

BENOÎT BELLEVILLE

RÔLE DE L'INTERFACE BOIS-ADHÉSIF DANS LES LAMES DE PLANCHER D'INGÉNIERIE

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

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

2008

Résumé

La connaissance approfondie d'un matériau ou phénomène est primordiale afin d'assurer un niveau de précision adéquat en modélisation. Les lames de plancher d'ingénierie (LPI) ont fait l'objet de plusieurs études dans le but de mieux en comprendre le comportement mécanique. Les contraintes présentes dans la lame de surface, suite à la formation d'un gradient de teneur en humidité dans l'assemblage, entraînent la déformation de celle-ci. Il apparaît que la section située sous la lame de surface agit comme une barrière au mouvement de l'humidité.

Les phénomènes hygromécaniques ayant lieu au niveau de l'adhésif et de l'interface bois-adhésif sont relativement peu connus. Cette section constitue une barrière au mouvement de la vapeur d'eau et joue un rôle important sur les mouvements d'humidité causés par les changements de conditions hygrothermiques de l'air ambiant. Ce manque de connaissances entraîne une estimation grossière des phénomènes qui se produisent dans les matériaux composites laminés à base de bois. Le nombre restreint d'études sur le sujet explique le manque de connaissances concernant la méthodologie à utiliser lors de l'étude des phénomènes en cause. Cette région est notamment complexe et difficile à isoler pour analyse en raison de sa petite taille.

Dans le cadre de cette étude, nous avons développé une méthode pour isoler et étudier les propriétés de l'interface bois-adhésif. Cette technique expérimentale a été développée pour améliorer la précision d'un modèle existant visant à prédire les critères de performance des LPI. Des essais ont également été effectués pour déterminer les coefficients d'expansion et de diffusion en régime permanent de cette zone. L'interface à l'étude était composée d'un substrat d'érable à sucre (*Acer saccharum* Marsh.) et d'un acétate de polyvinyle réticulé (XPVAc) à titre d'adhésif.

La détermination du coefficient de diffusion de la vapeur d'eau a été effectuée au moyen de cellules de diffusion. Les coefficients d'expansion ont été déterminés en soumettant des spécimens à un cycle de conditionnement. La modélisation a été réalisée avec un code MEF++ qui utilise la méthode des éléments finis. Des LPI ont également été préparées pour des fins de validation du modèle en utilisant les paramètres déterminés en laboratoire.

L'érable à sucre a affiché le coefficient de diffusion le plus élevé à $1,66 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ et le film libre de XPVAc le plus faible à $4,18 \times 10^{-12} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$. Tel qu'anticipé, le coefficient de diffusion de l'interface bois-adhésif était sensiblement plus élevé que celui pour le film libre de XPVAc mais inférieur à celui de l'érable à sucre à $5,73 \times 10^{-12} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$. Les coefficients d'expansion pour l'interface bois-adhésif et le film libre de XPVAc étaient respectivement de $4 \times 10^{-3} \text{ mm} \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \%^{-1}$ et $3 \times 10^{-3} \text{ mm} \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \%^{-1}$. Dans le cas de l'érable à sucre, le coefficient de contraction tangentiel en désorption ($3 \times 10^{-3} \text{ mm} \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \%^{-1}$) était inférieur au coefficient d'expansion tangentiel en adsorption ($4 \times 10^{-3} \text{ mm} \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \%^{-1}$).

Une comparaison des résultats expérimentaux avec ceux obtenus suite à la modélisation a permis de conclure que le fait de considérer les interfaces et l'adhésif dans les plans de colle n'a pas d'effet significatif sur le gauchissement suite aux changements de teneur en humidité des lames de plancher d'ingénierie. La détermination des coefficients de diffusion a confirmé l'importance de l'interface en ce qui concerne le mouvement de la vapeur d'eau. Cependant, le modèle considérant l'interface bois-adhésif n'était pas plus près de la courbe expérimentale que le modèle sans interface.

Ce projet a permis de développer une connaissance accrue des phénomènes hygromécaniques des composites multicouches et un accès à un outil de développement de produits hautement efficaces. Un tel outil permet de réduire les temps de développement et les coûts de recherche et développement. Les méthodes développées dans le cadre de ce projet pourront être réutilisées ultérieurement afin de déterminer ces paramètres pour les vernis.

Abstract

The accuracy of models of the hygromechanical behavior of wood composite products is determined by a detailed analysis of each layer. It appears that the section located between the wood substrate and the adhesive film has a significant impact on moisture diffusion inside the composite, acting as a barrier to water vapor diffusion. The phenomenon is responsible for the development of a moisture gradient inside the composite. In engineered wood flooring (EWF), this gradient causes stress essentially located in the hardwood surface layer which is conditioned by the ambient air, whereas the core and the backing layers absorb or desorb water vapor at a much slower rate. Properties concerning the adhesive film and the type of substrate used are available in the literature but still no data can be found for the wood-adhesive interface. A complete and satisfying microscopic interpretation of this region is not actually available in the literature, not only because of the complexity of the interface formation but also the difficulty to isolate and by the same way analyze it.

The objective of this study was to investigate the wood-adhesive interface in EWF. The study investigated the wood-adhesive interface for EWF. The steady-state radial water vapor diffusion and the expansion coefficients were determined for the interface formed by the sugar maple (*Acer saccharum* Marsh.) substrate and cross-linked polyvinyl acetate adhesive (XPVAc). A diffusion cup was used for the determination of the steady state water vapor flow. The expansion coefficient was obtained by comparing the differences between the sample size for different conditions. The experimental technique was developed to enhance the accuracy of an actual predictive model of product performances. A comparison of the experimental results with those given in the literature showed a good fit. Engineered wood flooring strips had also been realized for the validation part.

Sugar maple had the highest diffusion coefficient at $1.66 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ and the free film of XPVAc had the lowest at $4.18 \times 10^{-12} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$. As expected, the diffusion coefficient obtained for the wood-adhesive interface is slightly higher than that of pure XPVAc film but lower than that of solid wood at $5.73 \times 10^{-12} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$. The tangential coefficient of moisture expansion for the wood-adhesive interface was found to be $4 \times 10^{-3} \text{ mm} \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \%^{-1}$ and $3 \times 10^{-3} \text{ mm} \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \%^{-1}$ for the XPVAc. In the case of sugar maple, the tangential

shrinkage coefficient at $3 \times 10^{-3} \text{ mm}\cdot\text{mm}^{-1}\cdot\%^{-1}$ was slightly lower than the tangential expansion coefficient at $4 \times 10^{-3} \text{ mm}\cdot\text{mm}^{-1}\cdot\%^{-1}$.

A comparison of the experimental results, previous modeling results and improved model results are presented. The consideration of the interface effects did not have a significant influence on the hygromechanical distortion of engineered wood flooring. The determination of the diffusion coefficients confirmed the importance of the interface concerning the water vapor movement inside the composite material. However, improved model considering the interface effects was not closer to the experimental curve than the previous model without interfaces.

Avant-Propos

Ce projet a été rendu possible grâce à un partenariat entre FPInnovations-Division Forintek, le Groupe interdisciplinaire de recherche en éléments finis (GIREF) ainsi que le Centre de recherche sur le bois (CRB). Le présent travail a été rédigé dans le cadre du programme de maîtrise en sciences du bois et présenté sous la forme d'un mémoire de publication. Il a été conçu selon les critères de présentation adoptés par le comité des programmes de 2^{ième} et 3^{ième} cycles en sciences du bois de l'Université Laval, en juillet 1998. On y retrouve également un article scientifique en anglais présenté au chapitre II.

- Wood-Adhesive Interface Characterization and Modeling in Engineered Wood Flooring

Cet article a été accepté pour fins de publication à la revue scientifique *Wood and Fiber Science*.

Ce projet a été financé par le Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada (CRSNG) et FPInnovations-Division Forintek. À titre d'étudiant à la maîtrise, j'ai effectué la planification du travail, la préparation des échantillons, les essais en laboratoire et l'analyse statistique. J'aimerais remercier de façon particulière Alain Cloutier, directeur du projet et professeur à l'Université Laval, et Pierre Blanchet, codirecteur du projet et chef de groupe chez FPInnovations-Division Forintek, pour leurs judicieux conseils et leur contribution à ce projet. Cette collaboration m'a offert l'occasion de découvrir et d'apprécier le domaine de la recherche et du développement en sciences du bois.

Ce travail comporte un volet modélisation rendu possible grâce à notre collaboration avec le GIREF. J'aimerais remercier toute l'équipe ainsi que Jean Deteix, professionnel de recherche au GIREF, pour son aide précieuse lors de la portion de modélisation. Je remercie également Martin O'Connor et Tommy Martel, techniciens au département de Développement des produits à valeur ajoutée chez FPInnovations-Division Forintek. Merci à tous les membres du Centre de recherche sur le bois (CRB), Hexion specialty chemicals pour avoir fourni l'adhésif nécessaire à la fabrication des prototypes ainsi que toutes les personnes qui sont intervenues de près ou de loin à ce projet.

Cette étude m'a également offert l'occasion d'effectuer un stage à l'Universidad del Bio-Bio à Concepción au Chili. J'aimerais remercier tous les membres du département d'ingénierie du bois (DIMAD) ainsi que Mme Cecilia Bustos, responsable du programme, pour sa grande générosité et son aide précieuse lors de mon intégration en terre latine. Merci également à Alfredo Winterstein, technicien de laboratoire au DIMAD, pour ces nombreuses discussions et sa franche camaraderie.

J'aimerais finalement remercier ma mère, mes sœurs et tout particulièrement mon père pour avoir veillés sur moi durant toutes ces années.

À mon amour atomique

Table des matières

Résumé.....	ii
Abstract.....	iv
Avant-Propos.....	vi
Table des matières.....	ix
Liste des tableaux.....	xi
Liste des figures.....	xii
Introduction.....	1
Chapitre 1.....	3
Revue de littérature.....	3
1.1 Composition d'une lame de plancher d'ingénierie.....	3
1.1.1 Composant de surface.....	4
1.1.2 Substrat.....	4
1.1.3 Couche de contrebalancement.....	4
1.2 Mouvement de l'eau dans le bois et modélisation.....	4
1.3 L'érable à sucre.....	6
1.4 Phénomènes de transfert de masse.....	6
1.5 L'interface.....	7
1.6 Propriétés de diffusion.....	9
1.7 Acétate de polyvinyle réticulé.....	13
1.8 Considérations pour l'application du modèle.....	14
1.8.1 Considérations techniques mécaniques.....	14
1.8.2 Considérations physiques.....	17
1.9 Objectifs.....	18
1.10 Rétrospective méthodologique.....	18
1.10.1 Validation du modèle.....	18
1.10.2 Isolement de l'interface.....	19
1.10.3 Essais de diffusion préliminaire.....	23
1.10.4 Essais de diffusion.....	26
1.10.5 Essais d'expansion.....	28
1.10.6 Modélisation.....	30
Chapitre 2.....	32
Wood-adhesive interface characterization and modeling in engineered wood flooring.....	32
2.1 Abstract.....	32
2.2 Résumé.....	33
2.3 Introduction.....	34
2.4 Materials and methods.....	35
2.4.1 Specimen preparation.....	35
2.4.2 Experimental determination of the diffusion and expansion coefficients.....	37
2.4.3 Modeling approach.....	41
2.5 Results and discussion.....	45
2.5.1 Water vapor diffusion coefficient.....	45
2.5.2 Coefficient of moisture expansion.....	47
2.5.3 Modeling results.....	48
2.6 Conclusions.....	49

Conclusion	51
Bibliographie	53
Annexe I.....	57

Liste des tableaux

Tableau 1: Propriétés physiques des essences utilisées dans la confection de LPI.	5
Table 2: Parameters used in the model.	44
Table 3: Duncan's multiple comparison test for the diffusion coefficients, experimental diffusion coefficients and basic density (o.d. weight / green volume).	46
Table 4: Experimental expansion coefficient obtained for each section. Effective refers to the expansion coefficient of XPVAc adhesive which is isotropic.	47

Liste des figures

Figure 1: Structure d'une lame de plancher d'ingénierie en bois.....	3
Figure 2: Modèle de l'écoulement généralisé pour les feuillus (adapté de Siau, 1995).....	7
Figure 3: Structure d'un joint d'adhésif (adaptée de Cognard, 2004).....	9
Figure 4: Les axes principaux du bois (adapté de Bodig et Jayne, 1993).....	15
Figure 5: Courbe contrainte-déformation pour le matériau bois.....	16
Figure 6: Méthode de mesure de la distorsion.....	19
Figure 7: Butée employée pour effectuer le sablage.....	21
Figure 8: Film libre d'acétate de polyvinyle réticulé pur.....	22
Figure 9: Illustration de la méthode de la cellule de diffusion pour la mesure du taux de transfert de vapeur d'eau en régime permanent. L correspond à l'épaisseur de l'échantillon, en mètre; HR_1 et HR_2 représentent respectivement l'humidité relative de l'air ambiant et celle à l'intérieur de la cellule; H_1 et H_2 correspondent à la teneur en humidité d'équilibre en fonction des conditions hygroscopiques pour le matériau à l'étude.....	23
Figure 10: Cellule de diffusion utilisée lors de la détermination du taux de transfert de vapeur d'eau en régime permanent.....	25
Figure 11: Exemple de cellule de diffusion rejetée suite à un bris du joint d'époxy.....	28
Figure 12: Méthode de détermination du coefficient d'expansion.....	29
Figure 13: Structure of the engineered wood flooring considered in this study.....	36
Figure 14: Cabinet with assembled diffusion cups during diffusion tests.....	39
Figure 15: Schematic of the mesh used for the model including interfaces (grey) (left) and the original model from Blanchet et al (2005) (right). The mesh with interfaces from the surface layer to the backing layer with the number of layers of elements in parenthesis is presented as follows: Surface layer of sugar maple (3), sugar maple-XPVAc interface (2), XPVAc adhesive (2), XPVAc-white birch interface (2), Core layer of white birch (4), White birch-XPVAc interface (2), XPVAc adhesive (2), XPVAc-Yellow birch interface (2) and the backing layer of yellow birch (1).....	42
Figure 16: Experimental and calculated cupping deformation as a function of time considering actual RH variation in the conditioning room. Error bars represent the 95% confidence intervals from the experimental data points.....	48
Figure 17: Méthode de découpe pour la mesure du contenu en humidité des sections.....	57
Figure 18: Teneur en humidité des composantes en fonction du temps. Les barres d'erreur correspondent à l'écart-type expérimentale observée.....	58

Introduction

L'utilisation optimale de la matière ligneuse est un sujet d'actualité qui ébranle le secteur des produits forestiers au Québec. Les acteurs œuvrant dans le domaine de la transformation du bois proviennent dorénavant de partout à travers le monde. Des marchés fragmentés, un nombre grandissant de compétiteurs et des consommateurs qui disposent maintenant d'une vaste gamme de produits de qualité, souvent personnalisés et abordables, constituent de nouvelles réalités dans ce secteur. Dorénavant, tirer le maximum des ressources naturelles et du savoir-faire de l'industrie est un aspect primordial afin de demeurer compétitif. Les entreprises doivent s'adapter pour développer et mettre en marché de nouveaux produits plus rapidement que leurs compétiteurs. Les exigences des consommateurs obligent les fabricants à concevoir des produits répondant parfaitement aux besoins et attentes des clients (Anonyme, 2003a). Le développement de produits à valeur ajoutée se présente en ce sens comme une avenue intéressante.

Le développement de certains produits tels que les lames de plancher d'ingénierie (LPI) est fortement influencé par une approche qui consiste à copier une construction existante. Cette approche est donc le résultat d'essais et d'erreurs alors que la réduction des délais de développement est une préoccupation majeure pour ce secteur (Blanchet, 2004).

L'application de phénomènes de transfert de masse lors de la mise en service constitue un important aspect à couvrir afin de mieux comprendre le comportement des LPI. Ces éléments apparaissent essentiels pour supporter adéquatement le développement de ce secteur. Les méthodes numériques offrent la possibilité de répondre à certaines de ces questions. Celles-ci exigent par contre une connaissance approfondie des propriétés de chacune de ses composantes et de leurs interactions.

