-220 (2003).

[151] White M.S. and Green D. Effects of substrate on the fracture toughness of wood-adhésive bands, Wood Sci. 12, 149-153 (1980).

[152] Wieland S., Shi B., Pizzi A., Properzi M., Stampanoni M., Abela R., Lu X. and Pichelin F. Vibration welding of wood: X-ray tomography, additives, radical concentration, Forest Products J. 55(1), 84-87 (2005).

[153] Wikberg H. Advanced Solid State NMR Spectroscopic Techniques in the Study of Thermally Modified Wood, PhD thesis, Helsinki, Finland (2004).

[154] Wikle H.C., Kottilingam R.H., Zee R.H. and Chin B.A. Infrared sensing technique for penetration depth control of the submerged arc welding process. J. Mater. Process. Technol. 113, 228–233 (2001).

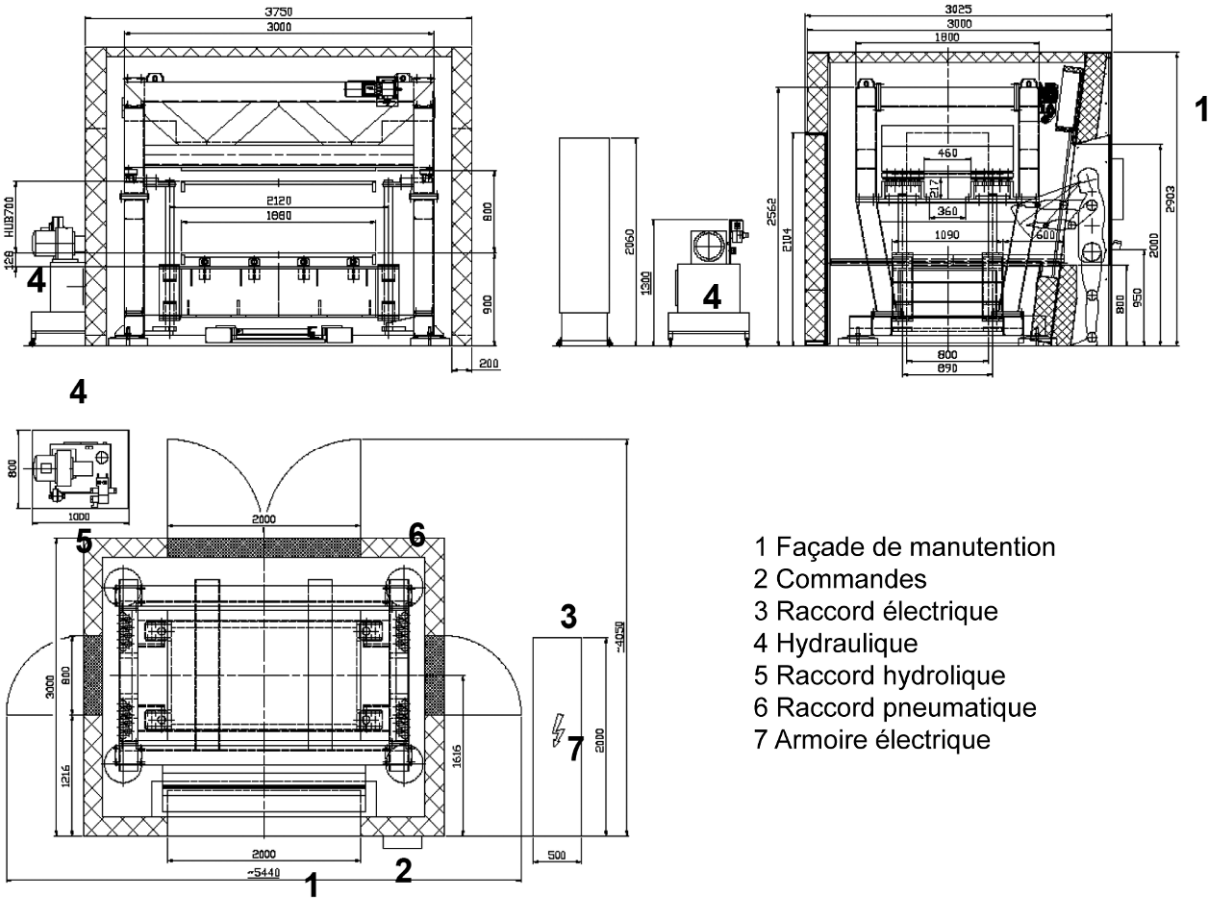
[155] Yildiz S. and Gümüşkaya E. The effects of thermal modification on crystalline structure of cellulose in soft and hardwood, Building and Environment 42(1), 62-67 (2007).