Le présent projet a pour objectif principal d'augmenter et de préciser les connaissances sur le comportement et les performances des LPI afin d'en accélérer le design. Pour atteindre cet objectif, deux approches ont été mises en place. Des prototypes ont été fabriqués en laboratoire et mis en service dans des conditions contrôlées afin d'acquérir les connaissances nécessaires à l'approche par modélisation. Celle-ci étant basée sur

l'utilisation des lois de la physique et de la mécanique du bois et mise en œuvre à partir de la méthode des éléments finis.

Ce projet s'avère la suite d'essais de simulation (Blanchet, 2004) visant à déterminer la déformation des LPI. Les résultats obtenus à l'époque ont permis de constater un manque de précision du modèle au niveau de l'interface bois-adhésif. Cette interface bois-adhésif aurait un rôle important lors de la diffusion de la vapeur d'eau à l'intérieur d'une construction de type LPI. Les propriétés physiques et mécaniques sont des aspects majeurs au moment de privilégier des matériaux lors de la confection. La variation de l'humidité relative, jumelée à une différence au niveau des coefficients d'expansion et de diffusion de chacun des matériaux, causent une déformation des LPI.

C'est en déterminant les paramètres nécessaires au modèle et en générant des profils de teneur en humidité par simulation que la ligne d'adhésif et les interfaces bois-adhésif sont apparues comme une barrière importante au mouvement de la vapeur d'eau dans les LPI. Cette situation est notamment due à de faibles coefficients de diffusion à la vapeur d'eau pour ces sections. Il en résulte un retrait ou un gonflement du composant de surface alors que les autres composants se déforment peu. Cette situation prévaut tant que les conditions de l'air ne changent pas. Dans la courbe de déformation en fonction du temps, la présence soutenue d'un gradient d'humidité à l'interface bois-adhésif se présente sous la forme d'un plateau. Cette situation se reflète lors des installations de LPI par l'apparition d'espaces entre les lames de plancher seulement au niveau des composants de surface et non pas sur toute l'épaisseur de la lame comme c'est le cas pour des lames de plancher en bois massif.

Actuellement, aucune étude exhaustive traitant de l'interface bois-adhésif n'est disponible dans la littérature. Certains auteurs reconnaissent l'existence d'une telle région mais ses propriétés demeurent encore peu connues. La détermination de ces paramètres s'avère un moyen efficace afin d'améliorer la précision du modèle. Ces manipulations offrent également l'occasion de développer des méthodes de caractérisation efficaces des phénomènes présents dans les LPI.

Chapitre 1

Revue de littérature

1.1 Composition d'une lame de plancher d'ingénierie

Une lame de plancher d'ingénierie (LPI) se compose d'une planchette de surface de grande qualité esthétique, d'un substrat et dans certains cas, d'une couche de contrebalancement. Les sections sont collées ensemble au moyen d'un adhésif généralement de type polyvinyle acétate (PVA) ou polyuréthane (PUR). Plusieurs autres adhésifs sont disponibles en fonction de la qualité d'assemblage désirée. La Figure 1 présente la structure générale d'une LPI. Les différentes composantes d'une LPI ont été définies par Blanchet (2004).

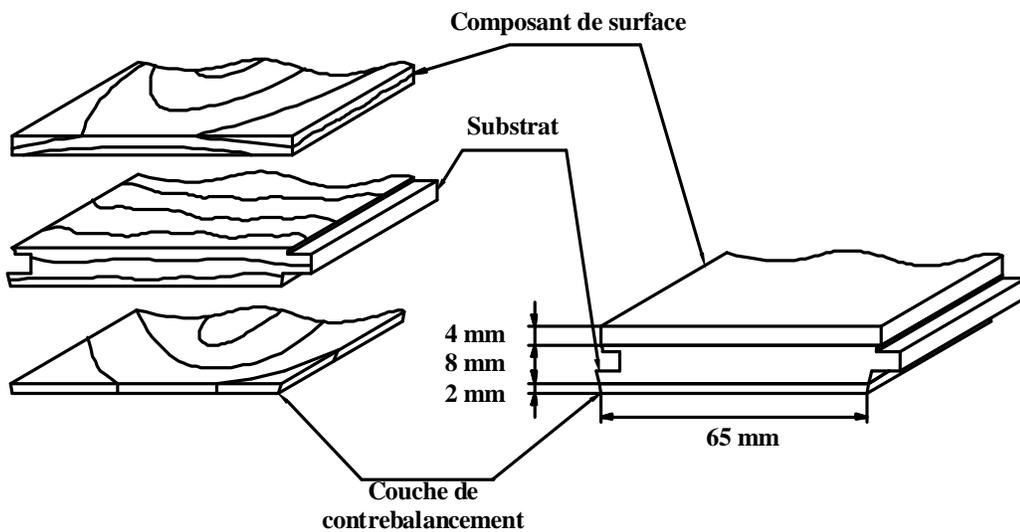


Figure 1: Structure d'une lame de plancher d'ingénierie en bois.

1.1.1 Composant de surface

Le composant de surface également identifiée comme la couche d'usure ou couche d'apparence, correspond à la portion visible à l'utilisateur. Son épaisseur représente la proportion de bois disponible au sablage en vue de la rénovation. Les couches de surface de 3 mm et plus sont généralement associées à des produits haut de gamme. La norme NF P 63-204-1 classe les types d'utilisation des parquets selon l'épaisseur de la couche d'usure. Aucune couche d'usure ne devrait avoir moins de 2 mm une fois poncée (AFNOR, 1997). Toutefois, nous retrouvons sur le marché des produits ayant des couches de surface allant jusqu'à 0,8 mm, ceux-ci ne permettant aucun rafraîchissement de la surface.

1.1.2 Substrat

Le substrat, aussi nommé couche de centre ou de cœur, permet d'obtenir l'épaisseur recherchée. Il peut être composé de baguettes de bois solide ou de composites du bois tels le contreplaqué, le panneau de particules ou le panneau de fibre haute densité (HDF). Cette couche vient contrer les déformations de la couche de surface et doit présenter une rigidité suffisante. La nature du substrat permet de situer le plancher d'ingénierie dans la gamme des produits offerts. Ainsi, un substrat de contreplaqué est généralement associé à une grande qualité sur le marché nord-américain, alors que les baguettes de bois se situent au bas de la gamme des produits offerts. On s'attend également de la couche centrale qu'elle se prête à l'usinage d'une languette de qualité.

1.1.3 Couche de contrebalancement

Cette section est optionnelle et plusieurs fabricants ne l'utilisent pas. Son usage est souvent lié à l'utilisation d'un substrat en baguette ou en composite autre que le contreplaqué. Elle est souvent utilisée pour rendre esthétiquement acceptable le dos des LPI. Son rôle de contrebalancement consiste à limiter la voilure dans les lames. Cette couche comporte souvent des cannelures à équidistance pour augmenter la flexibilité lors de l'installation.

1.2 Mouvement de l'eau dans le bois et modélisation

L'élément le plus important concernant la conception d'un modèle s'avère la connaissance approfondie des matériaux pour offrir des résultats reflétant bien la réalité. Les premiers essais de modélisation du mouvement de l'eau dans le bois lors du séchage remontent à

Sherwood (1929). Keey et al. (2000) présentent une revue exhaustive de modèles touchant le phénomène de la diffusion dans le bois.

Wadsö (1993) note que l'ampleur de la variation de l'humidité relative influence le phénomène de diffusion. Il en va de même pour l'épaisseur du matériau à l'étude et de sa résistance de surface. Certains phénomènes tels que l'hystérèse de sorption et la relation entre le contenu en humidité et la diffusion ont également un impact. Des restrictions liées à l'utilisation de solutions analytiques doivent également être prises en compte lors de la confection d'un tel modèle.

Actuellement, il est difficile d'isoler et d'analyser du même coup l'interface bois-adhésif que ce soit de façon mécanique, chimique ou électrochimique. Bien que ceci puisse nous mener à une meilleure compréhension de cette zone, plusieurs aspects fondamentaux liés à celle-ci demeurent invariablement insaisissables (Watts, 2005). Le tableau 1 présente certaines propriétés tirées de la littérature pour des essences à l'étude dans le cadre du présent projet. La densité basale correspond au rapport entre la masse d'un échantillon de bois sec et la masse du volume d'eau déplacé lorsque celui-ci est immergé.

Tableau 1: Propriétés physiques des essences utilisées dans la confection de LPI.

	Densité basale ¹ (Masse anhydre / Volume saturé)	Coefficient de retrait			Coefficient de diffusion de la vapeur d'eau		
		Radial mm•mm ⁻¹ •ΔH ⁻¹	Tangentiel mm•mm ⁻¹ •ΔH ⁻¹	Longitudinal mm•mm ⁻¹ •ΔH ⁻¹	D _r m ² •s ⁻¹	D _t m ² •s ⁻¹	² D _l m ² •s ⁻¹
Érable à sucre	0,597	⁴ 1,9 x 10 ⁻³	⁴ 2,8 x 10 ⁻³	⁴ 1,8 x 10 ⁻⁴	³ 1,8 x 10 ⁻¹¹	³ 1,8 x 10 ⁻¹¹	2,2 x 10 ⁻⁹
Bouleau blanc	0,506	¹ 1,7 x 10 ⁻³	¹ 2,4 x 10 ⁻³	¹ 1,5 x 10 ⁻⁴	² 4 x 10 ⁻¹¹	² 4 x 10 ⁻¹¹	2,2 x 10 ⁻⁹
Bouleau jaune	0,559	¹ 1,9 x 10 ⁻³	¹ 2,3 x 10 ⁻³	¹ 1,5 x 10 ⁻⁴	² 4 x 10 ⁻¹¹	² 4 x 10 ⁻¹¹	2,2 x 10 ⁻⁹

¹ Tiré de Jessome (2000)

² Estimé de Siau (1995)

³ Tiré de Blanchet *et al.* (2003)

⁴ Tiré de Goulet et Fortin (1975)

ΔH : différence de contenu en humidité des échantillons (%)

1.3 L'érable à sucre

L'érable à sucre (*Acer saccharum* Marsh.) est une essence prisée par le consommateur dans le domaine du revêtement de plancher en bois. Cette espèce à pores diffus présente de bonnes propriétés mécaniques et visuelles en raison de son grain et de ses cernes annuels peu apparents. En terme de volume, l'érable à sucre contient 21,0% de vaisseaux, 61,0% de fibres, 17,9% de parenchyme de rayon et 0,1% de parenchyme longitudinal (Panshin et de Zeeuw, 1980). Les vaisseaux de l'érable à sucre sont distribués de façon uniforme à l'intérieur des cernes annuels (Siau, 1995).

1.4 Phénomènes de transfert de masse

On reconnaît deux principaux phénomènes de transfert de masse dans le bois: le mode capillaire et la diffusion proprement dite. Le premier s'effectue sous l'influence d'un gradient de pression capillaire ou statique dans la structure du bois. Le terme perméabilité identifie le facteur de proportionnalité entre le flux du fluide et la force motrice. La diffusion se divise en deux modes: le transfert de vapeur d'eau ou gaz dans l'air contenue dans le lumen ou les ponctuations des cellules et celui se produisant à l'intérieur même des parois cellulaires du bois. La diffusion de l'humidité dans le bois est influencée par sa densité (Kollmann, 1951), l'état de sorption (Yokota, 1962 ; Comstock, 1963 ; Djolani 1970), la température, l'orientation du bois et sa teneur en humidité (Fournier, 1976). La Figure 2 présente le modèle de l'écoulement généralisé des arbres feuillus.

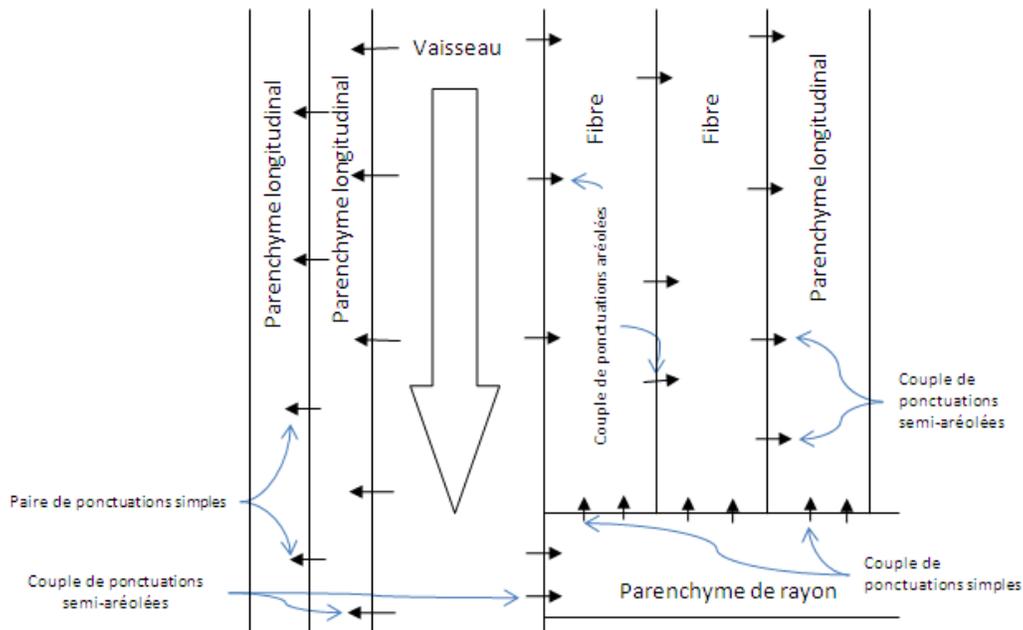


Figure 2: Modèle de l'écoulement généralisé pour les feuillus (adapté de Siau, 1995).

Les auteurs ayant abordé le phénomène d'hystérèse dans le bois ont conclu à un effet marqué pour ce qui est de la diffusion. À cet effet, Yokota (1962) a trouvé des coefficients de diffusion plus élevés dans du bois en désorption que dans du bois en adsorption. Hart (1964) attribue ces effets à un relâchement du squelette ligno-cellulosique. En adsorption, les molécules d'eau tendent à accroître la distance entre les chaînes de cellulose et d'hémicellulose qui elles résistent à un tel déplacement. Au contraire, en désorption, les chaînes de polymères qui sont déjà écartées gênent moins le mouvement des molécules d'eau qui est alors plus important. Selon Djolani (1970), l'hystérèse est un phénomène stable dont la boucle est relativement peu affectée par des oscillations de température ou de degré hygrométrique.

1.5 L'interface

La formation d'une connexion moléculaire entre un adhésif et son substrat est nécessaire quoique insuffisante pour établir un joint solide (Kinloch, 1987). De Leeuw (1983) mentionne que l'adhésif pénètre de quelques centièmes de millimètres pour justifier la force totale d'adhésion. Selon Adams (2005), la pénétration de l'adhésif dans les pores du bois

peut atteindre une profondeur allant de 15 μm à plus de 150 μm . La pénétration de l'adhésif avant la prise est influencée par sa viscosité, la pression exercée et le temps de pressage mais également par la porosité du substrat. De cette façon, des pores plus larges entraîneront une pénétration plus en profondeur. Lorsque le substrat présente des irrégularités à sa surface, il est possible que l'adhésif pénètre ces zones irrégulières avant la prise. Ceci peut s'avérer une explication plausible du lien mécanique créé avec le substrat.

Une fois toute l'eau comprise dans l'émulsion évaporée, l'adhésif alors solide devient partie intégrante du matériau composite. Une portion de l'adhésif se trouve alors inévitablement fusionnée avec le substrat. Selon Marra (1992), cette section est non négligeable malgré sa petite taille en comparaison avec le reste de la structure.

Le contact substrat-adhésif crée une zone endommagée au voisinage de la surface nommée interface (Figure 3). Selon Cognard (2004), ce sont les propriétés de l'interface qui conditionnent le comportement de l'assemblage, notamment la fiabilité et la durabilité des joints collés. Les propriétés de l'interface conditionnent également les propriétés du matériau composite. Le mélange solide-liquide, suite au contact des deux phases, vient créer une interface. Ce contact solide-liquide produit une fusion des deux phases qui s'accompagne de différentes réactions pour former l'interface. Ces régions superficielles ne seraient pas constituées de couches successives mais plutôt de petits îlots discontinus formant une surface hétérogène. Le caractère spontané de ce phénomène le rend toutefois difficile à maîtriser. Il semble y avoir différentes structures d'interface pour un même couple substrat-adhésif.

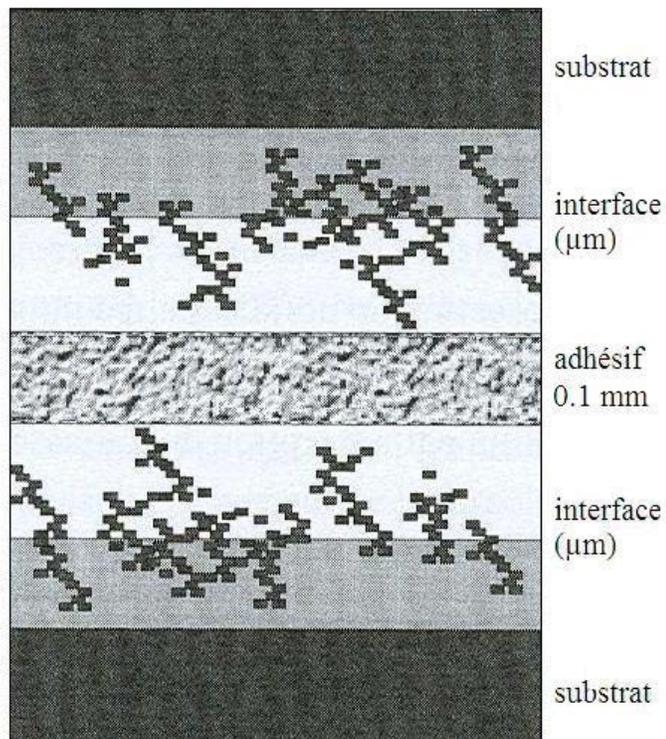


Figure 3: Structure d'un joint d'adhésif (adaptée de Cognard, 2004).

Schultz (1992) propose certaines distinctions selon le type d'interface. Un premier type serait d'origine physique suite au contact solide-liquide qui entraîne la cristallisation du polymère. La forme de cette nouvelle structure serait notamment fonction de la température, de la vitesse de cristallisation et de la surface de contact. On retrouve également l'interface d'origine physico-chimique issue de la migration de chaînes moléculaires de faible poids. Ce transfert vers l'interface entraînerait la création d'une couche affichant une cohésion relativement faible. Un dernier type est identifié comme étant l'interface d'origine chimique. Ce dernier serait le résultat de réactions catalysées à la surface ou aux ions dissous, produisant une interface composite sur la surface solide.

1.6 Propriétés de diffusion

La plupart des propriétés physiques de la matière ligneuse sont influencées par son contenu en humidité (Siau, 1995). L'eau se retrouve dans le bois sous deux formes: l'eau liée présente dans les parois cellulaires et l'eau libre ou capillaire située dans les cavités

cellulaires du bois. De façon générale, un équilibre s'établit entre le contenu en humidité du bois et l'humidité relative (HR) de l'air ambiant.

Les sources de contraintes au niveau du bois se divisent en trois catégories: les charges mécaniques qui s'expriment en terme de force, de moment ou de torsion; les contraintes causées par des variations de température; les contraintes occasionnées par des variations de teneur en humidité. La littérature démontre que les contraintes les plus sévères se développent entre le film d'adhésif et le composant de surface. Cette dernière, en contact avec l'air ambiant, réagit rapidement contrairement au reste de l'assemblage, créant alors un gradient de teneur en humidité (Blanchet, 2004).

HR de l'air ambiant à l'intérieur des maisons au Québec varie selon les saisons. En été, celle-ci atteint près de 85% alors que le bois adsorbe l'humidité de l'air, provoquant un gonflement des lames. En hiver, nous constatons la situation inverse si bien que l'air ambiant, avec une HR avoisinant 20%, entraîne du tuilage. Ces changements se produisent à des teneurs en humidité inférieures à 30% correspondant au point de saturation des fibres (PSF). Les implications d'un changement drastique en termes de teneur en humidité du bois ont été largement étudiées à travers la littérature (Vick, 1999). Ces changements peuvent entraîner la formation de contraintes qui causent soit le retrait ou le gonflement de la matière ligneuse.

Pizzi et Mittal (2003) notent que la ligne de colle se présente comme une barrière à la diffusion de la vapeur d'eau à l'intérieur d'un matériau composite. Cette région, affichant des propriétés mécaniques différentes du reste de l'assemblage, entraîne la formation d'un gradient de teneur en humidité dans le matériau composite. Pour une LPI, ce gradient occasionne une contrainte principalement dans la zone en contact avec l'air. Cette section, correspondant au composant de surface, adsorbe ou désorbe la vapeur d'eau à un rythme plus rapide que les couches subséquentes.

La ligne d'adhésif a fait l'objet d'études portant sur le mouvement de la vapeur d'eau à l'intérieur de produits à base de bois (Cognard, 2004). Pour des adhésifs de type époxy, la diffusion est dite réversible. Le gonflement ou retrait de l'adhésif est alors proportionnel à la quantité d'eau libre adsorbée ou désorbée se trouvant dans le bois. En tension, le volume

de l'adhésif augmente et permet alors d'adsorber une plus grande quantité d'eau. Selon Adams (2005), le gonflement de l'adhésif aurait comme impact d'en réduire l'élasticité le rendant plus ductile.

Durant son cycle de vie, un joint d'adhésif est affecté par la vapeur d'eau présente dans le substrat de bois ou le film d'adhésif. L'aspect poreux et perméable du bois offre ainsi un accès à la vapeur d'eau par les pores et ponctuations des vaisseaux vers la ligne d'adhésif chez les feuillus. Le joint collé devient alors sensible aux effets de l'humidité.

Lorsque la teneur en humidité de son environnement augmente, le film d'adhésif adsorbe de la vapeur d'eau. Ce phénomène se traduit alors par un gonflement du film d'adhésif. La distribution de la vapeur d'eau dans la ligne d'adhésif ne sera cependant pas totalement uniforme. De la sorte, le gonflement sera invariablement plus important près des surfaces exposées (Adams, 2005). En ce qui concerne les revêtements de plancher de bois, un tel changement de teneur en humidité peut provoquer un affaiblissement du joint de colle et des irrégularités au niveau du composant de surface.

L'épaisseur d'un film d'adhésif et le type de substrat affectent directement les propriétés finales de l'interface générée. Ces changements de propriétés se traduisent par une modification de sa densité et de sa structure chimique à la surface du substrat (Diebels et al, 2005). Ces interfaces seraient d'autant plus importantes à mesure que l'épaisseur du film diminue.

Un polymère se compare à une éponge de par ses chaînes moléculaires qui s'entremêlent les unes aux autres, formant des cavités pour le mouvement de l'air. La loi de Fick régissant la diffusion est généralement appliquée aux polymères ou joints collés (Comyn, 1985). Pour des applications reliées au bois, la première loi de diffusion de Fick est analogue aux lois de Fourier et Darcy et peut s'exprimer selon l'équation (1):

$$q_x = -D_x \frac{\partial C}{\partial x} \quad (1)$$

où q_x : flux en direction x, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$

D_x : coefficient de diffusion de vapeur d'eau en direction x, $\text{m}_w^2\cdot\text{s}^{-1}$

C : concentration en eau, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$

X : position, m

L'équation (1) peut être reformulée afin de déterminer le coefficient de diffusion de vapeur d'eau:

$$D = \frac{\left(\frac{W}{tA}\right)}{\left(\frac{\Delta C}{L}\right)} \quad (2)$$

où W/t : taux de transfert de vapeur d'eau, $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$,

A : aire de diffusion du spécimen, m^2 ,

L : épaisseur selon le flux de diffusion, m,

ΔC : différence de concentration en eau, $\text{kg}\cdot\text{m}_w^{-3}$.

La différence de concentration se calcule à partir de la différence de contenu en humidité lorsque appliquée au matériau bois alors que

$$\Delta C = \frac{(\rho_w G \Delta H)}{100} \quad (3)$$

où G : densité du bois (masse anhydre / volume saturé), $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$,

ρ_w : masse volumique de l'eau = $1000 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$,

ΔH : Gradient de teneur en humidité d'équilibre en fonction des conditions hygrosopiques du matériau, %.

Par substitution de 2 et 3, la formule devient

$$D = \frac{(100WL)}{(tA\rho_w G\Delta H)} \quad (4)$$

1.7 Acétate de polyvinyle réticulé

L'acétate de polyvinyle réticulé (XPVAc, Wonderbond© WB-957H par Hexion Specialty Chemicals) se présente sous la forme d'une émulsion à l'intérieur de laquelle de petits globules de résine sont en suspension dans l'eau. Cet adhésif thermoplastique s'avère intéressant dans le domaine des revêtements de plancher en bois où il est encore peu utilisé. Sa formulation permet aussi bien le pressage à chaud qu'à froid. Le pressage à froid n'affecte aucunement l'adhésif lorsque la température de presse est supérieure à 20°C (Anonyme, 2003b).

L'action de réticulation produite par l'addition de copolymères vinyliques ajoute une nouvelle fonctionnalité aux molécules principales. On retrouve sur ces copolymères des sites réactifs qui permettent une connexion intermoléculaire entre les chaînes de polymères. L'organisation de petites sections adjacentes interconnectées forme ainsi un réseau tridimensionnel. L'ajout de 3 à 10% en poids d'un catalyseur, également appelé durcisseur, à l'émulsion a pour effet de démarrer la réaction de réticulation. La formation de ce type de réseau peut être accélérée par l'ajout de chaleur. L'addition d'un potentiel réticulant à un adhésif de type PVA améliore la durabilité, la rigidité et la résistance au cisaillement du film d'adhésif une fois l'eau évaporée (De Leeuw, 1983). Marra (1992) note également que ce réseau réduit la mobilité de molécules individuelles en les rendant moins sensibles aux déformations causées par la chaleur et l'humidité.

La formation du joint de colle de type XPVAc s'effectue par évaporation de l'eau vers l'air ambiant ou encore le substrat. La cohésion optimale est atteinte lorsque la totalité de l'eau résiduelle a migrée hors de la ligne d'adhésif (Pizzi et Mittal, 2003). Au moment de la prise de l'adhésif, une pression suffisante est nécessaire pour assurer une bonne qualité

d'adhésion. Cette pression est fonction de la composition ou fluidité du produit mais également du matériel à coller. Pour une application commune, il est suggéré d'appliquer une pression de 0,69 à 1,03 MPa pour des essences de faible densité ou encore de 1,38 à 1,72 MPa pour des essences ayant une densité élevée (Marra, 1992). Le temps d'assemblage est relativement court et l'adhérence optimale est obtenue après 24 heures. Malgré une pégosité initiale faible, l'adhésif de type XPVAc procure un film de bonne qualité après seulement quelques minutes, dans certains cas, aussi peu que 5 minutes.

1.8 Considérations pour l'application du modèle

La modélisation par éléments finis est une méthode efficace pour étudier les effets hygromécaniques à l'intérieur des LPI. La méthode permet d'étudier en détail l'effet d'une contrainte appliquée à une structure et la déformation engendrée par celle-ci. La section analysée se voit divisée en sous-régions nommées éléments finis. Les bases de l'analyse s'appuient sur le théorème d'énergie potentielle stationnaire. À partir du moment où une charge est appliquée à une structure, cette dernière tente de minimiser l'énergie du système entier en se déformant. La déformation se traduit par un déplacement des nœuds liant les éléments. Les nœuds sont des points discrets localisés aux extrémités des éléments. Un nombre suffisant de nœuds et une géométrie appropriée des éléments permettent d'obtenir une approximation adéquate de la déformation provoquée par une contrainte (Adams, 2005). Il existe plusieurs types de contraintes différenciées selon les contraintes de cisaillement (τ) ou les contraintes directes (σ).

1.8.1 Considérations techniques mécaniques

La mécanique du bois se définit comme l'étude des relations entre les forces et les déformations appliquées au bois. Dû à l'anatomie et au mode de croissance de l'arbre, le bois peut être qualifié de matériau à fibres directionnelles avec des rayons ligneux perpendiculaires aux fibres, ce qui lui confère une structure de matériau composite anisotrope (Goulet et Laforest, 1974).

La plupart des espèces présentent une structure cellulaire orthotrope et hétérogène. Les origines biologiques du matériau bois font en sorte que ses propriétés diffèrent suivant les trois axes de symétrie. Les propriétés de la matière ligneuse sont associées à chacune de ces

directions, soit les directions longitudinale (L), radiale (R) et tangentielle (T) présentées à la Figure 4. Dans le domaine élastique, les changements dimensionnels sont liés de façon linéaire à un changement de teneur en humidité de l'environnement. Le domaine élastique est défini comme la partie linéaire de la courbe contrainte-déformation présentée à la Figure 5. Généralement, les phénomènes mécanosorptifs sont associés à cette courbe et plus particulièrement à l'échelle de la micromécanique (Bodig et Jayne, 1993).

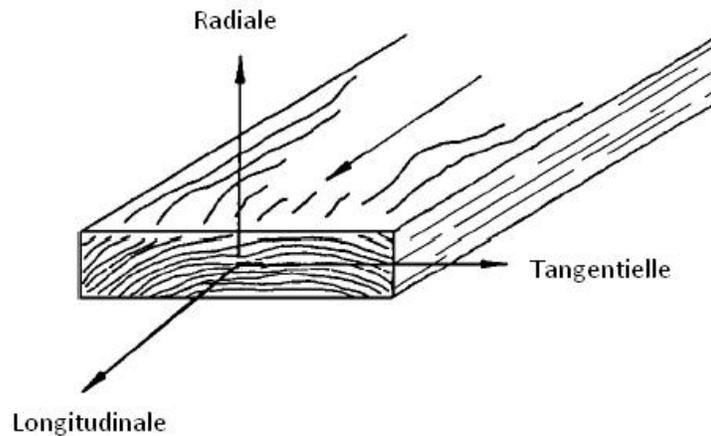


Figure 4: Les axes principaux du bois (adapté de Bodig et Jayne, 1993).

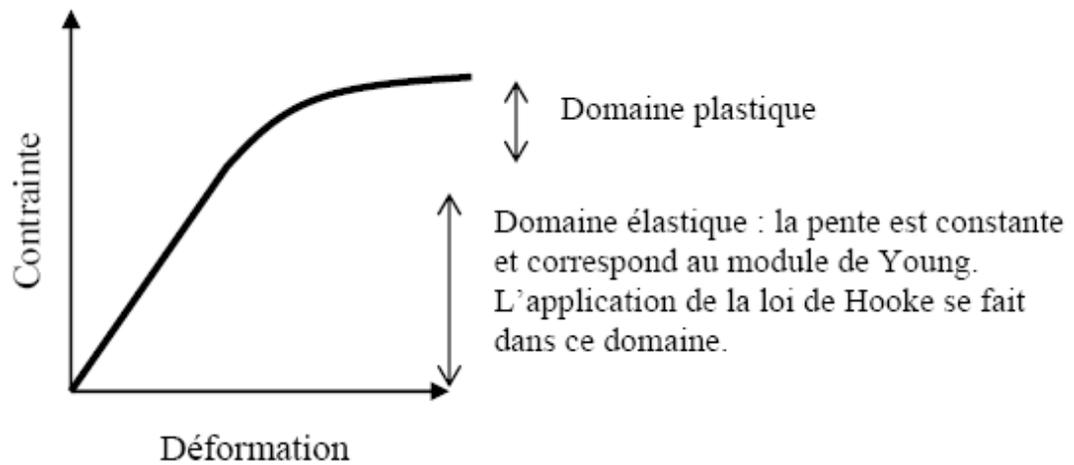


Figure 5: Courbe contrainte-déformation pour le matériau bois.