[156] Yoshihara H. and Kawamura T. Mode I fracture toughness estimation of wood by DCB test, Composites 37, 2105-2113 (2006).

[157] Zoulalian A. and Pizzi A. Wood-dowel rotation welding – a heat-transfer model, J. Adhesion Sci. Technol. 21(2):97-108 (2007).

9.Annexes

9.1.Machine de soudage Branson M-DT24L



1 Façade de manutention
2 Commandes
3 Raccord électrique
4 Hydraulique
5 Raccord hydrolique
6 Raccord pneumatique
7 Armoire électrique

Données de construction	**Valeur**
Machine	
Distance maximal entre les tables	750 mm
Distance entre la table inférieure et la tête de vibration	1490 mm
Masse maximale de l'outil supérieur	300 kg
Parallèléité des plan d'outils	± 0,1 mm
Pression maximale	90 kN
Fréquence de soudage	100 Hz
Amplitude maximale de soudage	2 mm
Surface maximale soudable	450 mm^2
Temps de soudage typique	2 … 8 s
Temps de maintien typique	2 … 8 s
Têtes de vibration	
Type	VCB 460-045
Puissance	66 kW/xkVA
Tension de sortie	3 x 0 … 460 V
Courant nominal effectif	45 A
Capacité de surcharge pendant 60s	1,2 x I