La généralisation de la loi de Hooke peut être exprimée comme une loi reliant toutes les composantes des contraintes à toutes les composantes de la déformation. Cette relation peut être exprimée de deux façons: la déformation (γ) comme une fonction linéaire de l'effort (σ) et des coefficients de souplesse (S) ou encore l'effort (σ) comme une relation linéaire de la déformation (γ) et des constantes élastiques (C) (Bodig et Jayne, 1993). Les deux formes de la loi de Hooke applicables au bois sont

$$\gamma_{ij} = S_{ijkl} \sigma_{kl} \quad (5)$$

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} \gamma_{kl} \quad (6)$$

La forme matricielle correspondant à la loi de Hooke utilise les constantes élastiques d'ingénierie. En considérant $S_{ij}=S_{ji}$, il est possible d'établir une relation entre les coefficients de Poisson et les modules d'élasticité pour limiter le nombre de coefficients à 9. Ceux-ci correspondent à des valeurs mesurables en laboratoire.

$$\begin{bmatrix} \gamma_1 \\ \gamma_2 \\ \gamma_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{13} \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & \frac{-\nu_{21}}{E_2} & \frac{-\nu_{31}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-\nu_{12}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & \frac{-\nu_{32}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-\nu_{13}}{E_1} & \frac{-\nu_{23}}{E_2} & \frac{1}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{23}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{13}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{12} \end{bmatrix} \quad (7)$$

où E : module d'élasticité, GPa

G : module de cisaillement, GPa

ν : coefficient de Poisson

σ_{ij} : contrainte, GPa

γ : déformation, m

1.8.2 Considérations physiques

Les transferts d'humidité dans le bois ont été souvent étudiés à l'aide de la loi de Darcy. Cette loi établit que le débit d'un liquide traversant un milieu poreux est proportionnel à la différence de pression appliquée. La validité de cette loi a été discutée par plusieurs auteurs notamment Comstock (1967) et Siau (1995).

Le domaine utilisé à l'intérieur du modèle par éléments finis est modifié afin de considérer la séquence de couches suivantes; bois, interface bois-adhésif, adhésif, interface adhésif-bois et bois. La modélisation est réalisée avec un code MEF++ du GIREF où les bases du modèle existent déjà.

1.9 Objectifs

Le présent projet a pour objectif général d'augmenter et de préciser les connaissances sur le comportement et les performances des LPI afin d'en accélérer le design. Les objectifs spécifiques de ce projet consistaient à déterminer les coefficients de diffusion et d'expansion à l'interface bois-polymères et l'impact du plan de colle sur les résultats de distorsion obtenus.

1.10 Rétrospective méthodologique

La section suivante se veut une méthodologie exhaustive du projet comparativement au chapitre 2, plus concis pour fins de publication.

1.10.1 Validation du modèle

Trente-cinq constructions de type LPI, comportant un composant de surface d'érable à sucre (*Acer saccharum* Marsh.) de 4 mm d'épaisseur, d'un substrat de baguettes de bouleau blanc (*Betula papyrifera* Marsh.) de 8 mm d'épaisseur sans espacement ainsi que d'une couche de contre-balancement de bouleau jaune (*Betula alleghaniensis* Britton) de 2 mm d'épaisseur, ont été préparées pour la validation du modèle. Un adhésif XPVAc a été appliqué à $0,269 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ tel que suggéré par le fabricant. Le pressage a été effectué à 1,72 MPa durant 5 minutes à 20°C. Des feuilles de papier à cuisson parchemin en silicone ont été utilisées afin de protéger les plaques de la presse d'un éventuel débordement d'adhésif.

Une fois délignées, les constructions affichaient une dimension de 82,5 mm de large et 600 mm de long. Au terme d'un conditionnement à 20°C et 50% HR, la teneur en humidité des constructions, déterminée par la méthode de séchage au four, était une de 8,6%. Les chants et le dos de chaque construction ont été scellés au moyen de silicone et de papier d'aluminium pour assurer un échange uniquement entre l'air ambiant et le composant de surface.

Les assemblages scellés ont finalement été transférés à des conditions de 20°C et 20% HR. L'évolution de la distorsion a été mesurée de façon régulière à cinq endroits sur chaque assemblage selon la méthode proposée par Blanchet et al. (2005) présentée à la Figure 6.

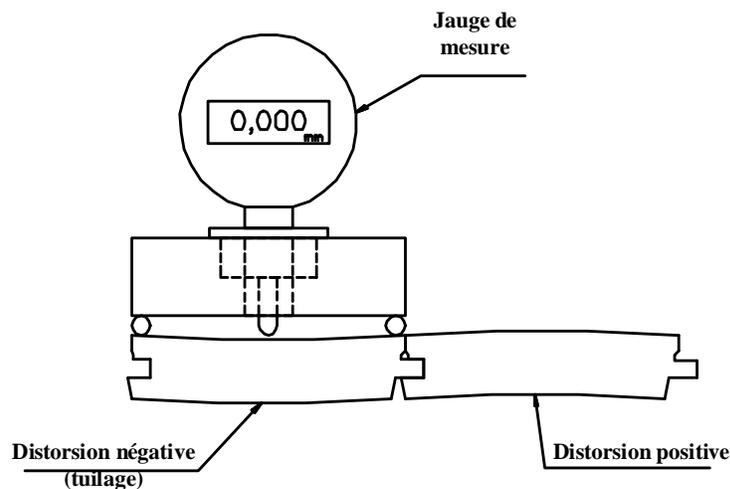


Figure 6: Méthode de mesure de la distorsion.

1.10.2 Isolement de l'interface

L'isolement de l'interface bois-adhésif constituait un point majeur relativement à la réussite du projet. Cette section devait être suffisamment mince pour refléter avec précision les propriétés de l'interface à l'étude. Une excellente qualité de surface exempte d'écrasement ou de dégradation de la fibre était primordiale.

Des composants de surface de 4 mm d'épaisseur, préalablement conditionnées à 20°C et 50% HR, ont été enduits de XPVAc à un taux de $0,135 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ sur une face à l'aide d'un rouleau applicateur. Seulement la moitié du grammage normalement recommandé par le fabricant a été utilisée ici. Dans ce cas spécifique, une seule surface pour imprégner l'adhésif explique la réduction du grammage. Les échantillons ont été subséquemment pressés aux conditions de validation.

Une scie circulaire à 12 dents de type raboteuse a d'abord été utilisée pour isoler l'interface bois-adhésif. Cette méthode n'offrait pas une interface d'épaisseur régulière et la qualité de surface obtenue ne répondait pas aux critères préétablis en raison de la formation de peluche.

Des essais ont également été effectués à l'aide d'une raboteuse de finition à coupe oblique Marunaka. Le copeau obtenu correspondant à l'interface isolée présentait une épaisseur uniforme de 0,3 mm mais avait toutefois tendance à s'enrouler. Ceci provoquait alors un écrasement de la fibre, risquant de fausser nos résultats lors des essais visant à déterminer le coefficient de diffusion.

Une méthode par ponçages successifs a finalement été retenue afin d'isoler l'interface bois-adhésif. Une ponceuse à bande large SCM Sandya 20 offrant une précision de sablage de l'ordre de 0,1 mm a permis d'isoler l'interface de façon satisfaisante sans dégrader la fibre de bois. Le grain des patins de la sableuse était respectivement de 100, 120 et 150. Au terme de plusieurs ponçages successifs de 0,1 à 2,0 mm, l'interface bois-adhésif isolée était transférée à 20°C et 50% HR.

La distance minimale entre les patins de la sableuse et le tapis d'avance étant de 5 mm, une butée construite à partir d'un panneau de fibre MDF de 5 mm d'épaisseur a été utilisée pour réaliser le sablage (Figure 7). Des trous de 12 mm de diamètre ont été percés dans la butée pour profiter de l'effet d'aspiration du tapis d'avance et éviter de perdre les échantillons dans le dépoussiéreur.

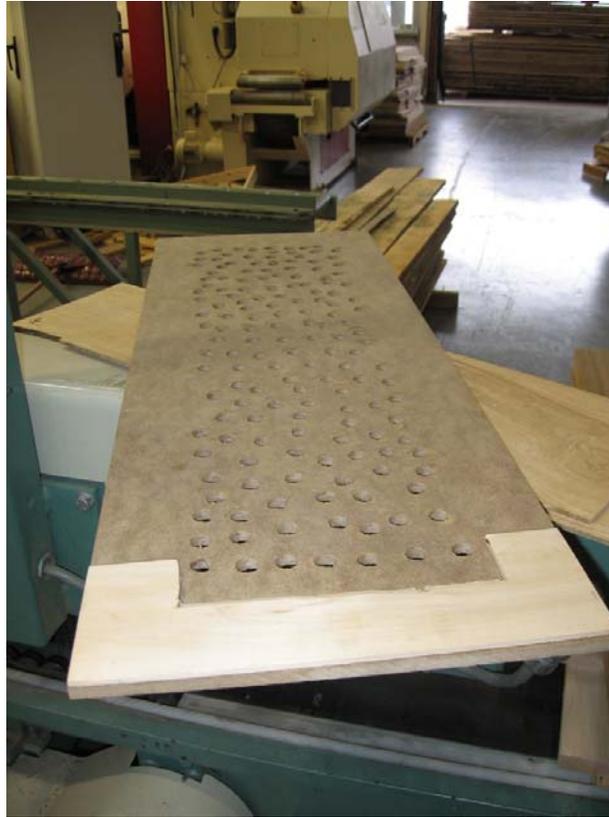


Figure 7: Butée employée pour effectuer le sablage.

Des essais additionnels ont été effectués pour obtenir un film libre de XPVAc pur. L'adhésif a été appliqué sur un substrat de polyéthylène de haute densité (HDPE) à $0,269 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$. Une pression minimale a été appliquée avec la presse pour assurer un contact suffisant entre les deux feuilles de HDPE. Au terme du pressage, l'adhésif en bordure polymérisait trop rapidement alors que de l'eau demeurait coincée au centre, empêchant la formation d'un film libre de qualité et de bonne dimension.

Une seconde tentative a été effectuée à l'aide d'un rouleau encolleur. Le rouleau encolleur a été passé sur une feuille de HDPE afin d'étendre uniformément l'adhésif XPVAc. L'adhésif et le substrat de HDPE ont ensuite été transférés à l'étuve pour une période de 30 minutes. Au terme de l'étuvage, le film a été prélevé du substrat de façon manuelle. La variation d'épaisseur causée par l'application au rouleau a entraîné la formation de sillons et de petites bulles d'air dans le film. Ces bulles d'air et sillons posaient un problème pour

la détermination de nos coefficients. Des essais similaires sans passage à l'étuve ont également été pratiqués avec des résultats comparables.

Finalement, l'application de la PVA sur une plaque antiadhésive a permis d'obtenir un film uniforme libre de bulles d'air. Un vibro-graveur produisant une légère vibration sur les parois de la plaque a permis de libérer les bulles d'air présentes dans l'adhésif avant un séchage à l'air. La méthode était relativement rapide, efficace et offrait une régularité au niveau de l'épaisseur de l'ordre de 0,3 mm. Les échantillons ont finalement été découpés à l'aide d'un poinçon (Figure 8).

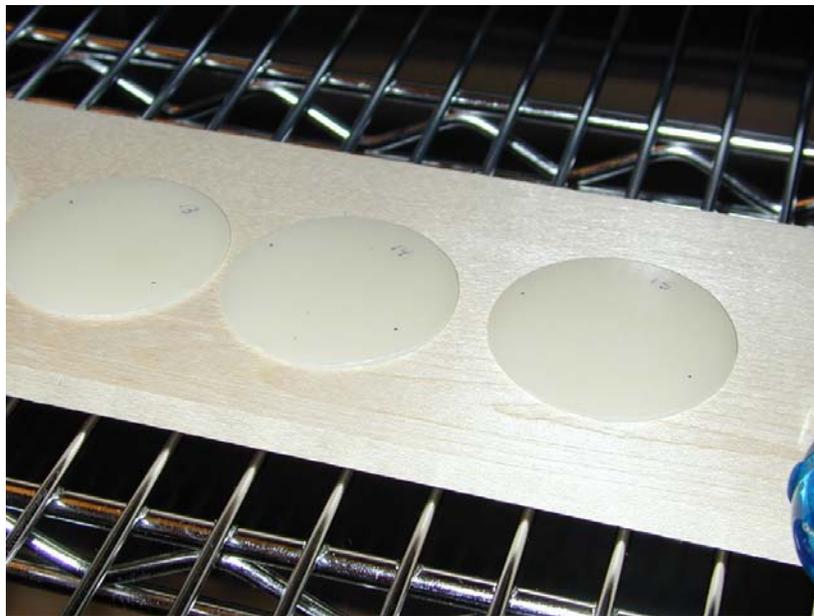


Figure 8: Film libre d'acétate de polyvinyle réticulé pur.

1.10.3 Essais de diffusion préliminaire

La méthode du vaporimètre ou cellule de diffusion (Vapor cup ou Payne cup), est largement mentionnée à travers la littérature (Stamm, 1956; Hart, 1964; Comstock, 1963; Choong, 1965; Mackay, 1971; Siau, 1995). Celle-ci consiste à peser une cellule de façon répétitive jusqu'à ce que la perte de poids soit une fonction linéaire du temps. On atteint alors le régime permanent recherché pour l'application des équations. Cette méthode permet d'obtenir le taux de transfert de vapeur d'eau afin de déterminer le coefficient de diffusion. Sur la Figure 9, le terme L correspond à l'épaisseur de l'échantillon à l'étude, en mètre; HR_1 et HR_2 représentent respectivement l'humidité relative de l'air ambiant et celle à l'intérieur de la cellule de diffusion soit 30% et 100%; H_1 et H_2 correspondent à la teneur en humidité d'équilibre en fonction des conditions hygroscopiques pour le matériau à l'étude ici 6% et 30%.

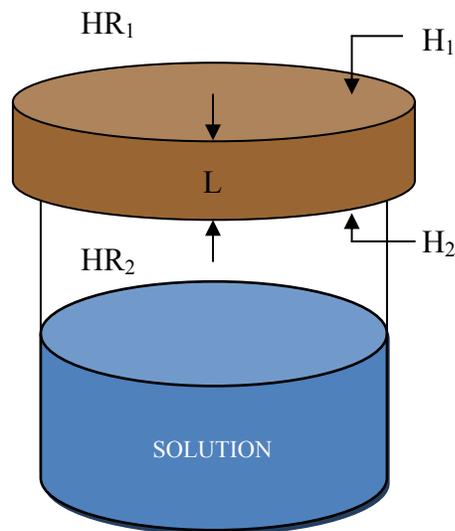


Figure 9: Illustration de la méthode de la cellule de diffusion pour la mesure du taux de transfert de vapeur d'eau en régime permanent. L correspond à l'épaisseur de l'échantillon, en mètre; HR_1 et HR_2 représentent respectivement l'humidité relative de l'air ambiant et celle à l'intérieur de la cellule; H_1 et H_2 correspondent à la teneur en humidité d'équilibre en fonction des conditions hygroscopiques pour le matériau à l'étude.

Une fois l'interface isolée, un problème consiste à trouver une façon adéquate pour fixer l'interface sur la cellule de diffusion. Le pot à conserve est apparu comme une option intéressante en raison de sa petite taille et de son faible coût à l'achat. La méthode devait assurer un transfert de vapeur d'eau uniquement à travers l'interface bois-adhésif et non à la jonction de cette dernière et de la cellule de diffusion. Des essais préliminaires ont été effectués pour trouver une façon étanche et apte à maintenir en place l'interface malgré une distorsion éventuelle du spécimen. Les forces occasionnées par la distorsion du matériau bois étant non négligeables, celles-ci risquaient d'entraîner un bris de la cellule ce qui annulerait l'essai. Les matériaux pour l'étude d'étanchéité ont été le ruban téflon, le film de parafilm, de la colle époxy, du ruban butyle adhésif ainsi que du papier adhésif recouvert d'un côté par une bande d'aluminium.

Les pots et couvercles ont été préalablement nettoyés à l'acétone pour éliminer toutes traces de résidus nuisibles à l'étanchéité de la cellule. Des couvercles d'aluminium, au centre desquels un trou de 41,5 mm de diamètre a été préalablement usiné, venaient couvrir la cellule. La périphérie supérieure du couvercle a été sablée à la main avec un papier sablé de grain 220 pour favoriser l'adhésion.

Du ruban téflon a été enroulé sur la portion de verre filetée des pots. Cinquante ml d'eau distillée a ensuite été versée dans la cellule; l'eau distillée donnant un degré hygrométrique (HR) de 100% pour une température de 20°C (Schneider, 1960). La cellule de diffusion contenant l'eau distillée et le couvercle ont enfin été scellés à la main au moyen d'une bague (Figure 10).



Figure 10: Cellule de diffusion utilisée lors de la détermination du taux de transfert de vapeur d'eau en régime permanent.

Des tests d'étanchéité ont été effectués au moyen de ruban adhésif d'aluminium recouvrant l'aire de diffusion sur le couvercle et collée au moyen d'adhésif époxy. L'objectif ici étant de s'assurer de l'étanchéité des parois de la cellule. Des essais additionnels ont également été effectués en substituant le ruban téflon par de l'adhésif époxy. Finalement, la bague permettant de sceller le couvercle a été fixée solidement pour joindre hermétiquement le couvercle d'aluminium au rebord de verre de la cellule de diffusion.

Les cellules de diffusion ont été préalablement conditionnées à 20°C et 80% HR. Les essais préliminaires ont été d'une durée de 696 heures à 20°C et 50% HR. Les cellules de diffusion composées de ruban téflon et d'adhésif époxy ont offert le meilleur rendement en termes d'étanchéité.

Les conditions recherchées exigeaient un état de diffusion en régime permanent et non pas un flux hydrodynamique tel que nous retrouvons en séchage du bois. La vitesse mesurée à l'aide d'un anémomètre était de 0,5 m/sec ce qui était convenable. Une fois la cellule de diffusion en équilibre avec l'environnement, il a été possible de déterminer le taux de transfert en régime permanent.

1.10.4 Essais de diffusion

Les essais de diffusion comprenaient des spécimens d'érable à sucre, de l'adhésif XPVAc ainsi que de l'interface bois-adhésif composée du substrat d'érable à sucre et d'adhésif XPVAc. En ce qui concerne l'interface bois-adhésif, une portion des échantillons a été fixée à la cellule avec la surface de bois en contact avec l'air humide (~100% HR) et la XPVAc en contact avec l'air ambiant. Les autres échantillons ont été assemblés en sens inverse afin d'observer leur comportement respectif. Une hypothèse de départ était que la face de XPVAc en contact avec l'air humide (~100% HR) préviendrait le craquement du bois.

L'épaisseur des spécimens a été mesurée à l'aide d'un pied à coulisse numérique à $\pm 0,01$ mm selon la norme ASTM D 1005 (1995a). Chaque film a ensuite été collé sur un couvercle, préalablement sablé avec un papier de grain 220, au moyen de colle époxy. Le montage a par la suite été placé à l'air libre durant 24 heures pour permettre la prise de l'adhésif. Un poids a été déposé sur le montage pour s'assurer que le spécimen demeure en place durant la prise de l'adhésif. Par la suite, le couvercle comprenant le spécimen collé et couvrant l'aire de diffusion a été fixé au pot à conserve contenant 50 ml d'eau distillée.

Afin d'assurer des conditions stables où les fluctuations étaient minimales, les cellules ont été placées dans des mini-chambres elles mêmes dans une grande chambre climatique. Les conditions à l'intérieur des mini-chambres ont été maintenues à l'aide d'une solution saturée d'acétate de potassium ($KC_2H_3O_2$) procurant une humidité relative de l'air de 30% à 21°C. La solution saturée offrait un gradient d'humidité élevé entre l'air ambiant et la cellule de diffusion pour maximiser le transfert de vapeur d'eau. Les conditions de la grande chambre étaient de 21°C et 27% HR alors qu'elles étaient de 21°C et 30% HR pour les mini-chambres. Un dispositif a permis d'enregistrer sur une base continue les conditions de celles-ci. Le poids des cellules était noté sur une base régulière. Une balance analytique à proximité de la chambre a permis de prévenir les chocs thermiques ou hygroscopiques aux cellules lors des pesées.

La densité basale (d_b), nécessaire à la détermination du coefficient de diffusion, a été déterminée par immersion dans l'eau. Les échantillons ont été préalablement conditionnés à

21°C et 80% HR puis submergés dans l'eau. La masse anhydre (M_0) a été obtenue par pesée suivant un passage à l'étuve pour une période de 24 heures. M_0 du film libre de XPVAc pur a été déterminée au terme d'un séchage sous vide (-30 in. Hg) durant 24 heures à 20°C. Le volume saturé (V_s) pour les échantillons d'érable à sucre a ensuite été déterminé à partir de données tirées de Goulet et Fortin (1975).

En raison de contraintes temporelle et logistique, la diffusion a été déterminée uniquement en mode désorption. L'orientation du fil du bois ainsi que sa densité ont fait l'objet d'une attention particulière pour assurer l'homogénéité de nos résultats. Les spécimens utilisés pour les essais de diffusion ont été sélectionnés avec soin sans présence de nœuds ou autres éléments pouvant altérer les résultats.

La répartition finale se divisait ainsi soit 22 échantillons pour l'interface bois-adhésif, 14 échantillons pour le XPVAc et 7 échantillons comparatifs pour l'érable à sucre. Des 22 échantillons d'interface bois-adhésif, 16 échantillons ont été préparés avec l'adhésif XPVAc en contact avec des conditions hygroscopiques de 100% HR et 6 où le XPVAc était en contact avec l'air ambiant à 30% HR. Cette différenciation visait à confirmer ou infirmer que la PVA en contact avec les conditions hygroscopiques de 100% HR préviendrait la distorsion des échantillons. Le mouvement de l'eau à travers la matière ligneuse entraînant la formation de contraintes pouvant entraîner une séparation du lien de colle époxy (Figure 11).



Figure 11: Exemple de cellule de diffusion rejetée suite à un bris du joint d'époxy.

1.10.5 Essais d'expansion

Les spécimens utilisés pour la détermination du coefficient d'expansion avaient 150 mm selon le sens longitudinal et 50 mm selon le sens tangentiel. L'épaisseur des échantillons était équivalente à celle des essais de diffusion soit 0,3 mm. Quatre repères permettaient de mesurer les variations de dimension suivant un cycle de conditionnement. La distance initiale des repères sur l'axe longitudinal était de 100 mm et de 45 mm sur l'axe tangentiel. Pour l'adhésif XPVAc, l'échantillon avait un diamètre de 50 mm et deux repères à 40 mm de distance. Cette variante s'explique par le caractère homogène et isotrope du film libre de XPVAc pur.

La méthode de détermination du coefficient d'expansion devait permettre de mesurer correctement la déformation des spécimens malgré la distorsion. L'impact de l'hystérèse a également été pris en compte. L'utilisation d'une plaque d'aluminium sur laquelle une feuille de plexiglass a été fixée au moyen de vis a permis de bien déployer les spécimens sans les endommager (Figure 12).



Figure 12: Méthode de détermination du coefficient d'expansion.

Une première option qui a été envisagée consistait à utiliser une loupe binoculaire ou vernier (Gaertner). Cette méthode offre une précision de $\pm 0,001$ mm. Par contre, pour une distance donnée, la mesure obtenue dans une direction ne correspondait pas exactement à la mesure obtenue au retour. La méthode était également fastidieuse vu la grande quantité de matériel à l'étude et a donc été rejetée.

Les mesures ont finalement été obtenues avec un microscope installé sur un système mobile à deux axes (Multicheck PC 500). Cet appareil, utilisé en usine de sciage afin de mesurer avec précision certaines caractéristiques des scies, offre l'avantage de mesurer aisément des distances selon un plan en deux dimensions. Il a également été possible de prendre des photos numériques facilitant la prise de mesures. Les essais préliminaires ont démontrés une précision de l'ordre de $\pm 0,001$ mm.

Les spécimens ont été préparés et équilibrés à 21°C et 80% HR. Les distances entre les repères ont été mesurées puis les spécimens ont été transférés à 21°C et 27% HR. Une fois l'échantillon à l'équilibre à nouveau, les spécimens ont été mesurés à nouveau. Les éprouvettes étaient ensuite retournées à 21°C et 80% HR pour l'obtention des coefficients d'expansion en adsorption. Pour l'ensemble des manipulations d'expansion, les

échantillons ont été soumis à des cycles d'équilibrage de 72 heures. Cette période a été déterminée suite à des essais préliminaires par pesée quotidienne.

Quinze éprouvettes de l'interface bois-adhésif, 15 pour le film libre de XPVAc pur et 14 pour l'érable à sucre ont été préparées. Un échantillon pour l'érable à sucre a été endommagé lors des manipulations.

Le coefficient d'expansion (CE) a été déterminé grâce la formule suivante:

$$CE = \frac{L - L_0}{L_0 \Delta H} \quad (8)$$

où L_0 : longueur à 27% HR, mm,

L : longueur à 80% HR, mm,

ΔH : différence de contenu en humidité des échantillons, %.

1.10.6 Modélisation

L'équation gouvernante qui permet de modéliser l'aspect mécanique de notre problème est une équation d'équilibre tridimensionnelle. L'équation 9 exprime cette condition :

$$\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} = 0 \quad (9)$$

où σ_{ij} correspond aux composantes de stress normal et cisaillement exprimées à l'intérieur d'un système de coordonnées rectangulaires. Cet état d'équilibre est modifié lorsqu'une contrainte est introduite. L'application de la loi de Hooke (équation 10) et de l'équation de transfert d'humidité en régime transitoire est possible en posant comme état d'équilibre de départ l'équation 9 :

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} (\varepsilon_{kl} - \beta_{kl} \Delta M) \quad (10)$$

où C_{ijkl} : matrice de rigidité exprimée en fonction des constantes élastiques; ε_{kl} : composantes de stress normal et cisaillement; β_{kl} : coefficients d'expansion hygroscopique (retrait/gonflement); ΔM : variation de teneur en humidité du bois.

Les contraintes se traduisent par une déformation qui se traduit par des déplacements u_1 , u_2 et u_3 suivant les directions x_1 , x_2 et x_3 respectivement :

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (11)$$

Dans le présent travail, la contrainte était imposée par une variation de la teneur en humidité du bois. Cette variation de la teneur en humidité du bois provient de la nature hygroscopique du bois qui tend à atteindre un nouvel état de teneur en humidité d'équilibre lorsque assujetti à de nouvelles conditions hygrométriques. Le mouvement de la vapeur d'eau est décrit par l'équation tridimensionnelle suivante :

$$\frac{d_b}{100} \frac{\partial M}{\partial t} + \vec{\nabla} \bullet (-K_M \vec{\nabla} M) = 0 \text{ avec } K_M = \frac{D d_b}{100} \quad (12)$$

où K_M : coefficient de diffusion effective ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \%^{-1}$); t : temps (s); M : contenu en humidité (%); D : coefficient de diffusion ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$); et d_b : densité basale ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$).

Chapitre 2

Wood-adhesive interface characterization and modeling in engineered wood flooring

2.1 Abstract

Adhesive films used in layered wood-based composites have a significant impact on moisture movement and must be considered in models of such products. The objective of this study was to characterize the wood-adhesive interface and determine its impact on engineered wood flooring (EWF) hygromechanical behavior. The radial water vapor diffusion coefficient and the coefficients of moisture expansion were determined for sugar maple wood, cross-linked polyvinyl acetate adhesive film (XPVAc), and the wood-adhesive interface. Sugar maple wood had the highest diffusion coefficient at $1.66 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, followed by the wood-adhesive interface at $5.73 \times 10^{-12} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ and the free XPVAc film at $4.18 \times 10^{-12} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$. The coefficient of tangential moisture expansion of the sugar maple wood-adhesive interface was found to be $4 \times 10^{-3} \text{ mm} \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \%^{-1}$, compared to $3 \times 10^{-3} \text{ mm} \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \%^{-1}$ for sugar maple wood in the tangential direction and $3 \times 10^{-3} \text{ mm} \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \%^{-1}$ for the XPVAc film. Finite element modeling of EWF hygromechanical cupping did not show significant differences between hygromechanical cupping calculated with and without interface effects.

2.2 Résumé

Les films d'adhésifs présents dans les matériaux composites ont un impact significatif sur le mouvement de la vapeur d'eau et doivent être considérés lors de la modélisation de tels produits. L'objectif de la présente étude consistait à caractériser l'interface bois-adhésif et en déterminer son impact sur les propriétés hygromécaniques d'une lame de plancher d'ingénierie (LPI). Le coefficient de diffusion de vapeur d'eau en direction radiale et les coefficients d'expansion ont été déterminés pour une interface d'érable à sucre (*Acer saccharum* Marsh.) et d'un acétate de polyvinyle réticulé (XPVAc). L'érable à sucre a affiché le coefficient de diffusion le plus élevé à $1,66 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, suivi par celui de l'interface bois-adhésif à $5,73 \times 10^{-12} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ et le film libre de XPVAc à $4,18 \times 10^{-12} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$. Le coefficient d'expansion tangentiel pour l'interface bois-adhésif étaient de $4 \times 10^{-3} \text{ mm} \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \%^{-1}$, comparativement à $3 \times 10^{-3} \text{ mm} \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \%^{-1}$ pour l'érable à sucre en direction tangentielle et $3 \times 10^{-3} \text{ mm} \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \%^{-1}$ pour le film libre de XPVAc. La modélisation de la distorsion hygromécanique des LPI par la méthode des éléments finis n'a pas permis d'observer une différence significative en ce qui concerne la distorsion hygromécanique calculée avec ou sans l'effet d'interface.

2.3 Introduction

The US market sales for hardwood flooring represented 1.03 billion square feet in 2006 according to Floor Covering Weekly (Anonyme, 2007). The same source recently reported growths of hardwood flooring in term of volume (3.0%) and sales (7.1%) over the last five years. Cortelyou (2005) mentions that engineered wood flooring (EWF) accounts for 34% of the US market measured in dollars, and it is clearly taking market shares from hardwood flooring. In Europe, a market review performed by the European Federation of the Parquet Industry (Anonymous 2006) shows that this market represents 1.184 billion square feet in 2005. An interesting fact compared to North America is the preference of Europeans for EWF (82%) over solid wood (16%). In the competitive global market, the design of innovative and efficient products is now essential. Research and development costs are significant in EWF development. The product designer must ensure that new products meet high quality standards to maintain the manufacturer's reputation and avoid costly claims. The availability of efficient tools to evaluate the performance of a product could help to select proper components. Numerical approaches such as the finite element method can help reduce design time and the number of prototypes to manufacture.

Previous work (Blanchet et al 2005) demonstrated that distortion in EWF is the result of a transient phenomenon. A non homogeneous moisture transfer in EWF results in cupping distortion. A high moisture content gradient in the surface layer is responsible for cupping distortion due to shrinkage of the surface layer when the underlying layers do not shrink. The physical properties of most wood species and a few adhesives are available in the literature but limited data can be found for the wood-adhesive interface. It appears that this interface has a significant impact on moisture diffusion inside the composite, acting as a barrier to water vapor diffusion. In this regard, Pizzi and Mittal (2003) mentioned that the adhesive line can be presented as a water vapor diffusion barrier, responsible for the development of moisture gradients inside the composite. In EWF, this gradient causes a stress essentially located in the hardwood surface layer which is conditioned by the ambient air, whereas the core and backing layers absorb or desorb water vapor at a much slower rate.

The adhesive film thickness and the type of substrate used determine the properties of the interface obtained. Important properties of both components are modified, notably stiffness in static bending and water vapor diffusion. These interfaces would also become more important as the film thickness decreases as mentioned by Diebels et al (2005). A complete and satisfying microscopic interpretation of the interface is not available in the literature, not only because of the complexity of the interface formation but also the difficulty to isolate and analyze it. One can assume that the interface properties follow a rule of mixture between the properties of wood and adhesive as was done by Deteix et al (2008) but this must be verified.