9.2.Programme sous Cast3M pour la simulation thermique du soudage

```
TITR'SOUDAGE DU BOIS';
OPTI DIME 2 ELEM QUA8;
p_temps=0.1;
Tem_tot=9.;
Larg=0.01;
Haut=0.015;
Nd_MZ=2;rhomz=1500;
Nd_FDR=3;rhofdr=900;
Nd_PDR=3;rhopdr=720;
Nd_Wood=4;rhowo=720;
*
*
*                          Données géométriques
  Ep_MZ=0.00005;
  Ep_FDR=0.0001;
  Ep_PDR=0.0006;
*                          Propriétés Matériaux
*-----------------------------------------------températures expérimentales
 LIstE1=PROG 20. 27.7 39.4 56.3 75.3 96.8 117.75 131.5
 144.4 159.7 174.4 187.3 200. 206.5
 212.7 217.9 223.5 227.3 221.8 211. 202.1 192.4 183.
 176. 169.3 163.9 158.3 153.1 148.3 144.
 140.1 136.3 132.7 129.5 126.6 123.8 121.1;
 LISTEX=PROG 0. PAS 0.25 9;
 evol1=evol manu 'Temps' LISTEX 'Température' LISTE1 'COUL' rouge;
* dess evol1;
*                            list Flu_imp;
PT3 = PROG 0. .1  .35   1. 1.25  1.5   2.  3.   3.5
 4.0  4.5  4.9  6.  9.;
PT4 = PROG 0. .5  1.2  2.5  3.0  3.5  3.6  3.4  3.2
 3.0  1.5  .0  0. 0.;
Mev_flux = EVOL MANU 'TEMPS' PT3 'COEF FLUX' PT4;
dess Mev_flux;
*
*                        Capacité calorifique
litem = prog 20. 100. 120. 200. 250. 300.
           350. 400. 600. 800. 1200.;
licsp = prog 1.53 1.77  2.12 2.0 1.62 0.71
             0.85 1.0 1.4 1.65 1.65;
licsp = licsp * 1000.;
evoc_b =  EVOL MANU 'T' litem 'C' licsp;;
*                        Conductibilité thermique
litem = prog 20. 200. 350.;
licsp = prog 1. 1.25 0.58;
evok_b =  EVOL MANU 'T' litem 'K' licsp;;
*
*
  Ep_Wood=Haut-Ep_MZ-Ep_FDR-Ep_PDR;
*POINTS
P1=0. 0.;P2=Larg 0.;
P3=0. Ep_MZ;P4=Larg Ep_MZ;
Epais=Ep_MZ+Ep_FDR;
P5=0. Epais;P6=Larg Epais;
Epais=Ep_MZ+Ep_FDR+Ep_PDR;
P7=0. Epais;P8=Larg Epais;
P9=0. Haut;P10=Larg Haut;
*LIGNES
P1P2=DROI P1 P2 dini (Larg/10.) dfin (Larg/30.);
P3P4=DROI P3 P4 dini (Larg/10.) dfin (Larg/30.);
```

```
P5P6=DROI P5 P6 dini (Larg/10.) dfin (Larg/30.);
P7P8=DROI P7 P8 dini (Larg/10.) dfin (Larg/30.);
P9P10=DROI P9 P10 dini (Larg/10.) dfin (Larg/30.);
P2P4=P2 DROI P4 Nd_MZ;
P3P1=P3 DROI P1 Nd_MZ;
SURF1=DALL P1P2 P2P4 P3P4 P3P1 PLAN;
P4P6=P4 DROI P6 Nd_FDR;
P5P3=P5 DROI P3 Nd_FDR;
SURF2=DALL P3P4 P4P6 P5P6 P5P3 PLAN;
P6P8=P6 DROI P8 Nd_PDR;
P7P5=P7 DROI P5 Nd_PDR;
SURF3=DALL P5P6 P6P8 P7P8 P7P5 PLAN;
P8P10=DROI P8 P10 dini (Haut/8) dfin (Haut/4);
P9P7=DROI P9 P7 dini (Haut/4) dfin (Haut/8);
SURF4=DALL P7P8 P8P10 P9P10 P9P7 PLAN;
Surface=SURF1 et SURF2 et SURF3 et SURF4;
Elim Surface 0.00001;
TRAC QUAL Surface;
*
*------------------------CHOIX DU COMPORTEMENT DU MATERIAU ET DU MODELE EF
*
MO1=MODE SURF1 THERMIQUE ISOTROPE;
MO2=MODE SURF2 THERMIQUE ISOTROPE;
MO3=MODE SURF3 THERMIQUE ISOTROPE;
MO4=MODE SURF4 THERMIQUE ISOTROPE;
dech=P2P4 ET P4P6 ET P6P8 ET P8P10 ET P9P10;
MOconv =MODE dech CONVECTION;
MoTot=MO1 et MO2 et MO3 et Mo4 et MOconv;
*
*-----------------------------------------DONNES MATERIAUX ET ELEMENTS
*
ak=.2427/1000.;bk=.0188;
evMZ=evok_b *(ak* rhomz + bk);
evFDR=evok_b *(ak* rhofdr + bk);
evPDR=evok_b *(ak* rhopdr + bk);
evWood=evok_b *(ak* rhowo + bk);
dess (evWood et evMZ);
MAT1=MATE MO1 K evMZ 'C' evoc_b RHO rhomz;
MAT2=MATE MO2 K evFDR 'C' evoc_b RHO rhofdr;
MAT3=MATE MO3 K evPDR 'C' evoc_b RHO rhopdr;
MAT4=MATE MO4 K evWood 'C' evoc_b RHO rhowo;
Mconv=MATE MOconv H 8.;
MATOT=MAT1 ET MAT2 ET MAT3 ET MAT4 ET Mconv;
*-------------------------------------------   champ   des   températures
initiales
tem0=manu chpo Surface 1 T 20.;
*
*-------------------------------------------flux convectif
PT1 = PROG 0. 20.;
PT2 = PROG 1. 1.;
Mevol1 = EVOL MANU 'TEMPS' PT1 'COEFF' PT2;
CH_TE = MANU 'CHPO' 1 dech 'T' 20.;
Char_con = CHAR 'TECO' CH_TE  Mevol1;
*
*-------------------------------------------flux imposé
Qdot = 20000.0;
Fluimp = FLUX MO1 Qdot P1P2;
Char_s = char 'Q' fluimp Mev_flux;
*-------------------------------------------procédure pasapas
taba=table;
taba.modele=MOTOT;
taba.caracteristiques=MATOT;
```

```
taba.celsius=vrai;
taba.temperatures=table;
taba.temperatures . 0 = tem0;
taba.chargement= Char_con ET Char_s;
taba.temps_calcules=prog 0. pas p_temps Tem_tot;
taba.PROCEDURE_THERMIQUE = DUPONT;
pasapas taba;
*-----------------------------------------Affichage des résultats
Lig1=inve(P3P1);
listt=prog;
listtp1=prog;
listtp2=prog;
lisling=prog;
iter=-1;
ligmoy = P2P4 et P4P6;
REPETER Boucle (DIME taba.TEMPERATURES);
iter = iter + 1;
ltemps=(taba.TEMPS.iter);
listt=listt et (prog(taba.temps.iter));
valp1=extr (taba.TEMPERATURES.iter) 'T' P1;
listtp1=listtp1 et (prog valp1);
valp2=extr (taba.TEMPERATURES.iter) 'T' P2;
listtp2=listtp2 et (prog valp2);
valin= EVOL 'CHPO' (taba.TEMPERATURES.iter) T ligmoy;
FLOT1 = MOYESPEC valin  0. (Ep_MZ+Ep_FDR);
lisling=lisling et (prog FLOT1);
 titr'Températures … ' ltemps 's';
 chamtem=peche taba temperatures ltemps;
trac chamtem surface;
* Evot1 = EVOL 'CHPO' chamtem T Lig1;
* dess evot1;
* Evot2 = EVOL 'CHPO' chamtem T ligmoy;
* mess flot1;
* dess evot2;
* list evot1;
Fin Boucle;
evolp1= evol manu 'temps' listt 'Temp P1' listtp1 Coul bleu;
evolp2= evol manu 'temps' listt 'Temp P2' listtp2;
evolp3= evol manu 'temps' listt 'Temp P2' lisling Coul vert;
dess (evol1 et evolp3 et evolp2 et evolp1);
*list evolp2 ;
```