The purposes of this study were to determine the water vapor diffusion and expansion coefficients of the wood-adhesive interface and use it into an existing model of the hygromechanical behavior of EWF.

2.4 Materials and methods

2.4.1 Specimen preparation

The adhesive used in this work was a cross-linked polyvinyl acetate (PVA) emulsion (XPVAc, Wonderbond© WB-957H from Hexion Specialty Chemicals, Inc.). This cold set adhesive provides good gluing performance at a moderate price and is an interesting option for EWF manufacturing. Following reticulation, such an emulsion type PVA provides good durability and creep resistance (De Leeuw 1983). This adhesive may be used for cold set applications where the temperature of the substrate is above 20°C (Anonymous 2003). The reticulating agent allows the formation of small molecular units adjacently interconnected to form a three-dimensional network of macroscopic size. The new network provides a better rigidity to the adhesive film after evaporation of water, reducing also the mobility of individual molecules by reducing their sensitivity to the deformations caused by heat or moisture.

Thirty-five EWF strips composed of a 4 mm-thick sugar maple (*Acer saccharum* Marsh.) plain sawn surface layer, a 8 mm-thick white birch core layer and a 2 mm-thick yellow birch veneer as backing layer were built for model validation purposes (Fig 13). All wood components were previously conditioned to 20°C and 50% relative humidity (RH) until

equilibrium was reached. The flooring strips were bonded by cold pressing with XPVAc emulsion. The adhesive spread rate was $0.269 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ as suggested by the manufacturer. The pressure applied was 1.72 MPa for 5 min at 20°C . The final dimensions of the EWF strips were 82.5 mm wide and 600 mm long. The strips were placed inside a conditioning room at 20°C and 50% RH until equilibrium was reached. The moisture content (MC) of the conditioned EWF strips was 8.6%.

The sample strips were then sealed with silicone and aluminum foil on their edge and backing layer to ensure a restricted moisture transfer from the surface layer only. The strips were then exposed to 20°C and 20% RH. The top surface of each strip was in direct contact with the ambient air. The distortion was measured as a function of time. Distortion measurements were performed at five marked locations on each strip with a dial gauge as described by Blanchet et al (2005).

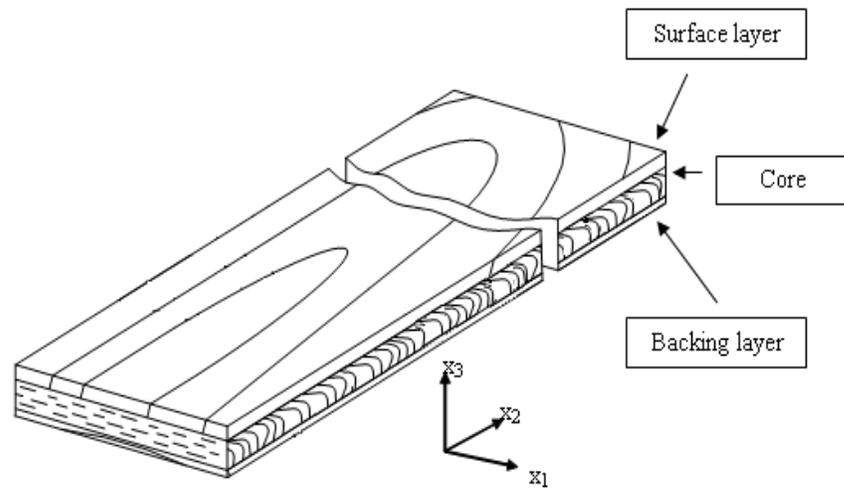


Figure 13: Structure of the engineered wood flooring considered in this study.

2.4.2 Experimental determination of the diffusion and expansion coefficients

2.4.2.1 Diffusion coefficient

Fick's first law of diffusion applied to moisture diffusion in wood can be rearranged in the following form to determine the water vapor diffusion coefficient (Siau 1995):

$$D = \frac{\Delta w L}{\Delta t A \rho_w G \left(\frac{\Delta MC}{100} \right)} \quad (13)$$

where D : coefficient of moisture diffusion, $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$; $\Delta w / \Delta t$: water vapor flow, $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$; A : cross-sectional area of specimen normal to the direction of flow, m^2 ; L : length in the flow direction, m ; ρ_w : normal density of water ($1\,000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$); G : specific gravity of wood at the average moisture content; ΔMC : moisture content difference across specimen thickness, %. In this equation, the expression $\rho_w G$ can be expressed as the basic density assuming that wood is a stable porous material and that ρ_w and G are constant.

The water vapor diffusion coefficient was determined for three types of material: hardwood sugar maple thin sample (0.3 mm-thick), XPVAc adhesive film (0.6 mm-thick) and wood-adhesive interface made of sugar maple impregnated with XPVAc (0.3 mm-thick). The following procedures were followed to prepare the samples. A representative specimen of the wood-adhesive interface was obtained from a sugar maple strip coated with XPVAc. Strips of sugar maple were flat-sawn as it is the case in EWF manufacturing. The adhesive was applied with a roller coater at $0.135 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ on top of each strip. Only half of the adhesive application rate used for the EWF strips made for validation purposes was used because there was only one surface of the strip to impregnate in that specific case. The thin sugar maple samples were then placed between two silicone parchment pan liners and pressed under the same conditions as for the EWF strips made for validation purposes. Following a curing of 24 hours, the pure wood side of the strip was sanded with an industrial belt sander (Sandya 20 by SCM) to obtain a 0.3 mm-thick thin sample measured

with a digital micrometer at ± 0.01 mm according to the ASTM D 1005-95 standard. A thickness of 0.3 mm was the lowest we were able to obtain with this equipment. A three step grit sanding program (100-120-150) was used to minimize damage to the surface. de Moura (2006) investigated the quality of a sanded sugar maple surface with the same equipment used in this study and demonstrated that crushing or tearing were significantly minimized when using a 120-grit stage or higher. Additional pure sugar maple thin samples (without XPVAc coating) were prepared following the sanding technique described above. Films of pure XPVAc were obtained. The adhesive was poured on an aluminum plate. Once cured, the film was removed from the plate and the thickness was determined according to specifications given in the ASTM D 1005-95 (1995a) standard.

The method used to determine the diffusion coefficient under steady-state was inspired from Siau (1995), the ASTM E 96-95 (1995b) standard and the coating diffusion cup also called Payne cup. The water vapor flux was determined from the linear part of the curve of cup mass as function of time which corresponds to the steady state. The cup contained distilled water and a RH of 100% was assumed. The edge of the specimen was sealed with epoxy glue. A Teflon ribbon was also placed around the cup rim to ensure that water vapor diffuses only through the specimen. The assembled cup was then placed in a cabinet under climate control (Fig 14).



Figure 14: Cabinet with assembled diffusion cups during diffusion tests.

Twenty-two diffusion cups were prepared for the determination of the wood-adhesive interface diffusion coefficient. Sixteen cups out of the 22 were sealed with the wood surface of the wood-adhesive thin sample in contact with the ambient air and the wood-adhesive interface exposed to 100% RH inside the diffusion cup. The remaining diffusion cups were sealed with the wood-adhesive surface exposed to the ambient air and the wood surface exposed to 100% RH inside the diffusion cup. This was done in case the adhesive penetrated into wood at a smaller depth than the 0.3 mm thin sample thickness. The diffusion coefficient of 14 pure XPVAc film specimens and 7 pure wood thin samples were also determined.

The RH inside the cabinet was controlled by a saturated salt solution. A saturated potassium acetate solution at 20°C provided and maintained a constant RH of 30% and a partial vapor pressure of 0.45 kPa in the cabinet. Distilled water was used in the vapor cups to provide 100% RH, thus creating an important vapor pressure gradient across the wood–adhesive sample. This resulted in significant and easily measurable weight losses of the diffusion cups. The cabinet was placed in a conditioning room under identical hygrothermal conditions in order to reduce changes in hygrothermal conditions around the diffusion cups during weighing. Moisture flux through the specimen was monitored by periodic weighing of the vapor cups. The establishment of steady-state conditions was confirmed when the moisture flux remained constant over a period of 69 hours. The initial moisture content measured by the oven-drying method was 8.6% which is in agreement with data obtained by Djolani (1970) for sugar maple. Basic density was obtained for each component by the gravimetric method.

2.4.2.2 Coefficient of moisture expansion

Regarding the determination of the coefficient of moisture expansion (CME), wood–adhesive interface thin samples were cut to obtain specimens of 50 mm by 100 mm in the tangential and longitudinal directions respectively. The thin samples were conditioned to 20°C and 27% RH and then to 20°C and 80% RH. The CME was obtained by comparing specimen size in both hygrometric conditions. The measures were obtained with a Multichck PC 500 measuring device from Blickle which consists of a microscope mounted on a two axis roller-supported system which can determine the distance between two points with an accuracy of 0.001 mm. To avoid errors due to cupping distortion during the measurement, the thin sample was placed between a plexiglass plate and a metal plate. A total of 15 wood–adhesive thin samples were prepared to determine the CME of the composite. Fifteen pure XPVAc films and 14 pure sugar maple thin samples were also prepared to determine their respective expansion coefficient in the same hygrometric conditions. The XPVAc was considered as an isotropic and homogeneous material. Its expansion coefficient was then assumed to be the same in all directions and its CME was measured in only one direction.

The CME was obtained from the following relation:

$$CME = \frac{L - L_0}{L_0 \Delta MC} \quad (14)$$

where CME: coefficient of moisture expansion, $\text{mm} \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \%^{-1}$; L: length at 80% RH, mm; L_0 : length at 27% RH, mm; ΔMC : difference in moisture content of the specimen, %.

2.4.3 Modeling approach

The finite element model of EWF hygromechanical cupping used in this study was developed by Blanchet et al (2005) and Deteix et al (2008). The modeling approach used in the current study was similar except for the mesh used. Two layers of elements were used in the current study for the glue-line instead of one in Blanchet et al (2005). Two layers of elements were also added in each interface section. Figure 15 presents a schematic comparison of the mesh with interfaces used in the current study and the mesh without interfaces used by Blanchet et al (2005). A linear interpolation was used to calculate the diffusion properties of the interfaces not made of sugar maple. The calculated cupping was validated against experimental data.

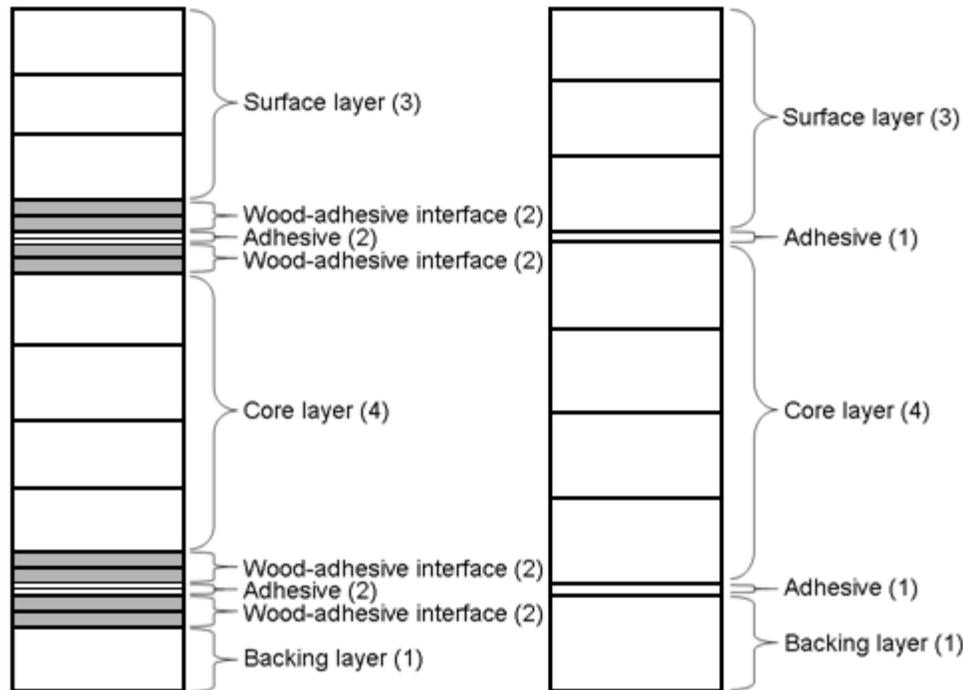


Figure 15: Schematic of the mesh used for the model including interfaces (grey) (left) and the original model from Blanchet et al (2005) (right). The mesh with interfaces from the surface layer to the backing layer with the number of layers of elements in parenthesis is presented as follows: Surface layer of sugar maple (3), sugar maple-XPVAc interface (2), XPVAc adhesive (2), XPVAc-white birch interface (2), Core layer of white birch (4), White birch-XPVAc interface (2), XPVAc adhesive (2), XPVAc-Yellow birch interface (2) and the backing layer of yellow birch (1).

Deformation was assumed to be caused by asymmetrical shrinkage induced by water vapor desorption from 8.6 to 5.8% MC occurring by convection from the top surface only. All other edges and the bottom surface were assumed impervious. Each wood layer of the composite was assumed orthotropic and elastic. The EWF strip was assumed to be initially free of stress since the components were conditioned before and after assembly.

2.4.3.1 Wood components properties

The material properties used in the current study are listed in Table 2. Some parameters were taken from the literature and previous studies and others were determined experimentally. The properties of the core material and backing layer were taken from the literature and were the same as those used by Blanchet et al (2005). Shear and elastic moduli and Poisson's ratios of sugar maple were obtained from Bodig and Jayne (1993).

Shrinkage and swelling coefficients were obtained from Goulet and Fortin (1975) except for the tangential direction which was determined in the laboratory. The CMEs in the longitudinal direction were not sufficiently high to be detected by our apparatus. The basic density of sugar maple was also determined experimentally. Transverse water vapor diffusion coefficient for sugar maple was determined experimentally. Water vapor diffusion coefficients in longitudinal direction were taken from Siau (1995).

Table 2: Parameters used in the model.

Parameter	Material				
	Surface	Core	Backing	Binder	Interface
	Sugar Maple	White Birch	Yellow Birch	XPVAc	Sugar maple & XPVAc
d_b (kg·m ⁻³)	⁸ 634	¹ 506	¹ 559	⁸ 1178	⁸ 782
D (m ² ·s ⁻¹)				⁸ 4.18 x 10 ⁻¹²	
D_L (m ² ·s ⁻¹)	² 2.2 x 10 ⁻⁹	² 2.2 x 10 ⁻⁹	² 2.2 x 10 ⁻⁹		⁶ 5.73 x 10 ⁻¹²
D_R (m ² ·s ⁻¹)	⁶ 1.66 x 10 ⁻¹¹	² 4 x 10 ⁻¹¹	² 4 x 10 ⁻¹¹		⁶ 5.73 x 10 ⁻¹²
D_T (m ² ·s ⁻¹)	⁸ 1.66 x 10 ⁻¹¹	² 4 x 10 ⁻¹¹	² 4 x 10 ⁻¹¹		⁸ 5.73 x 10 ⁻¹²
M_0 (%)	8.6	8.6	8.6	8.6	8.6
M_∞ (%)	5.8	5.8	5.8	5.8	5.8
h (kg·m ⁻² ·s ⁻¹ ·% ⁻¹)	² 3.2 x 10 ⁻⁴	² 3.2 x 10 ⁻⁴	² 3.2 x 10 ⁻⁴	² 3.2 x 10 ⁻⁴	² 3.2 x 10 ⁻⁴
$\beta^{\text{Effective}}$ (mm·mm ⁻¹ ·% ⁻¹)				⁸ 3 x 10 ⁻³	
β_L (mm·mm ⁻¹ ·% ⁻¹)	⁷ 1.8 x 10 ⁻⁴	¹ 1.5 x 10 ⁻⁴	¹ 1.5 x 10 ⁻⁴		⁶ 4 x 10 ⁻³
β_R (mm·mm ⁻¹ ·% ⁻¹)	⁷ 1.9 x 10 ⁻³	¹ 1.7 x 10 ⁻³	¹ 1.9 x 10 ⁻³		⁶ 4 x 10 ⁻³
β_T (mm·mm ⁻¹ ·% ⁻¹)	⁸ 3 x 10 ⁻³	¹ 2.4 x 10 ⁻³	¹ 2.3 x 10 ⁻³		⁸ 4 x 10 ⁻³
$\alpha^{\text{Effective}}$ (mm·mm ⁻¹ ·% ⁻¹)				⁸ 3 x 10 ⁻³	
α_L (mm·mm ⁻¹ ·% ⁻¹)	⁷ 1.5 x 10 ⁻⁴				⁶ 4 x 10 ⁻³
α_R (mm·mm ⁻¹ ·% ⁻¹)	⁷ 2.1 x 10 ⁻³				⁶ 4 x 10 ⁻³
α_T (mm·mm ⁻¹ ·% ⁻¹)	⁸ 4 x 10 ⁻³				⁸ 4 x 10 ⁻³
E (GPa)				⁴ 12.740	
E_L (GPa)	³ 13.810	³ 12.045	³ 15.251		⁶ 13.810
E_R (GPa)	³ 1.311	³ 1.069	³ 1.251		⁶ 1.311
E_T (GPa)	³ 0.678	³ 0.516	³ 0.641		⁶ 0.678
G_{LR} (GPa)	³ 1.013	³ 0.829	³ 0.971	¹⁰ 4.718	⁶ 1.013
G_{RT} (GPa)	³ 0.255	³ 0.200	³ 0.242	¹⁰ 4.718	⁶ 0.255
G_{LT} (GPa)	³ 0.753	³ 0.607	³ 0.721	¹⁰ 4.718	⁶ 0.753
ν				⁹ 0.035	
ν_{LT}	³ 0.50	³ 0.43	³ 0.45		⁶ 0.50
ν_{RT}	³ 0.82	³ 0.78	³ 0.70		⁶ 0.82
ν_{TL}	³ 0.025	³ 0.018	³ 0.018		⁶ 0.025
ν_{RL}	³ 0.044	³ 0.043	³ 0.035		⁶ 0.044
ν_{TR}	³ 0.42	³ 0.38	³ 0.36		⁶ 0.42
ν_{LR}	³ 0.46	³ 0.49	³ 0.43		⁶ 0.46

¹Jessome (2000), ²Siau (1995), ³Bodig and Jayne (1993), ⁴Bandrup et al (1999),

⁵Blanchet et al (2005), ⁶Estimated value, ⁷Goulet and Fortin (1975), ⁸Experimental value,

⁹Urayama et al (1993), ¹⁰Bañlon and Dorlot (2000). d_b : basic density; D_i : diffusion coefficient in direction i ; M_0 : Initial moisture content; M_∞ : Final moisture content; h : convective mass transfer coefficient; β_i : shrinkage coefficient in direction i ; α_i : swelling coefficient in direction i ; E_i : elastic modulus in direction i ; G_{ij} : shear modulus in plane ij ; ν_{ij} : poisson's ratio in plane ij .

2.4.3.2 Wood-adhesive interface properties

Basic density and radial water vapor diffusion coefficient of the wood-adhesive interface were determined experimentally. For technical reasons relative to the thickness of the wood-adhesive interface, longitudinal and radial water vapor diffusion coefficients were estimated from our results in tangential direction. The CMEs of the wood-adhesive interface in the tangential direction were determined experimentally. The experimental results showed that the shrinkage and swelling coefficients were relatively similar for wood and the wood-adhesive interface. From this perspective, shrinkage and swelling in the radial and longitudinal directions as well as the shear and elastic moduli and the Poisson's ratio were then assumed to be the same for both materials.

2.4.3.3 Polyvinyl acetate adhesive properties

Polyvinyl acetate adhesive can be considered as an isotropic material. Its modulus of elasticity (E) and Poisson's ratio (ν) were obtained from Bandrup et al (1999) and Urayama et al (1993) respectively. The shear modulus (G) was obtained from Eq. (11) from Baïlon and Dorlot (2000):

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (15)$$

Basic density, shrinkage and swelling coefficients and diffusion coefficient of XPVAc were obtained experimentally following the technique described above.

2.5 Results and discussion

2.5.1 Water vapor diffusion coefficient

No splits or other types of damage of the specimens were detected during the diffusion experiment. This was a concern for the wood-adhesive interface XPVAc-sugar maple samples for which the wood side of the specimen was in contact with a 100% RH environment. An analysis of variance was performed on the average diffusion coefficients obtained using the SAS statistical software. A very significant difference was found between sugar maple, XPVAc and the wood-adhesive interface XPVAc-sugar maple and sugar maple-XPVAc. The Duncan multiple comparison test results presented in Table 3 shows that the mean diffusion coefficient obtained for sugar maple, XPVAc and the wood-

adhesive interface were significantly different. The mean diffusion coefficients obtained for XPVAc-sugar maple and sugar maple-XPVAc were not significantly different.

Sugar maple had the highest diffusion coefficient at $1.66 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ and the free film of XPVAc had the lowest at $4.18 \times 10^{-12} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$. The sugar maple diffusion coefficient obtained in the current study is similar to the one obtained by Blanchet et al (2005) ($1.80 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$). The mean diffusion coefficient obtained for the wood-adhesive interface is slightly higher than for pure XPVAc film at $5.73 \times 10^{-12} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ which is in agreement with our expectations. These results confirm the information found in the literature that the adhesive layer acts as a barrier for moisture diffusion. In addition, the wood-adhesive interface results suggest that the diffusion coefficient of the wood-adhesive interface is an average between the diffusion coefficient of each component of the composite. These results confirm that the interface between the wood substrate and the adhesive line represents an additional barrier to water vapor diffusion. The solid adhesive clearly becomes an integral part of the composite structure, creating an interface with its own properties.

Table 3: Duncan's multiple comparison test for the diffusion coefficients, experimental diffusion coefficients and basic density (o.d. weight / green volume).

	Duncan grouping	Water vapor diffusion coefficient $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	Basic density $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
Sugar maple	A	1.66×10^{-11} (1.49×10^{-12})	634 (4)
Sugar maple-XPVAc	B	5.73×10^{-12} (3.02×10^{-13})	782 (5)
XPVAc-Sugar maple	B	5.73×10^{-12} (1.37×10^{-13})	782 (5)
XPVAc	C	4.18×10^{-12} (2.91×10^{-13})	1 178 (16)

Standard error in parenthesis.

2.5.2 Coefficient of moisture expansion

The tangential CMEs obtained for the wood-adhesive interface were found to be $4 \times 10^{-3} \text{ mm}\cdot\text{mm}^{-1}\cdot\%^{-1}$ (Table 4). Even during shrinkage or swelling, the coefficients obtained for the wood-adhesive interface were very similar. The results obtained suggest that impregnation of XPVAc in sugar maple does not have a significant impact on the expansion coefficient of the resulting composite material.

The result obtained for sugar maple tangential shrinkage ($3 \times 10^{-3} \text{ mm}\cdot\text{mm}^{-1}\cdot\%^{-1}$) is similar to that obtained by Goulet and Fortin (1975) ($2.8 \times 10^{-3} \text{ mm}\cdot\text{mm}^{-1}\cdot\%^{-1}$). In the case of swelling, the tangential CME obtained for sugar maple was slightly higher with $4 \times 10^{-3} \text{ mm}\cdot\text{mm}^{-1}\cdot\%^{-1}$. The tangential shrinkage and swelling CMEs obtained for XPVAc were equal to $3 \times 10^{-3} \text{ mm}\cdot\text{mm}^{-1}\cdot\%^{-1}$. The basic density of the interface ($782 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$) was closer to the basic density of sugar maple ($634 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$) than that of pure XPVAc ($1178 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$). This suggests that XPVAc filled only a fraction of the wood pore space.

Table 4: Experimental expansion coefficient obtained for each section. Effective refers to the expansion coefficient of XPVAc adhesive which is isotropic.

	Swelling		Shrinkage	
	From 21°C/27% RH to 21°C/80% RH		From 21°C/80% RH to 21°C/27% RH	
	Tangential ($\text{mm}\cdot\text{mm}^{-1}\cdot\%^{-1}$)	Effective ($\text{mm}\cdot\text{mm}^{-1}\cdot\%^{-1}$)	Tangential ($\text{mm}\cdot\text{mm}^{-1}\cdot\%^{-1}$)	Effective ($\text{mm}\cdot\text{mm}^{-1}\cdot\%^{-1}$)
Sugar maple-XPVAc	4×10^{-3}		4×10^{-3}	
Sugar maple XPVAc	4×10^{-3}	3×10^{-3}	3×10^{-3}	3×10^{-3}

2.5.3 Modeling results

Figure 16 presents the finite element model results obtained considering RH variation inside the conditioning room and the corresponding experimental results. The sorption hysteresis and the interaction between moisture content and the diffusion coefficient were taken into account in the model. The initial moisture content of the EWF strip was 8.6% and the equilibrium moisture content was set at 5.8%. The experimental deformation curve with its 95% confidence intervals was compared with model results obtained by Blanchet et al (2005) without considering the effect of the interface, and with the current model which considers this effect.

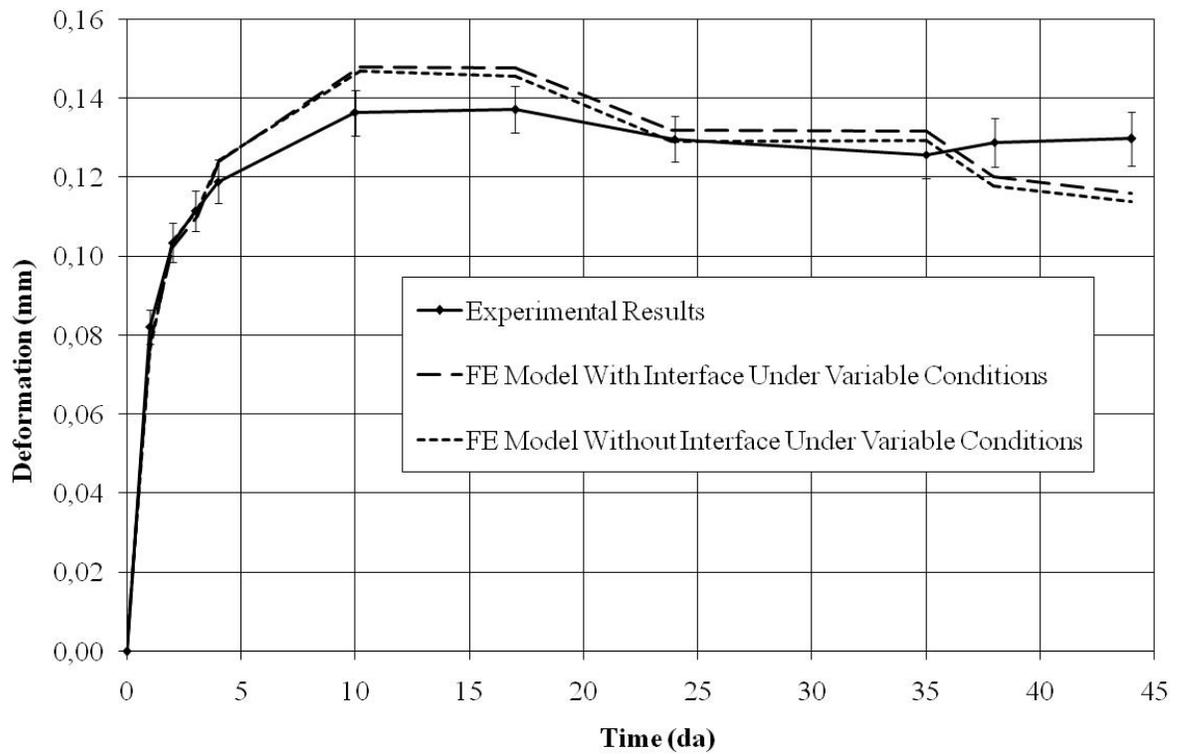


Figure 16: Experimental and calculated cupping deformation as a function of time considering actual RH variation in the conditioning room. Error bars represent the 95% confidence intervals from the experimental data points.

The cupping deformation can be divided in two parts. The first one represents the transient section occurring during the first 10 days of conditioning followed by a plateau which is more stable in terms of cupping. The current model considering interface effects does not have a significant impact on the deformation compared to the model without interface. This can be observed from the slope of the calculated cupping in the transient section where both models remain close to each other slightly over the experimental curve. The deformation calculated from both models remains close to the 95% confidence intervals from the experimental curve during the entire time span. Both models slightly overestimate the deformation until day 35. Following this moment both models slightly underestimate the deformation. The two models used are based on the hypothesis of elastic behavior of wood and the adhesive. Cupping is a mechanosorptive phenomenon that most likely affects the drying rate. This could explain the difference between experimental and calculated deformation curves. It would be interesting to consider mechanosorption and creep in future models. On the methodological aspect an appropriate process to provide thinner samples of the interface would certainly offer more accurate interface properties.

2.6 Conclusions

The main objective of this study was to provide additional information about engineered wood flooring behavior through the determination of the water vapor diffusion coefficient and moisture expansion coefficients of the wood-adhesive interface. The model proposed by Blanchet et al (2005) implemented with these parameters does not offer more accurate results. The current model considering interface effects is not closer to the experimental curve than the model without interface effects.

Sugar maple had the highest diffusion coefficient at $1.66 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ and the free film of XPVAc had the lowest at $4.18 \times 10^{-12} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$. The diffusion coefficient obtained for the wood-adhesive interface was slightly higher than that of pure XPVAc film but lower than for solid wood at $5.73 \times 10^{-12} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$. The investigation of the moisture movement in the wood-adhesive interface confirmed that there was not a significant difference between the mean diffusion coefficients of sugar maple-XPVAc and XPVAc-sugar maple samples.

The tangential coefficients of moisture expansion for the wood-adhesive interface were found to be $4 \times 10^{-3} \text{ mm}\cdot\text{mm}^{-1}\cdot\%^{-1}$ and $3 \times 10^{-3} \text{ mm}\cdot\text{mm}^{-1}\cdot\%^{-1}$ for XPVAc. In the case of sugar maple, the results obtained for tangential shrinkage at $3 \times 10^{-3} \text{ mm}\cdot\text{mm}^{-1}\cdot\%^{-1}$ are slightly lower than those of the tangential expansion coefficient at $4 \times 10^{-3} \text{ mm}\cdot\text{mm}^{-1}\cdot\%^{-1}$. The moisture expansion properties for the wood-adhesive interface were relatively similar to those of solid wood in the composite structure.

The results obtained in this study confirm that the wood - polyvinyl acetate adhesive interface has no significant influence on the cupping deformation resulting from moisture movement through laminated composites such as engineered wood flooring. However, the lower diffusion coefficient obtained for polyvinyl acetate compared to maple wood shows that the impact of the wood-polymer interface acting as a moisture barrier should still be considered in finite element models dealing with adhesive and wood composites. It is also clear that the solid adhesive becomes an integral part of the composite structure, creating an interface with its own specific properties.

Conclusion

La présente étude avait pour objectif principal d'augmenter et de préciser les connaissances sur le comportement et les performances des lames de plancher d'ingénierie (LPI) afin d'en accélérer le design. Les objectifs spécifiques de ce projet consistaient à déterminer les coefficients de diffusion et d'expansion à l'interface bois-polymères et de corriger les hypothèses d'un modèle déjà existant (Blanchet, 2004). Deux approches ont été mises en place afin d'atteindre ces objectifs. Dans un premier temps, des prototypes ont été fabriqués en laboratoire et mis en service dans des conditions contrôlées afin d'acquérir les connaissances nécessaires à la validation de l'approche par modélisation. Une méthode a également été développée dans le but d'isoler et d'étudier les propriétés de l'interface bois-adhésif. Des essais ont été effectués afin de déterminer les coefficients d'expansion et de diffusion en régime permanent de cette zone.