9.3.Paramètres de soudage

Résultants d'optimisations:

	t_s (s)	t_m (s)	p_s (MPa)	p_m (MPa)	a (mm)	f (Hz)
Panneaux:						
PP Face/Face	7	5	1.5	1.5	3	100
PP Chant/Chant	5.5	5	1.1	1.1	3	100
PP Face/Chant	7	5	1.33	1.33	3	100
OSB Face/Face	5.5	15	1.33	1.33	3	100
OSB Chant/Chant	5.5	35	1.33	1.33	3	100
OSB Chant/Face	5.5	15	1.33	1.33	3	100
MDF Face/Face	10	35	1.5	1.5	3	100
MDF Chant/Chant	8	5	1.33	1.33	3	100
MDF Chant/Face	8	15	1.33	1.33	3	100
CP Hêtre/Peuplier Face/Face	3	5	1.33	1.33	3	100
CP Hêtre/Peuplier Chant/Chant	3.5	5	1.33	1.33	3	100
CP Hêtre/Peuplier Face/Chant	3.5	5	1.33	1.33	3	100
CP Okoumé Face/Face	3	35	1.33	1.33	3	100
CP Okoumé Chant/Chant	3	5	1.33	1.33	3	100
CP Okoumé Face/Chant	3.5	15	1.33	1.33	3	100
Bois massif:						
Hêtre *(Fagus sylvatica)*	4.5	5	1.33	1.33	3	100
Hêtre bois de bout	5	5	1.33	1.33	3	100
Erable *(Acer campestre)*	4	5	1.33	1.33	3	100
Chêne *(Quercus robur)*	5	5	1.33	1.33	3	100
Chêne soudage plan tangentiel	5	10	1.33	1.33	3	100
Frêne *(Fraxinus sp.)*	4.5	5	1.33	1.33	3	100
Epicea *(Picea abies)*	10	35	1.76	1.76	3	100
Peuplier *(Populus nigra)*	5.5	10	1.1	1.1	3	100
Paulownia tomentosa	5	10	0.63	0.63	3.5	100
Bois traité thermiquement:						
Bouleau Hydrothermolyse	4	7	1.33	1.33	3	100
Bouleau Plato	3	10	1.33	1.33	3	100
Peuplier Hydrothermolyse	2	10	1.33	1.5	3	100
Peuplier Plato	2	7	1.33	1.5	3	100
Hêtre Plato	3	7	1.33	1.5	3	100

Non optimisés:

Bois massif:

	t_s (s)	t_m (s)	p_s (MPa)	p_m (MPa)	a (mm)	f (Hz)
Abies alba M.	3	8	1.33	1.33	3	100
Acer saccharum Marsch.	4	5	1.33	1.33	3	100
Betula alleghaniensis Britt.	4	5	1.33	1.33	3	100
Carpinus betulus L.	4	8	1.33	1.33	3	100
Hevea brasiliensis	5.5	10	1.33	1.33	3	100
Picea mariana Mill.	9	35	1.76	1.76	3	100
Picea sitchensis	5.8	10	1.33	1.33	3	100
Pinus strobus L.	9	35	1.76	1.76	3	100
Pinus sylvestris L.	3,5	8	1.33	1.33	3	100
Robinea pseudoaccacia L.	4	8	1.33	1.33	3	100

9.4.Détails du calcul des coûts de l'analyse économique

Informations générales

	Collage classique	Soudage	Unité
Jours de travail/an	220	220	j
Heures de travail/jour	8.5	8.5	h
Heures de travail sur 1 an	1867	1016	h
Postes/jour (1 poste = 8.5h)	1.00	0.54	postes
Employés/poste	1	1	employés
Taux d'heures annuel de fonctionnement de la machine	1867	1016	h
Dimension d'une planche	165*15*2	165*15*2	cm x cm x cm
Nombre de planches par bloc	15	15	couches
Surface assemblée par bloc	3.465	3.465	m^2
Temps d'un cycle	**257**	**14**	**s/couches**
Nombre de lignes de production	**10**	**1**	Blocs/presse
Nombre de bloc par minute	0.1667	0.3061	blocs/min
Nombre de noyaux par minute	2.5000	4.5918	Noyaux/min
Rendement de la production	85	85	%
Production réelle annuelle	**64680**	**64680**	**m^2/an**

Coûts d'occupation

	Collage classique	Soudage	Unité
Coût d'occupation	7.5	7.5	CHF/m^2
Espace requis	40	40	m^2
Temps d'occupation	12	12	mois
Coût d'occupation/an	**3600**	**3600**	**CHF/an**

Coût d'énergie

	Collage classique	Soudage	Unité
Puissance nominale	1.5	22	kW
Consommation	1.5	22	kW/h
Coût de l'énergie	0.2077	0.2077	centimes/kWh
Heures de travail/an	1867	1016	h/an
Consommation/an	2800	22359	kWh/an
Coût énergétique/an	**582**	**4644**	**CHF/an**

Coût adhésif

	Collage classique	Soudage	Unité
Prix adhésif	0.75	0	CHF/m2
Production annuelle	64680	64680	m2/an
Coût d'application horaire	15	0	CHF/h
Coût d'application annuel	28000	0	CHF/an
Coût annuel adhésif	**76510**	**0**	**CHF/an**

Coût matière première (bois)

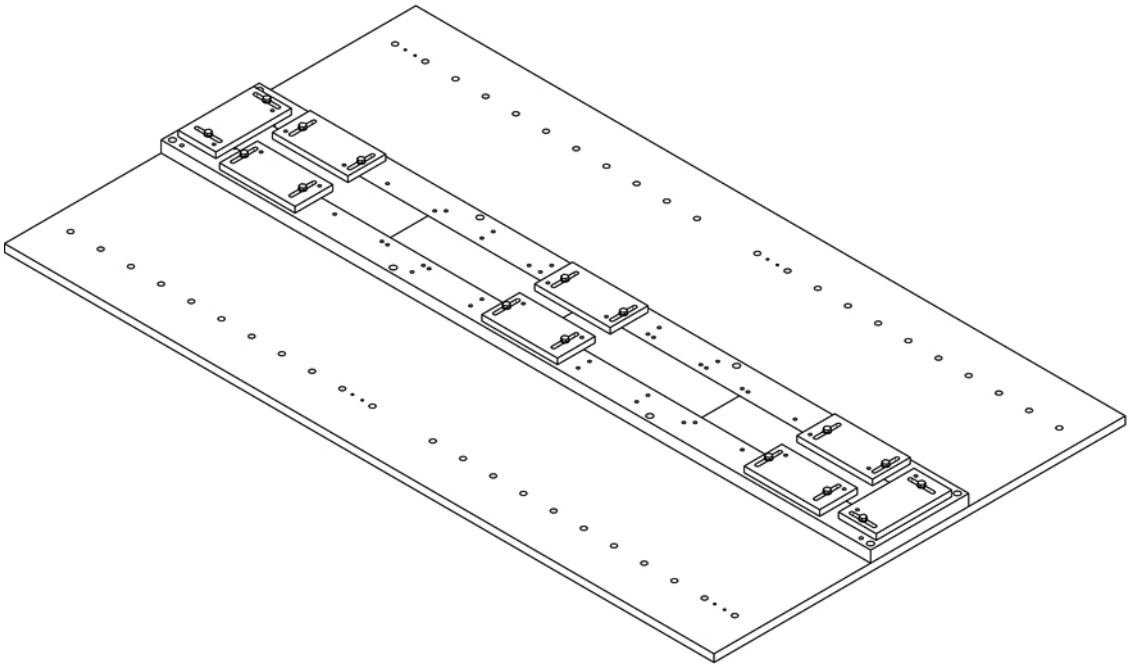
	Collage classique	Soudage	Unité
Prix du bois	750	750	CHF/m3
Volume d'un bloc	0.07425	0.07425	m3
Coût bois/an	**1039500**	**1039500**	**CHF/an**