Tel qu'anticipé, l'érable à sucre a affiché le coefficient de diffusion le plus élevé à $1,66 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ et le film libre de XPVAc le plus faible à $4,18 \times 10^{-12} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$. Le coefficient de diffusion de l'interface bois-adhésif était sensiblement plus élevé que celui pour le film libre de XPVAc mais inférieur à celui de l'érable à sucre à $5,73 \times 10^{-12} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$. Les coefficients d'expansion pour l'interface bois-adhésif et le film libre de XPVAc étaient respectivement de $4 \times 10^{-3} \text{ mm} \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \%^{-1}$ et $3 \times 10^{-3} \text{ mm} \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \%^{-1}$. Dans le cas de l'érable à sucre, le coefficient d'expansion sur le plan tangentiel en désorption ($3 \times 10^{-3} \text{ mm} \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \%^{-1}$) était inférieur à celui en adsorption ($4 \times 10^{-3} \text{ mm} \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \%^{-1}$). L'étude a permis de constater que l'interface n'a pas d'effet significatif en ce qui concerne la déformation dans les LPI suite à des changements de teneur en humidité. Le modèle considérant l'interface bois-adhésif n'était pas significativement plus près de la courbe expérimentale que le modèle sans interface.

Il serait intéressant de développer une méthode d'isolement de l'interface permettant d'obtenir des échantillons encore plus minces que ceux obtenus lors de la présente étude. Tel que mentionné par Adams (2005), la pénétration de l'adhésif dans les pores du bois atteint une profondeur variant de $15 \mu\text{m}$ à plus de $150 \mu\text{m}$. En sachant que nos échantillons affichaient une épaisseur de l'ordre de $0,3 \text{ mm}$, un meilleur isolement de l'interface

permettant d'obtenir des échantillons plus minces permettrait d'obtenir des paramètres plus précis.

Le modèle actuel présente également certaines limites. Le modèle étant purement élastique, il serait peut-être intéressant d'inclure certains paramètres au modèle actuel afin de tenir compte de l'effet mécanosorptif possible à l'intérieur du matériau bois suite à la formation d'un gradient de teneur en humidité. Les travaux futurs sur le modèle pourraient permettre de déterminer les modules d'élasticité et de cisaillement de l'interface bois-adhésif en plus des coefficients de poisson adéquats. De plus, il serait intéressant d'inclure un ajustement du coefficient de diffusion en fonction de la teneur en humidité. En effet, les coefficients de diffusion déterminés ici sont fixes pour la plage d'humidité couverte dans les conditions d'essai et gagneraient à être ajustés en fonction de la teneur en humidité du matériau. Une étude de simulation du degré d'impact des principaux paramètres serait un atout important pour les travaux futurs.

Ce projet offre à l'industrie une connaissance accrue des phénomènes hygromécaniques des lames de plancher d'ingénierie mais surtout un outil de développement de produit efficace. Cet outil permet de réduire le temps de développement qui implique de longues périodes de conditionnement en chambre climatisée. Les méthodes développées dans ce projet pourront être réutilisées ultérieurement afin de déterminer les mêmes paramètres dans les vernis.

Le choix d'un adhésif implique des considérations de design et de coût. De plus, il importe que l'adhésif sélectionné soit en mesure de demeurer performant durant toute la durée de vie du revêtement de plancher. Le produit sélectionné doit être en mesure de subir la fatigue provoquée par la dilatation des lames de plancher ainsi que les contraintes provoquées par ces distorsions au fil des années.

Bibliographie

- Adams, R.D., 2005. *Adhesive bonding, sciences, technology and applications*. Woodhead Publishing Limited, Abington Hall, Abington Cambridge, England, CRC Press, Florida, USA, 548 p.
- American Society for Testing and Materials (ASTM), 1995a. *Standard test method for water measurement of dry-film thickness of organic coatings using micrometers, D 1005-95*, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.
- American Society for Testing Materials (ASTM), 1995b. *Standard test method for watervapor transmission of materials, E 96-95*, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.
- Anonyme, 2007. *Statistical Report 2006*. Floor Covering Weekly 56(18).
- Anonyme, 2006. *L'industrie européenne du parquet en 2005*. European Federation of the Parquet Industry, Billet pour la presse, 30 Mai, 5 p.
- Anonyme, 2003a. *Les meilleures pratiques en développement de produits, Institut de développement de produits*. www.idp-ipd.com/, Accédé en octobre 2005.
- Anonyme, 2003b. *Product Bulletin Wonderbond WB-957*. Hexion Specialty Chemicals Inc. Columbus, OH, USA, 1 p.
- Association Française de Normalisation (AFNOR). NF P 63-204-1, DTU 51.11, 1997, Norme française homologuée, Pose flottante des parquets et revêtements de sol contrecollés à parement bois. Saint-Denis La Prairie, France. 28 p.
- Bailon, J.-P. et J.-M. Dorlot, 2000. *Des Matériaux*. 3^e Édition, École Polytechnique de Montréal, Canada, 740 p.
- Bandrup, J. et E.H. Immergut, 1999. *Polymer handbook*, 3^e édition, Wiley, New York, USA, 1904 p.
- Blanchet, P., 2004. *Caractérisation du comportement des lames de plancher d'ingénierie*, thèse de Doctorat, Département de Foresterie et de Géomatique, Université Laval, Québec, Canada, 129 p.
- Blanchet, P., Cloutier A., Gendron G. et R. Beauregard, 2003. *Hygromechanical modelling of layered parquet using the finite element method*. Actes de la seconde conférence internationale de la European Society for Wood Mechanics, Stockholm, Sweden, 25-28 Mai 2003.
- Blanchet, P., Cloutier A., Gendron G. et R. Beauregard, 2005. *Numerical prediction of engineered wood flooring deformation*. Wood Fiber Sci. 37(3): 484-496.

- Bodig, J. et B.A. Jayne, 1993. *Mechanics of Wood and Wood composites*. Krieger Publishing Company, Malabar, Florida, USA. 712 p.
- Choong, E.T., 1965. *Diffusion coefficients of soft-woods by steady-state and theoretical methods*. Forest Prod. J. 15:21-27
- Cognard, J., 2004. *Science et technologie du collage*, Presses Polytechniques et universitaires romandes. Lausanne, Suisse, 322 p.
- Comstock, G.L., 1963. *Moisture diffusion coefficients in wood as calculated from adsorption, desorption and steady-state data*. Forest Prod. J. 13(3): 97-103.
- Comstock, G.L., 1967. *Longitudinal permeability of wood to dases and nonswelling liquids*. Forest Products Journal. 17(10), p. 41-47.
- Comyn, J., 1985. *Polymer Permeability*, Chapman & Hall, London, UK 396 p.
- Cortelyou, G., 2005. *Solid Vs Engineered: The debate goes on*. Floor Covering Weekly 54(22).
- De Leeuw, M., 1983. *Le collage du bois*, Cahier du Centre technique du bois (109), Paris, France, 84 p.
- de Moura, L.F., 2006. *Étude de trois procédés de finition des surfaces du bois d'érable à sucre pour fins de vernissage*. thèse de Doctorat, Département des sciences du bois et de la forêt, Université Laval, Québec, Canada, 181 p.
- Deteix J., Blanchet P., Fortin A. et A. Cloutier, 2008. *Finite element modeling of laminate wood composites hygromechanical behavior considering diffusion effects in the adhesive layers*, Wood Fiber Sci. 40(1): 132-143.
- Diebels, S., Steeb H. et W. Possart, 2005. *Adhesion, Current research and applications : Effects of the interphase on the mechanical behavior of thin adhesive films – a modeling approach*. Wiley-VCH, Weinheim, Allemagne, 575 p.
- Djolani, B., 1970. *Hystérèse et effets de second ordre de la sorption d'humidité dans le bois aux températures de 5°, 21°, 35° et 50°C*. Note de recherches n° 8, Département d'Exploitation et Utilisation des Bois, Université Laval, Québec, Canada, 60 p.
- Fournier, F., 1976. *Diffusion de l'humidité dans le bois de 20°C à 95°C en fonction de son état de sorption*. Note de recherches No 16. Département d'exploitation et utilisation des bois. Université Laval, Québec, Canada, 62 p.
- Goulet, M. et P. Laforest, 1974. *Étude de l'application de la théorie de l'élasticité aux déformations du bois sous pression*. Note de recherches No 11. Département d'exploitation et utilisation des bois. Université Laval, Québec, Canada, 38 p.

- Goulet, M. et Y. Fortin, 1975. *Mesure du gonflement de l'érable à sucre au cours d'un cycle de sorption d'humidité à 21°C*. Note de recherches no. 12, Département d'Exploitation et Utilisation des Bois, Université Laval, Québec, Canada, 49 p.
- Hart, C.A., 1964. Principles of moisture movement in wood. *Forest Prod. J.* 14(5): 207-214.
- Jessome, A.P., 2000. *Strength and related properties of woods grown in Canada*. Forintek Canada Corp. Publication spéciale, SP514E. 37 p.
- Keey, R.B., Langrish T.A.G. et J.C.F. Walker, 2000. *Kiln-Drying of Lumber*. Springer, Berlin, Allemagne, 326 p.
- Kinloch, A.J., 1987. *Adhesion and adhesives : science and technology*, Chapman and Hall, London, UK, 441 p.
- Kollmann, F., 1951. *Technologie des Holzes und Holzwerkstoffe*, 2e édition, Tome I, Springer-Verlag, Berlin-Göttingen-Heidelberg-Munich, Allemagne, 1050 p.
- Mackay, J.F.G., 1971. *Moisture flux determinations influenced by air circulation inside diffusion cells*. *Wood Sci.* 3(4): 220-222.
- Marra, A., 1992. *Technology of wood bonding : principles in practice*, Van Nostrand Reinhold, New York, USA, 454 p.
- Panshin, A. J. et C. de Zeeuw, 1980. *Textbook of wood technology. Structure, identification, properties and uses of the commercial woods of the United States and Canada*. McGraw-Hill, New York, USA, 722 p.
- Pizzi, A. et K.L. Mittal, 2003. *Handbook of adhesive technology*, 2e édition, Marcel Dekker, New York, USA, 1024 p.
- Schneider, A., 1960. *Neue Diagramme zur Bestimmung der relative Luftfeuchtigkeit über gesättigten wässrigen Salzlösungen und wässrigen Schwefelsäurelösungen bei verschiedenen Temperaturen*. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 18: 269–272.
- Schultz, J., 1992. *Effect of orientation and organization of polymers at interfaces on adhesive strength*, *J. Adhesion*, 37(1-3): 73-81.
- Sherwood, T.K., 1929. *The drying of solids*, *Ind. Eng. Chem.*, 21(1): 12–16.
- Siau, J.F., 1995. *Wood : Influence of moisture on physical properties*. Dept. of Wood Sci. and Forest Products. Virginia Polytechnic Institute and State University. Blacksburg. Virginia, USA, 227 p.
- Stamm, A.J., 1956. *Diffusion in wood*. *Forest Prod. Lab. (USDA) Rapport n° 1674*, USA, 33 p.

- Urayama, K., Takigawa T. et T. Masuda, 1993. *Poisson's ratio of polyvinyl alcohol gels*, *Macromolecules*, vol. 26, n°12, pp. 3092-3096.
- Vick, C.B., 1999. *Wood handbook, wood as an engineering material*. Forest Products Society, USA, p. 9-1 à 9-24.
- Wadsö, L., 1993. *Studies of water vapor transport and sorption in wood*. thèse de Doctorat, Report TVBM-1013, Building Materials, Lund University, Lund, Suède, 102 p.
- Watts, J.F., 2005. *Adhesion, Current research and applications : The interfacial chemistry of adhesion : novel routes to the holy grail?* Wulff Possart, Wiley-VCH, Weinheim, Allemagne, 575 p.
- Yokota, T., 1962. *Concentration-dependant diffusion of desorption water through the cell wall of wood*. *Journal of Japanese Wood Research Society*. 8(5):192-197.

Annexe I

Des essais supplémentaires ont été effectués afin d'étudier l'évolution du contenu en humidité de chacune des composantes d'une lame de plancher d'ingénierie (LPI). Cinq constructions ont été préparées suivant les mêmes paramètres de conception que lors de la validation. Les assemblages ont été préalablement conditionnés à 20°C et 50% HR et transférés à 20°C et 20% HR durant 44 jours. À la même fréquence que pour les mesures de distorsion, une section de 3 cm de longueur a été sciée à une extrémité de chacune des 5 constructions. Les sections restantes de LPI ont été scellées à nouveau sur les chants et le dos des lamelles au moyen de silicone et d'aluminium puis retournées à 20°C et 20% HR. Chaque composante de chacune des sections sciées (surface, substrat et contrebalancement) a ensuite été isolée à l'aide d'une scie à ruban, le trait de scie ayant été effectué sur les lignes d'adhésif (Figure 17). La teneur en humidité (H) pour chaque composante a été déterminée par la méthode de séchage à l'étuve.



Figure 17: Méthode de découpe pour la mesure du contenu en humidité des sections.

À la lumière des résultats présentés à la Figure 18, nous constatons que H pour le composant de surface diminue très rapidement comparativement au substrat et à la couche de contrebalancement. Le composant de surface atteint un plancher correspondant à 6% H après le dixième jour. H pour le substrat et la couche de contrebalancement demeure supérieure à 6% même après plus de 44 jours. Cette observation confirme la présence d'un gradient de teneur en humidité à l'intérieur des LPI. Ce gradient entre le composant de surface et les autres sections confirme l'importance de la ligne d'adhésif ainsi que de l'interface bois-adhésif au niveau du mouvement de la vapeur d'eau dans les LPI. Cette même barrière serait à l'origine des contraintes présentes dans le composant de surface et qui se traduisent par du tuilage.

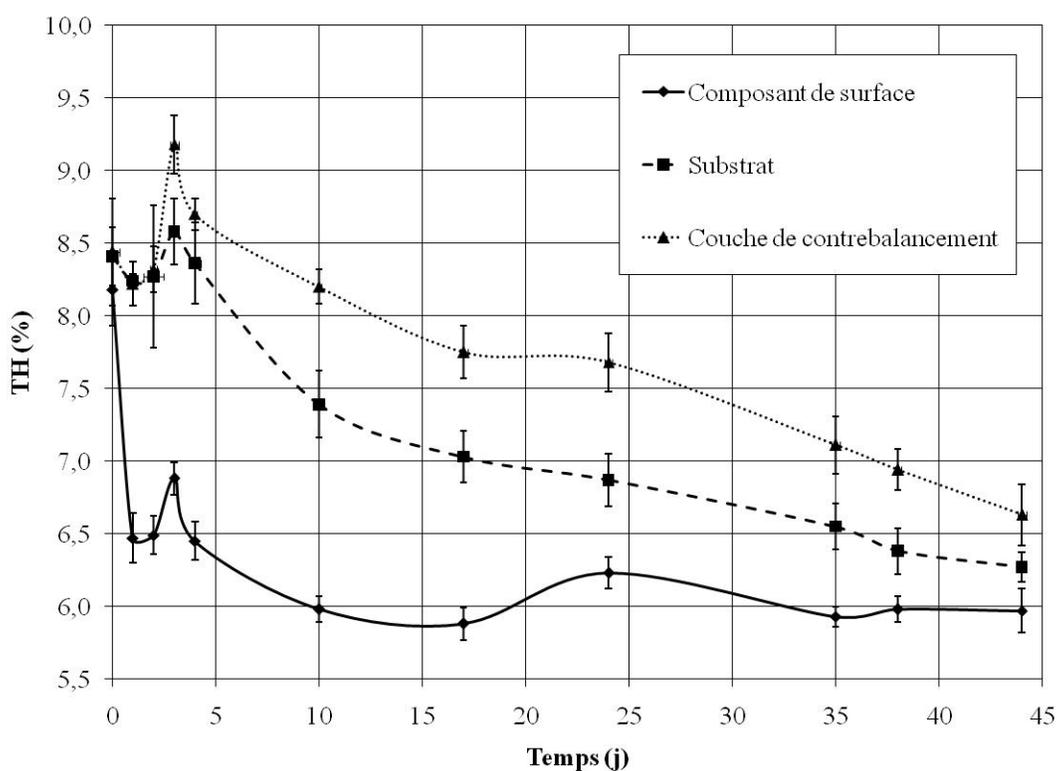


Figure 18: Teneur en humidité des composantes en fonction du temps. Les barres d'erreur correspondent à l'écart-type expérimentale observée.