Salaires

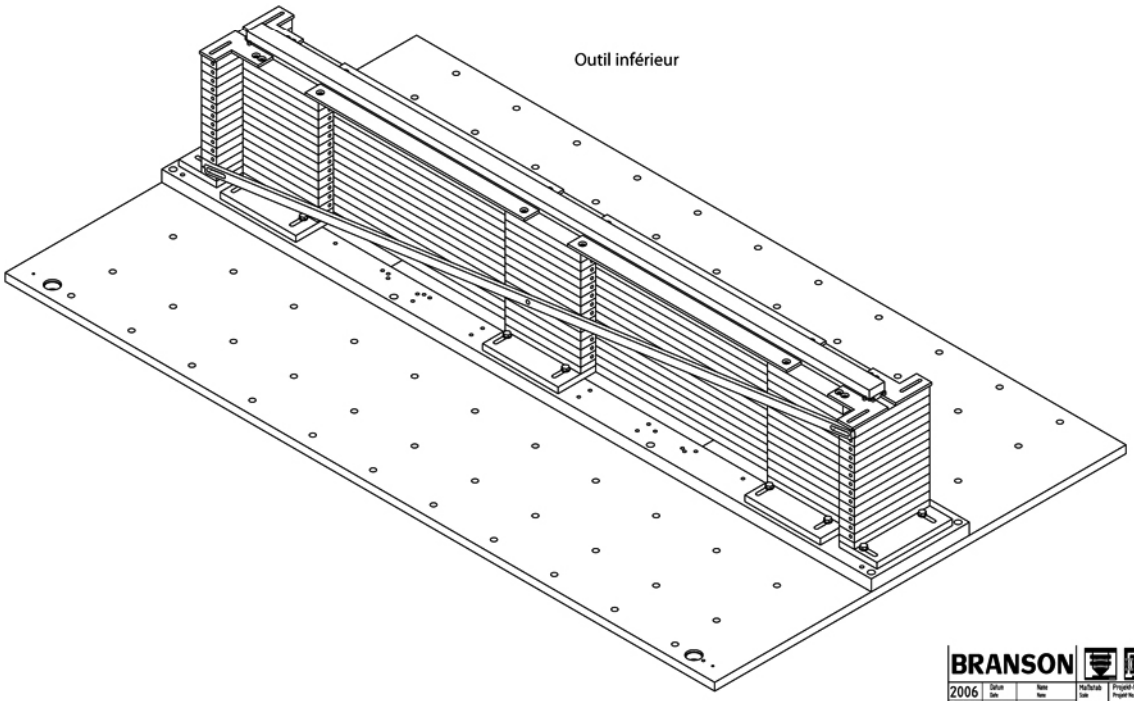
	Collage classique	Soudage	Unité
Nb d'employés/poste	1	1	employés
Nb poste/jour	1.00	0.54	postes
Salaire horaire	35	35	CHF/h
Taux horaire de travail annuel	1867	1016	h/an
Total Salaires	**65333**	**35570**	**CHF/an**

9.5.Dessin CAD du positionnement de l'outil de soudage pour les blocs de lamellé-soudés

Outil supérieur retourné
à 180°



Outil inférieur



BRANSON				
2006	Datum	Name	Maßstab	Projekt-Nr. 60055.0 V40
Bearbeitet	27.10.	FHTB	1:1	
Gezeichnet			Blatt/Feuil	Zeichnungs-Nr. Format 0
Projekt	BFH-AHB, Biel			
Benennung	Positionen			